

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Türkiye Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonları ve
Yönetimi**

Orhan ALTÜRK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**Türkiye Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonları ve
Yönetimi**

Orhan ALTÜRK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 19/06/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Zeynep B. ZAIMOĞLU (Danışman)
: Prof. Dr. Dilek BOSTAN BUDAK
: Prof. Dr. Behzat BALCI
: Dr. Öğr. Üyesi Onur IŞIK
: Dr. Öğr. Üyesi Emre Oğuz KÖROĞLU

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.
Tez No:**

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Kardeşim Zinet ve Oğlum Yusuf Azad'a

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER, KISALTMALAR, TANIMLAR VE ÖLÇÜ BİRİMLERİ.....	VI
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler.....	1
1.2. Karbon Yönetimi Açısından Havacılık Endüstrisinin Rakamsal Verileri ve Yoğunluğu.....	6
1.3. Türkiye’de Havacılık Endüstrisi Kaynaklı Salımlar	11
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	15
2.1. Genel Literatür Özeti	15
2.2. Havacılık Endüstrisi Emisyon Hesaplama Modelleri	19
2.2.1. AMSTERDAM Modeli.....	19
2.2.2. Emisyon Dağılım Modeli (Emission and Dispersion Modeling System) (EDMS) ..	21
2.2.3. Tier Yöntemi	24
2.2.4. CORSIA Yöntemi	27
2.2.5. AEDT (Aviation Environmental Design Tool).....	31
2.2.6. Advanced Emmissions Model (AEM) – Avrupa Birliği / EUROCONTROL	32
2.2.7. ICAO IMPACT Model – Küresel (ICAO Üye Devletleri)	33
2.2.8. GREET Model – ABD (Küresel Yakıt Zinciri)	34
2.2.9. SkyBreathe Modeli.....	36
2.2.10. FAST (Forecast and Analysis Support Tool) Modeli	37
2.2.11. OpenAP – Açık Kaynaklı Akademik Model (Global Araştırma Kullanımı)	37
3. MATERYAL VE METOD	43
3.1. Materyal	43
3.1.1. Uçuş Rotası.....	43
3.1.2. Kullanılan Uçak Tipleri ve Özellikleri	43
3.2. Metod.....	48
3.2.1. Tier Yöntemi.....	49
3.2.2. CORSIA Yöntemi.....	49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
4.1. Tier Metodu Bulguları	59
4.1.1. LTO Sırasında Emisyon Miktarlarının Hesaplanması	60
4.1.2. 100 km de Tüketilen Yakıt Miktarının Hesaplanması	65

4.1.3. Seyir Halindeki Emisyon Miktarlarının Hesaplanması.....	67
4.2. CORSIA CERT Metodu Bulguları.....	77
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	87
5.1. Operasyonel Önlemler.....	89
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	105



Türkiye Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonları ve Yönetimi

Orhan ALTÜRK

Danışman: Prof. Dr. Zeynep B. ZAIMOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZ

Türkiye havacılık sektörü, ekonomik büyüme ve ulusal kalkınma açısından önemli katkılar sunmakla birlikte, karbon emisyonları bakımından çevresel sorunlar doğurmaktadır. Son yıllarda hava trafiğinde yaşanan artış ve yeni havalimanlarının hizmete girmesi, sektörel sera gazı emisyonlarının kayda değer düzeyde yükselmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, Türkiye'nin uluslararası çevre politikaları ve iklim değişikliğiyle mücadele hedefleri doğrultusunda, havacılık kaynaklı karbon emisyonlarının etkin şekilde izlenmesi ve yönetilmesi giderek daha büyük bir önem taşımaktadır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen "Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation" (CORSIA) programı, uluslararası havacılıktan kaynaklanan karbon emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve denetlenmesi amacıyla oluşturulmuş küresel bir piyasa temelli mekanizmadır. Söz konusu program, emisyonların sınırlandırılması ve dengelenmesine yönelik ortak bir çerçeve sunarak, sürdürülebilir havacılık uygulamalarının yaygınlaştırılmasını hedeflemektedir. Türkiye, CORSIA'ya gönüllü katılım sağlayarak, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonlarını azaltma ve dengeleme yönünde taahhütte bulunmuş; böylece küresel iklim politikalarına uyum sağlama iradesini ortaya koymuştur.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), her yıl havacılık sektörüne ait karbon emisyonlarını hesaplama sürecinde çeşitli yapısal ve teknik zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu hesaplamaların doğruluğu, büyük ölçüde uçuş verilerinin güncelliği, güvenilirliği ve bütünlüğüne bağlıdır. Uçak tipi, taşıma kapasitesi, uçuş mesafesi ve operasyonel koşullar gibi değişkenler, emisyon tahminlerini karmaşıklaştıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'nin ulusal düzeyde doğru ve tutarlı emisyon envanterleri oluşturabilmesi adına, havacılık verilerinin sistematik olarak toplanması, analiz edilmesi ve doğrulanmasına yönelik altyapı ve kurumsal kapasitesini güçlendirmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu araştırmada, Türkiye havacılık sektörüne ilişkin emisyon verileri analiz edilmiş, mevcut ulusal ve uluslararası politika ve düzenlemeler detaylı biçimde incelenmiştir. Özellikle Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen Karbon Dengeleme ve Azaltma Programı (CORSIA), temel ilkeleri ve uygulama yapısıyla ele alınarak, havacılık kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik stratejik katkısı değerlendirilmiştir. Türkiye'nin CORSIA kapsamındaki yükümlülükleri ve bu yükümlülüklerin yerine getirilmesi için gerekli kurumsal ve teknik adımlar ortaya konmuştur. Ayrıca, IPCC tarafından önerilen Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 düzeylerindeki emisyon hesaplama yöntemleri, hesaplama hassasiyeti, veri gereksinimi ve uygulanabilirlik açısından karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, sektörel paydaşlara emisyonların hesaplanması, azaltımı ve yönetimi konusunda bütüncül bir yöntemsel çerçeve sunulması amaçlanmıştır. Elde edilen bulgular, CORSIA'nın etkin uygulanması durumunda Türkiye'nin hem ulusal iklim hedeflerine ulaşabileceğini hem de uluslararası çevre standartlarıyla uyum sağlayabileceğini göstermektedir. Çalışma, çevresel sürdürülebilirlik politikalarının geliştirilmesine katkı sunarken, aynı zamanda hem akademik literatür hem de uygulayıcılar için karar destek niteliğinde bir kaynak işlevi görmektedir.

Anahtar Kelimeler: Havacılık, CORSIA, ICAO, Sürdürülebilirlik, İklim Değişikliği.

Carbon Emissions and Management in Türkiye Aviation Sector

Orhan ALTÜRK

Advisor: Prof. Dr. Zeynep B. ZAIİMOĞLU

Department of Environmental Engineering

ABSTRACT

While the aviation sector in Turkey makes significant contributions to economic growth and national development, it also poses substantial environmental challenges in terms of carbon emissions. The increase in air traffic in recent years, along with the commissioning of new airports, has led to a notable rise in sectoral greenhouse gas emissions. In this context, the effective monitoring and management of aviation-related carbon emissions have become increasingly important in line with Turkey's commitments to international environmental policies and climate change mitigation targets.

The Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), developed by the International Civil Aviation Organization (ICAO), constitutes a global market-based mechanism designed to monitor, report, and verify carbon emissions from international aviation. The program provides a common framework for limiting and offsetting emissions, thereby promoting the adoption of sustainable aviation practices. Turkey has voluntarily joined the CORSIA scheme, committing to reduce and offset emissions from international flights and thereby demonstrating its willingness to align with global climate policy objectives.

Nevertheless, ICAO faces several structural and technical challenges in estimating annual emissions from the aviation sector. The accuracy of these estimations largely depends on the timeliness, reliability, and completeness of flight-related data. Variables such as aircraft type, payload capacity, flight distance, and operational conditions significantly complicate emission calculations. Accordingly, for Turkey to develop accurate and consistent national emission inventories, it is essential to strengthen its infrastructure and institutional capacity for systematically collecting, analyzing, and verifying aviation data.

In this study, emission data related to Turkey's aviation sector were analyzed, and existing national and international policies and regulations were examined in detail. Particular emphasis was placed on the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), developed by the International Civil Aviation Organization (ICAO), which was evaluated in terms of its core principles and implementation framework to assess its strategic contribution to the reduction of aviation-related emissions. Turkey's obligations under CORSIA were identified, along with the institutional and technical steps required for their fulfillment. Furthermore, the Tier 1, Tier 2, and Tier 3 emission calculation methodologies proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were comparatively analyzed in terms of calculation accuracy, data requirements, and applicability. Accordingly, the study aims to provide a comprehensive methodological framework for stakeholders in the sector regarding emission calculation, mitigation, and management. The findings indicate that effective implementation of CORSIA could enable Turkey to achieve its national climate targets while ensuring compliance with international environmental standards. This study not only contributes to the development of environmental sustainability policies but also serves as a methodological reference for the academic literature and as a practical decision-support tool for practitioners.

Keywords: Aviation, CORSIA, ICAO, Sustainability, Climate Change

TEŞEKKÜR

“Türkiye Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonları ve Yönetimi” başlıklı doktora tezimi hazırlama sürecinde, her zaman bilgi birikimiyle yolumu aydınlatan, yönlendirici fikirleri ve sabırlı desteğiyle beni yüreklendiren çok değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Zeynep B. ZAIİMOĞLU’na en içten şükranlarımı sunuyorum. Kendisi, sadece bir akademik rehber değil, aynı zamanda bu zorlu süreçte bana ilham veren bir yol gösterici olmuştur.

Tez sürecinde yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili Perihan İDİN ALTÜRK, Dr. M. Yavuz SUCU, Oya ZAIİMOĞLU, Nur Didem KEŞER, Deniz DASTAN, Linda IRIS ALICI, Prof. Dr. Ahmet BOLAT, Mustafa SEKMEN ve Senan İDİN’e gönülden teşekkür ederim. Her biri, bu yolculukta bana güç veren, motivasyonumu diri tutan çok kıymetli insanlar oldu.

Akademik gelişimime sunduğu katkılar ve sağladığı imkânlar için bağlı bulunduğum Çukurova Üniversitesi’ne sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, tez savunmamda yer alarak yapıcı eleştirileri ve değerli katkılarıyla çalışmama önemli ölçüde katkı sağlayan saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Dilek BOSTAN BUDAK, Prof. Dr. Behzat BALCI, Dr. Öğr. Üyesi Onur IŞIK ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Oğuz KÖROĞLU’na en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Altı yıllık bu uzun akademik yolculuk boyunca yanımda olan, beni her koşulda destekleyen değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma da ayrıca müteşekkirim.

Son olarak, bu süreçte en büyük desteği hiç kuşkusuz ailem verdi. Varlıklarıyla bana güç veren, sabırları ve inançlarıyla her zaman yanımda olan aileme minnettarım. Bu tezin bu aşamaya gelmesi, onların karşılıksız sevgisi, desteği ve fedakârlığı olmadan mümkün olamazdı. Onlara ne kadar teşekkür etsem yetersiz kalacaktır.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yolcu trafiği	6
Çizelge 1.2. Uçak trafiği	7
Çizelge 1.3. Yük trafiği	7
Çizelge 1.4. Uçak Sayısı	7
Çizelge 1.5. Havayolu Şirketleri Uçak Sayısı	7
Çizelge 1.6. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Türk Hava Yolları)	8
Çizelge 1.7. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Pegasus)	8
Çizelge 1.8. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Güneş Ekspres)	9
Çizelge 1.9. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Turistik Hava Taşımacılık).....	9
Çizelge 1.10. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Cortex Havacılık)	9
Çizelge 1.11. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Hürkuş Hava Yolu Taşımacılık) 9	
Çizelge 1.12. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Tailwind Havayolları)	9
Çizelge 1.13. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (BBN Hava Yolları).....	10
Çizelge 1.14. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Mavi Gök Havacılık).....	10
Çizelge 1.15. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Air Anka Havacılık)	10
Çizelge 1.16. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (MNG Hava Yolları).....	10
Çizelge 1.17. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (ACT Hava Yolları).....	10
Çizelge 1.18. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (ULS Hava Yolları)	11
Çizelge 2.1. Kullanılan Modellerin Genel Olarak Kıyaslanması.....	41
Çizelge 3.1. Airbus Uçak Tipi Genel Açıldan Kıyaslanması.....	46
Çizelge 3.2. Boeing Uçak Tipi Genel Açıldan Kıyaslanması	48
Çizelge 3.3. CORSIA ve TIER arasında yöntemlerin kıyaslaması.....	55
Çizelge 4.1. Uçak tipine göre emisyon faktörü (kg/ton).....	60
Çizelge 4.2. Airbus uçaklarının yakıt ve menzil verileri.	66
Çizelge 4.3. Boeing uçaklarının yakıt ve menzil bilgileri	66
Çizelge 4.4. Ortalama filo için seyir halinde kullanılan emisyon faktörleri	68
Çizelge 4.5. Uçak Tiplerine Tier 2 Metoduyla LTO İçin Hesaplanan Emisyon Parametreleri	71
Çizelge 4.6. Uçak Tiplerine Seyirde Açığa Çıkan Emisyon Parametreleri	74
Çizelge 4.7. CORSIA – CERT Boeing Uçak Modeli İçin Hesaplama Sonuçları.....	79
Çizelge 4.8. CORSIA – CERT Airbus Uçak Modeli İçin Hesaplama Sonuçları.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Şematik olarak havacılık emisyonlarının gösterimi	3
Şekil 1.2. LTO döngüsünde emisyonlar için ICAO sertifikasyon prosedürünün gösterimi	4
Şekil 1.3. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün 2023 faaliyet raporunda yer alan yıllara ve yapılan seferlere göre uçak trafiği grafiği	5
Şekil. 3.1. CORSIA metodlarının şematik gösterimi	57
Şekil 4.1. İç Hatlarda Kullanılan Uçak Tiplerinde Yıllık CO ₂ Emisyonu (LTO) Başına.....	63
Şekil 4.2. İç Hatlarda Kullanılan Uçak Tiplerinde Yıllık Yakıt Sarfıyatı (LTO) Başına.....	64
Şekil 4.3. Dar Gövde Uçaklarda LTO Başına Yıllık Emisyon Miktarları	65
Şekil 4.4. Uçak Tiplerine Göre Seyirde Yakıt Tüketimi	72
Şekil 4.5. Uçak Tiplerine Göre Yıllık CO ₂ Emisyonları	72
Şekil 4.6. Uçak Tiplerine Göre Seyir Safhasında Açığa Çıkan Emisyonlar	73
Şekil 4.7. LTO ve Seyir Aşamalarında Uçak Tiplerine göre Yakıt Tüketimi Kıyaslaması	74
Şekil 4.8. LTO ve Seyir safhalarında CO ₂ Emisyon Kıyaslaması.....	75
Şekil 4.9. LTO ve Seyir Safhasında Emisyonların Kıyaslanması	76
Şekil 4.10. CORSIA CERT Hesaplama Adımları.....	78
Şekil 4.11. CORSIA CERT Hesaplama Adımları.....	78
Şekil 4.12. CORSIA CERT Hesaplama Adımları.....	79
Şekil 4.13. CORSIA – CERT Metoduyla Yıllık Yakıt Tüketimi.....	81
Şekil 4.14. CORSIA – CERT Metoduyla Yıllık CO ₂ Emisyonu	81
Şekil 4.15. CORSIA ve TIER Modelleri Arasında Yıllık Yakıt Tüketimi Kıyaslaması.....	83
Şekil 4.16. CORSIA ve TIER Modelleri Arasında Yıllık CO ₂ Emisyonu Kıyaslaması	84
Şekil 5.1. Taxibot ile taksi yoluna getirilen KLM uçağı	91
Şekil 5.2. Taxibot ile taksi yapan KLM uçağı.....	91

SİMGELER, KISALTMALAR, TANIMLAR VE ÖLÇÜ BİRİMLERİ

ACARS	: Uçak İletişim Yönetme ve Raporlama Sistemi
AOC	: Havacılık işletme ruhsatı
APU	: Yardımcı Güç Ünitesi
AYH	: Alkali Yakıt Hücresi
AKREDİTASYON	: Bu Yönetmelikte öngörülen doğrulama faaliyetlerini gerçekleştirecek olan doğrulayıcı kuruluşun ulusal akreditasyon kuruluşu tarafından ulusal ve uluslararası kabul görmüş teknik kriterlere göre değerlendirilmesi, yeterliliğinin onaylanması ve düzenli aralıklarla denetlenmesi
Block On	: Takoz Koyma
Block Off	: Takoz Alma
CAEP	: Havacılık ve Çevresel Koruma Komitesi
CERT	: CO2 Tahmin ve Raporlama Aracı
CORSIA	: Uluslararası Havacılığa yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması
CORSIA Düşük karbonlu havacılık yakıtı	: Bu Talimat kapsamında CORSIA Sürdürülebilirlik Kriterlerini sağlayan fosil-bazlı havacılık yakıtı
CORSIA sürdürülebilir havacılık yakıtı	: Bu Talimat kapsamında CORSIA Sürdürülebilirlik Kriterlerini sağlayan yenilenebilir veya atıklardan üretilen havacılık yakıtı
CORSIA'ya uygun yakıtlar	: Uçak işleticisinin denkleştirme gerekliliklerini azaltmak için kullanabileceği CORSIA sürdürülebilir havacılık yakıtını veya CORSIA düşük karbonlu havacılık yakıtı
Devlet çifti	: Biri kalkış Akit Devleti veya toprakları diğeri de varış Akit Devleti veya toprakları olmak üzere iki Akit Devlet grubunu
Doğrulama ekibi	: Emisyon Raporlarının ve gerekli olduğu durumlarda, Emisyon Birimi İptal Raporlarının doğrulamasını gerçekleştiren, doğrulama kuruluşu bünyesinde hizmet veren, teknik uzmanlar tarafından desteklenebilen, bir grup doğrulama görevlisi veya ekip lideri olarak da nitelendirilen tek bir doğrulama görevlisi

Doğrulama kuruluşu	: Emisyon Raporlarının ve gerekli olduğu durumlarda, Emisyon Birimi İptal Raporlarının akredite edilmiş bağımsız bir üçüncü taraf olarak doğrulamasını gerçekleştiren tüzel kişi
Doğrulama raporu	: Doğrulama kuruluşu tarafından taslağı oluşturulan, doğrulama beyanını ve destekleyici nitelikteki gerekli bilgileri içeren belge
Dönüşüm süreci	: Ham maddelerin havacılık yakıtına dönüştürülmesi için yararlanılan bir teknoloji türü
Dönüşüm yolu	: Havacılık yakıtının üretimi için kullanılan, ham madde ve dönüşüm sürecinin belirli bir kombinasyonu
EEA	: European Environment Agency - Avrupa Çevre Ajansı
EMEP	: European Monitoring and Evaluation Programme - Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı
Emisyon birimi	: Kredilendirme programları ile çeşitli mekanizmalar, programlar ve projeler yoluyla, projelerin uygulanmasıyla elde edilen 1 metrik ton karbondioksit emisyon azaltımına eşit olan birimi
Emisyon	: Yakıt ve benzerlerinin yakılmasıyla atmosfere yayılan hava kirleticilerini
GHG	: Sera gazları
Green Airport	: Yeşil Havalimanı
Hava işletme ruhsatı (AOC)	: Bir işleticinin belirtilen ticari hava taşımacılığı faaliyetlerini gerçekleştirmesine imkân sağlayan ruhsatı
Havaalanı çifti	: Biri kalkış havaalanı diğeri de varış havaalanı olmak üzere iki havaalanı grubunu
Havaalanı	: Her türlü bir bina, tesisat ve teçhizat dâhil olmak üzere, tamamen veya kısmen hava araçlarının gelişi, kalkışı ve yüzey hareketi için kullanılması öngörülen, karada veya suda belirlenmiş bir alanı
IAF	: Uluslararası Akreditasyon Forumu
IATA	: Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
MRV	: İzleme, Raporlama ve Doğrulama
RTK	: Ücretli Ton Kilometre
Raporlama dönemi	: Belirli bir yıl içerisinde 1 Ocak tarihinde başlayarak 31 Aralık tarihinde sona eren ve bir uçak işleticisinin veya Genel Müdürlüğün gerekli bilgileri uçuş kalkış saatine (UTC) göre raporladığı dönemi

Raporun doğrulanması	: Emisyon raporlarının ve gerekli olduğu durumlarda, yeterli şekilde belgelendirilen uygun emisyon birimleri raporlarının iptalinin bağımsız ve sistematik değerlendirme süreci
ReFuelEU Aviation	: Avrupa'da Uçuşlar İçin Yeniden Yakıtlandırma: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları Girişimi
SAF	: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
SHGM	: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
Uçak	: Uçuş sırasında büyük ölçüde havanın, belirli uçuş koşullarında sabit kalmaya devam eden kaldırma yüzeylerine karşı gösterdiği dinamik reaksiyon ile desteklenen, havadan ağır motorlu hava aracını
Uçuş planı	: Bir hava aracının amaçlanan uçuşu ya da uçuşunun bir kısmı ile ilgili olarak hava trafik hizmetleri birimlerine sunulan belirli bilgileri
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
Yakıt ikmali	: Her uçuşa ilişkin yakıt teslim notlarında veya faturalarda belgelendiği üzere, yakıt tedarikçisi tarafından sağlanan yakıt ölçüsünü (litre cinsinden), ifade eder.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Havacılık, uçak kullanmayı hem bir bilim dalı hem de bir sanat olarak ele alan bir alandır. Bu terim, özellikle havadan ağır araçların uçabilmesiyle ilgilidir. İnsanoğlunun uçuş hayali, Wright kardeşlerin 17 Aralık 1903'te motorlu bir hava aracıyla başarılı bir uçuş gerçekleştirmelerinden binlerce yıl öncesine kadar uzanmaktadır. 1505 yılında, İtalyan sanatçı ve bilim insanı Leonardo da Vinci, insan uçuşu üzerine kapsamlı bir inceleme yaparak bilimsel bir eser yayımlamış ve bugünkü helikopterin temelini oluşturan çeşitli ayrıntılı uçan makine tasarımları geliştirmiştir. İlk başarılı sıcak hava balonları ise 1783 yılında Fransız mucit Montgolfier kardeşler tarafından geliştirilip uçurulmuştur. Ayrıca 1898 yılında Paris'te, ilk kez havadan hafif motorlu bir araçla uçuş gerçekleştirilmiştir. İki yıl sonra, Almanya'da Kont Ferdinand von Zeppelin tarafından geliştirilen büyük bir motorlu hava gemisi havalanmıştır.

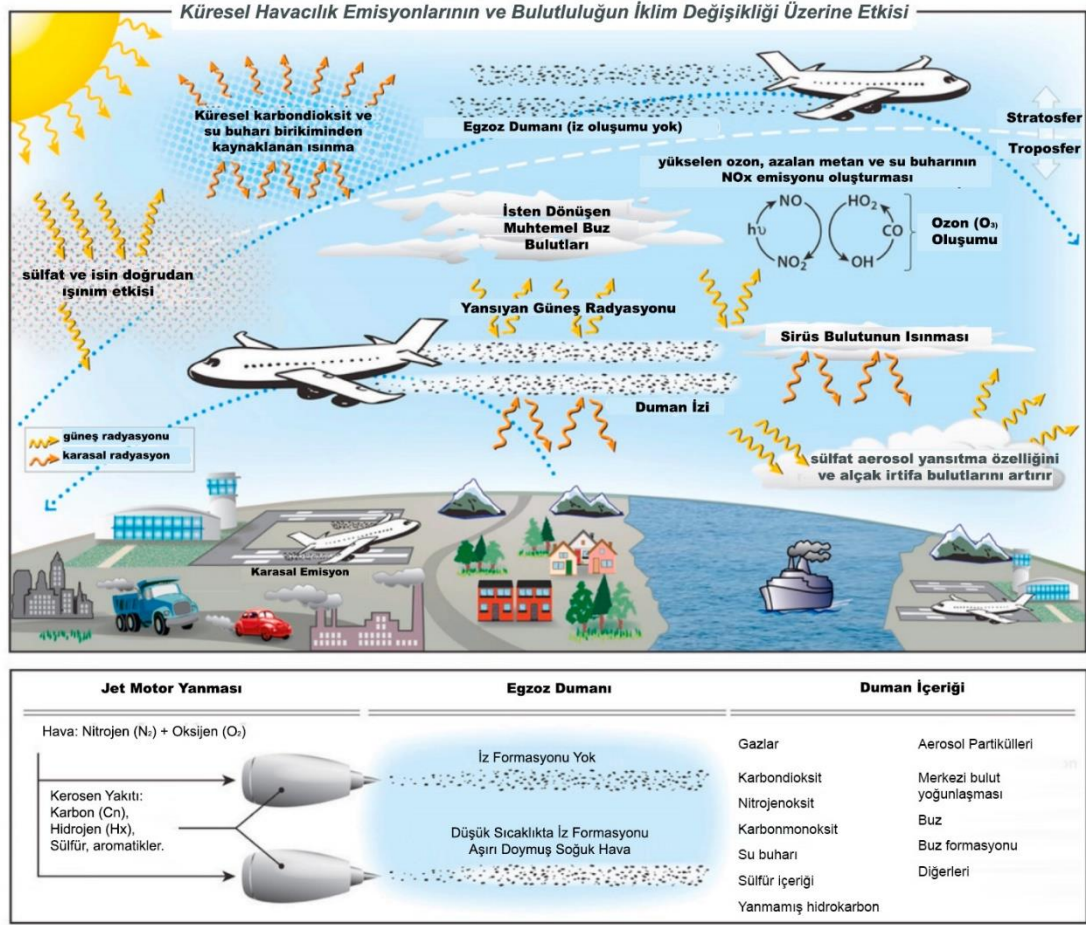
Wright kardeşler, havadan ağır motorlu araçlarıyla 12 saniyelik bir uçuş gerçekleştirerek 36,5 metre mesafe kat etmişlerdir. 1908 ile Birinci Dünya Savaşı'nın başladığı 1914 yılları arasında hız, irtifa ve havada kalış süresi gibi konularda başarılı test uçuşları yapılmıştır. O dönemde, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Almanya ve Fransa gibi ülkeler, geliştirdikleri hava filolarını savaşta kullanmışlardır. 1918 yılına gelindiğinde, uçakların tasarımı ve performansı önemli ölçüde ilerlemişti. 1919'da İngiliz Kraliyet Hava Kuvvetleri'ne bağlı bir ekip, ilk kez İngiltere ile Avustralya arasında kesintisiz bir uçuş gerçekleştirmiştir. 1930'ların başlarında, uçak yapımında kullanılan ağaç, kumaş ve kontrplak gibi malzemelerin yerini alüminyum almıştır. Bu gelişmelerin sonucunda, 1939 yılının sonlarında ABD'deki havayolu şirketleri yılda yaklaşık üç milyon yolcu taşımaya başlamış ve büyük şehirlere düzenli uçuşlar gerçekleştirmiştir (URL-1, 2024).

İnsan aktiviteleri sonucunda ortaya çıkan ve atmosfere salınan sera gazları, sanayi devriminden bu yana büyük ölçüde artmıştır. Sera gazları küresel ölçekte ısınmaya neden olmaktadır. Sera gazlarının antropojenik emisyonlarının küresel iklimi o kadar etkilemesi beklenmektedir ki, bu değişikliğin hali hazırda dünyanın çevresi ve ekonomik gelişimi için bir tehdit oluşturmaktadır (Houghton ve ark., 1990). Günümüzde bu tehdit birçok sektörde ve endüstriyel üretim anlamında strateji belirleyici etkiye olmaktadır ve ülkeler bu tehditlere karşı politikalar ve taahhütler belirlemektedir (Houghton ve ark., 1992).

1950'li yılların başlarından itibaren ticari uçak teknolojisinde yaşanan yenilikler, jet motorunun geliştirilmesiyle temsil edilmekte olup, uzun mesafeli şehirler arası ulaşımı köklü bir biçimde dönüştürmüştür. Bu gelişmeyle birlikte, 1950'lerin ortalarında Amerika Birleşik Devletleri'nde ticari hava yolu taşımacılığına olan talep demiryolunun önüne geçmiş, yaklaşık 1960 yılında ise otomobil kullanımını geride bırakarak şehirler arası yolcu taşımacılığında en önemli ulaşım hâline gelmiştir. Bu dönüşümde teknolojik gelişmelerin yanı sıra hükümetlerin havacılık altyapılarına yaptığı yatırımlar da etkili olmuştur (Schäfer ve ark., 2009). Benzer büyüme eğilimleri,

diğer sanayileşmiş ülkelerde ve bölgelerde de gözlemlenmektedir. Küresel gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) artışı ve insanların daha hızlı seyahat etme isteğiyle beslenen bu hızlı büyümenin önümüzdeki on yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. Airbus (2017) ve Boeing (2017) tarafından yapılan öngörülere göre, 2017'den 2036'ya kadar olan dönemde küresel hava yolu taşımacılığı talebi yıllık yaklaşık %4,5 oranında artış gösterecektir.

Ulaşım sektörü sera gazının oluşumunda önemli kaynaklardan birisidir. Dünya ekonomisi büyüdükçe ve teknoloji geliştikçe havacılık sektörü de hızlı bir şekilde gelişen endüstrilerden biri olmuştur dolayısıyla yolcu ve kargo taşımacılığının sürekli bir biçimde artması, hava yolu taşımacılığını tüm ulaştırma sınıfları içerisinde en hızlı büyüyen sektör haline getirmiştir (Kumaş ve ark., 2019). Global hava taşımacılığının ekonomik ve sosyal faydalarının olmasının yanı sıra bazı çevresel etkiler de oluşturmaktadır. Havacılık, sağladığı imkanlar ve yolculuklarda kaybedilen zamanın sahip olduğu teknolojiye kaynaklı çok daha düşük seviyelere indirgemesinden dolayı modern dünyadaki en önemli küresel ekonomik faaliyetlerden biridir. CO₂'nin havacılık emisyonları ve CO₂ dışı havacılık etkileri, iklim sisteminde değişikliklere neden olur (Şekil 1.1). Uçakların iniş/kalkış sayıları ve seyir aşamalarında harcadıkları yakıt sonucu oluşan sera gazları ile hava kirleticileri, iklim değişikliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu unsurların gelecekteki olumsuz etkilerini azaltmak, ancak uygun emisyon envanterleri ve ilgili teknoloji stratejileri sağlayarak mümkün olacaktır. Uçakların atmosfere saldırdığı en bilinen emisyon karbondioksittir. Bunun dışındaki emisyonlar ise azot oksit, karbon monoksit, kükürt oksit ile diğer gazlar ve partiküllerdir. Bu zararlı emisyonlar atmosfer ve yukarı troposfere etki etmektedir (K. Çağatan, 2011). Emisyonların çevreye etkisinin yanı sıra sağlık üzerinde de olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenlerle son yıllarda emisyon miktarlarının öğrenilmesi de önemli hale gelmiştir.



Şekil 1.1. Şematik olarak havacılık emisyonlarının gösterimi (D.S. Lee ve ark., 2020).

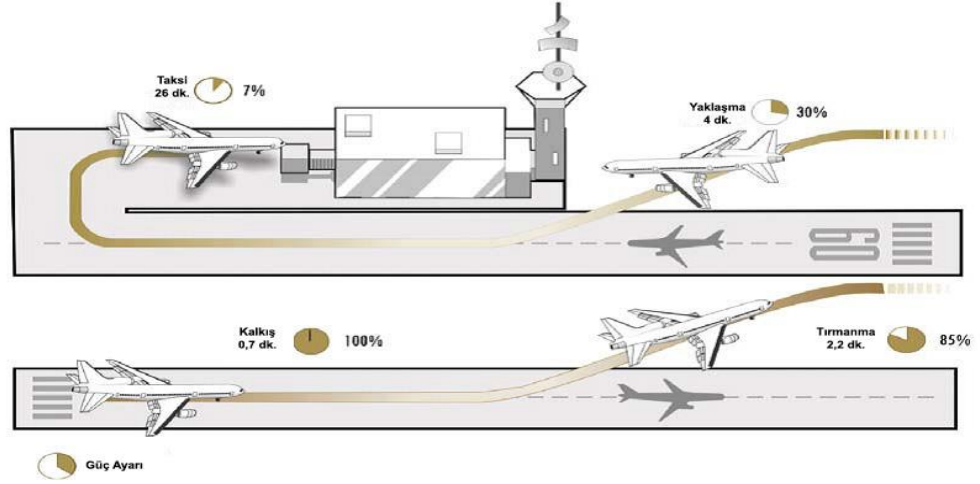
Uçak motorlarının neden olduğu iki temel emisyon problemi bulunmaktadır. İlk olarak, yerde manevra sırasında düşük güçle yüksek yanma verimi elde etmek amacıyla fazla miktarda yakıtın yakılması sonucu yüksek seviyelerde yanmamış hidrokarbonun atmosfere salınması ve bu emisyonun azaltılmasının gerekliliği öne çıkmaktadır. İkinci problem ise kalkış, tırmanış ve seyir sırasında uçaklardan yayılan nitrojen oksitlerdir. Bu sorunlara çözüm üretmek amacıyla, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından iniş/kalkış (LTO) döngüsü ve yüksek irtifadaki seyir için belirli standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar, havalimanları çevresindeki hava kirliliğini azaltmayı ve atmosferdeki ozon tabakasında meydana gelebilecek deformasyonları kontrol altına almayı hedeflemektedir (İ. Ünal ve diğerleri, 2014).

Literatürde iniş/kalkış (LTO), 1000 m (3000 feet) altında hava meydanı civarlarında gerçekleşen bütün motor çalışır konumdaki, bekleme, yolcu indirme ve bindirme, tırmanma ve iniş faaliyetlerini kapsamaktadır (Özdemir, G 2013).

ICAO; LTO döngüsü dört mod içerir;

- Kalkış (T/O): 0,7 dk boyunca %100 takat ile itme kuvveti.
- Tırmanma (Climb): 2,2 dk boyunca %85 takat ile.

- Yaklaşma (Approach): 4,0 dk boyunca %30 takat ile.
- Taksi (Taxi): 26 dk boyunca %7 takat ile.



Şekil 1.2. LTO döngüsünde emisyonlar için ICAO sertifikasyon prosedürünün gösterimi (ICAO, 2013).

Uçak aktiviteleri LTO ile seyir olarak iki kısımdan meydana gelir. 1000 metrenin altındaki aktiviteler LTO aşamasında gerçekleşir. Bu aktiviteler, kalkış, tırmanış, yaklaşma ve pistte ilerleme aşamalarından oluşur. Seyir olarak adlandırılan ikinci kısım ise 1000 metrenin üzerindeki tüm aktiviteler ile tırmanış sırasının sonundan iniş aşamasına kadar ki aktiviteleri içermektedir. LTO döngüsü Şekil 1.2’de verilmiştir (K Özgünoğlu, 2017).

Temelde emisyonların planlanabilmesi için uçağın motor çalıştırdıktan sonra operasyonu gerçekleştirip motor susturana kadar bütün adımların incelenmesi hedeflenmektedir. Bu adımlar motor çalıştırma sonrası taksi, pist başında koşturmaya başladıktan sonra hedeflenen irtifaya kadar tırmanış, tırmanış bittikten sonra seyrüsefer boyunca geçen zaman, hedeflenen noktaya varmak için alçalış ve yaklaşma, son olarak piste teker koyduktan sonra taksi ile hedeflenen park alanına gidiş şeklindedir.

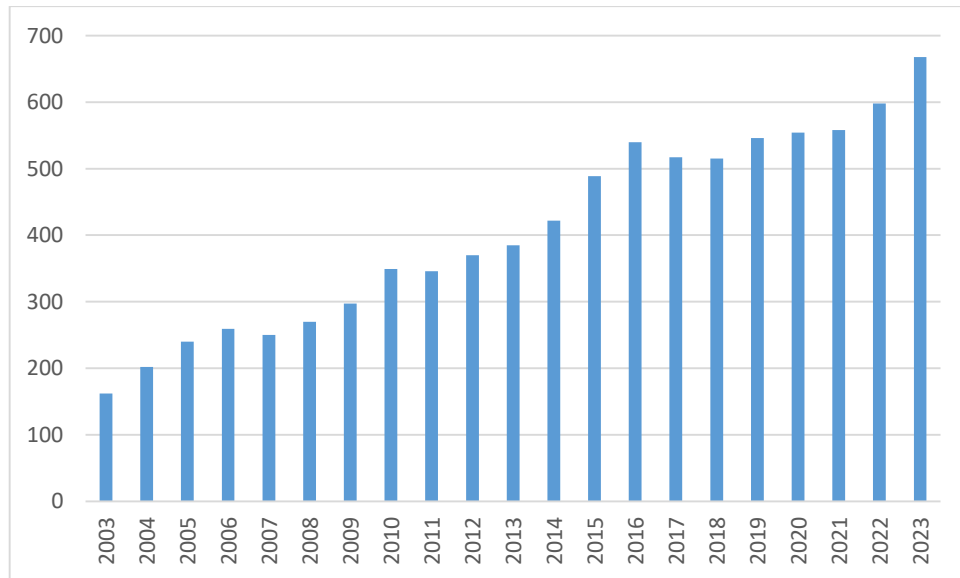
Uçak işleticileri tarafından karbon emisyonlarının raporlanmasında kullanılan başlıca üç düzenleyici sistem bulunmaktadır: ICAO’nun CORSIA çerçevesinde geliştirdiği ve Annex 16 Volume IV’te tanımlanan küresel sistem, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) ve Birleşik Krallık’ın AB’den ayrılmasının ardından oluşturduğu UK Emisyon Ticaret Sistemi (UK ETS). UK ETS, büyük ölçüde CORSIA ve EU ETS ile benzer yönetsel temellere dayansa da, Birleşik Krallık’ın kendi ulusal yargı yetkisi altında bağımsız bir sistem olarak yapılandırılmıştır. Bu bağlamda, teknik anlamda CORSIA ile önemli ölçüde örtüşmesine rağmen, farklı bir düzenleyici yapı altında uygulanmaktadır. Günümüzde geçerli olan bu üçlü yapı, ilk olarak AB ETS kapsamında geliştirilen metodolojik temellere dayandırılmış, sonrasında ICAO’nun küresel uygulamalarıyla çeşitlendirilmiştir. Tez kapsamında ise, bu sistemler arasında yer alan CORSIA ile IPCC tarafından

önerilen Tier tabanlı metodoloji, karşılaştırmalı olarak ele alınmakta ve uygulama düzeyinde detaylı biçimde incelenmektedir.

Türkiye’de havayolu taşımacılığı 1933 yılında iç hat uçuşlarıyla başlamış ve 1947 yılında Ankara-İstanbul-Atina rotasında gerçekleşen uçuşla ilk uluslararası seferini gerçekleştirmiştir. 1983 yılında Sivil Havacılık Kanununda yapılan düzenleme ile özel sektörün havayolu, havalimanı ve yer hizmetleri işletmeciliği yapmasına izin verilmiş ve bu değişiklik Türk hava taşımacılığının hızlı bir gelişim göstermesini sağlamıştır. 2003 yılında Ulaştırma Bakanlığı (şu anki adıyla Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı), özel havayolu işletmelerine iç hatlarda serbest güzergah seçme hakkı tanımış ve bunun sonucunda birçok özel havayolu şirketi filolarını yeni uçaklarla genişletmiştir (Oktal ve Küçükönel, 2007).

Havayolu şirketleri her yıl uçak alımlarını, üreticilerin sunduğu satış sonrası garanti, bakım hizmetleri, ödeme kolaylıkları ve ülkeler arasındaki ticari ilişkileri göz önünde bulundurarak gerçekleştirmektedir. SHGM’nin 2022 faaliyet raporunda, yıllar ve uçuş sayıları bazında uçak trafiğindeki artış gözlemlenmektedir (Şekil 1.3, SGHM, 2022). Ayrıca THY’nin yolcu sayılarındaki artışı gösteren verilere bakıldığında, pandemi dönemi ve öncesinde yaşanan Boeing 737 Max serisi problemleri dışında, sürekli bir büyüme trendi dikkat çekmektedir (Şekil 3). Bununla birlikte, uçak trafiğinin artışı yakıt tüketimini de artırmakta ve dolayısıyla atmosfere daha fazla kirletici salınımına neden olmaktadır. Artan yakıt tüketiminin atmosfer üzerindeki yükü artıracak göz önüne alındığında, yeni uçak alımlarında çevresel etkilerin de değerlendirilmesi gereken önemli bir parametre olduğu vurgulanmalıdır (Altuntaş ve Karakoç, 2011).

2023 yılsonu itibarıyla 668 uçak, 207 hava taksi, 524 genel havacılık, 431 balon ve 26 çok hafif hava aracı olmak üzere toplam 1.856 hava aracı bulunmaktadır.



Şekil 1.3. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü’nün 2023 faaliyet raporunda yer alan yıllara ve yapılan seferlere göre uçak trafiği grafiği (SHGM, 2023).

Uçaklar, yer yüzeyinden 9 ila 13 kilometre yükseklikte, üst troposfer ve alt stratosfer olarak adlandırılan atmosfer katmanlarında seyir yapmaktadır. Havacılık kaynaklı emisyonları etkileyen başlıca faktörler şunlardır: uçak operasyonlarının yoğunluğu ve büyüklüğü, belirli kirletici türleri, bu kirleticilerin mekansal dağılım ve konsantrasyonları, yakıt tüketimi, enerji verimliliği ve uçak filosunun yenilenme oranı (Pham ve diğerleri, 2010).

Uçakların faaliyet türüne göre emisyon kaynakları iki başlık altında incelenebilir: LTO döngüsüne bağlı emisyonlar ve seyir sırasında ortaya çıkan emisyonlar. HC ve CO dışındaki uçak emisyonlarının yalnızca %10'u, havalimanlarında gerçekleşen yer hareketlerinden ve LTO döngüsünden kaynaklanırken, kalan %90'luk emisyon daha yüksek irtifalarda salınmaktadır. Ancak HC ve CO emisyonlarının %30'u daha düşük irtifalarda, %70'i ise yüksek irtifalarda oluşmaktadır (Maurice ve diğerleri, 2006).

1.2. Karbon Yönetimi Açısından Havacılık Endüstrisinin Rakamsal Verileri ve Yoğunluğu

Bu tez kapsamında, sektör olarak çok yoğun şekilde ve yüksek rakamlarda taşınan yolcu/kargo'ların istatistiksel olarak detaylarını gözler önüne sermek ve bu anlamda veri oluşturmak hedeflenmektedir. 2023 yılsonu itibarıyla, toplam yolcu sayısı 214 milyonu aşmıştır. İç hat yolcu sayısı önceki yıla göre %16; dış hat yolcu sayısı ise %19 artmıştır. 2003 yılından itibaren gerçekleşen yolcu sayıları Çizelge 1.1'de yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Yolcu trafiği (SHGM,2023)

Yolcu Trafiği	2003	2022	2023	2022-2023 değişim
İç Hat	9.147.439	78.323.824	91.055.014	16%
Dış Hat	25.296.216	103.465.515	122.950.966	19%
Transit	0	436.192	227.005	-48%
Toplam	34.443.655	182.225.531	214.232.985	18%

2023 yılsonu itibarıyla toplam uçak trafiği 2 milyon seviyesine ulaşmıştır. İç hat uçak trafiği bir önceki yıla göre %10, dış hat uçak trafiği %16 ve transit uçak trafiği %22 oranında artış göstermiştir. 2003 yılından itibaren gerçekleşen uçak trafiğine ilişkin detaylar Çizelge 1.2'de verilmiştir. Aynı dönemde toplam yük trafiği 4 milyon ton olarak kaydedilmiştir. İç hat yük trafiği %9 oranında artarken, dış hat yük trafiği %1 oranında azalmıştır. 2003 yılından itibaren gerçekleşen yük trafiği verileri Çizelge 1.3'te yer almaktadır.

Çizelge 1.2. Uçak trafiği (SHGM,2023)

Uçuş Trafiği	2003	2022	2023	2022-2023 değişim
İç Hat	156.000	786.150	868.467	10%
Dış Hat	218.405	702.476	813.328	16%
Transit	154.218	396.899	485.224	22%
Toplam	529.205	1.885.525	2.167.019	15%

(*) Transit (Overflight=Üst Geçiş): Türk Hava Sahasına giriş ile başlayan çıkış ile biten üst geçiş hareketidir.

Çizelge 1.3. Yük trafiği (SHGM,2023)

Yük Trafiği	2003	2022	2023	2022-2023 değişim
İç Hat	188.979	784.022	853.622	9%
Dış Hat	775.101	3.379.120	3.357.885	-1%
Toplam	964.080	4.163.142	4.211.507	1%

Türkiye'nin sivil havacılık sektöründe yolcu ve kargo taşımacılığı yapan toplam 13 havayolu şirketi bulunmaktadır (Çizelge 1.4-1.18). Havayolu filosunda yer alan uçak sayısı 2022 yılında 598 iken, 2023 yılında 668'e yükselmiştir. Bu uçakların 634'ü yolcu taşımacılığı için, 34'ü ise kargo taşımacılığı için kullanılmaktadır. Filodaki uçakların toplam koltuk kapasitesi 130.196, kargo uçaklarının toplam yük kapasitesi ise 2.513.875 kg'dır.

Çizelge 1.4. Uçak Sayısı (SHGM,2023)

Uçak Sayısı	2003	2022	2023	2022-2023 değişim
	162	598	668	312%

Çizelge 1.5. Havayolu Şirketleri Uçak Sayısı (SHGM,2023)

Havayolu Şirketleri Uçak Sayısı	2022	2023
THY A.O	381	420
Pegasus Hava Taşımacılık A.Ş.	96	109
Güneş Ekspres Havacılık A.Ş.	62	62
Turistik Hava Taşımacılık A.Ş.	20	19
Cortex Havacılık ve Turizm Ticaret A.Ş.	3	12
Hürkuş Hava Yolu Taşımacılık ve Ticaret A.Ş.	10	10
MNG Hava Yolları ve Taşımacılık A.Ş.	7	8
Tailwind Havayolları A.Ş.	5	7
BBN Hava Yolları ve Taşımacılık A.Ş.	0	6
Mavi Gök Havacılık A.Ş.	4	5

(Çizelge 1.5'in devamı)

ACT Hava Yolları A.Ş.	5	4
ULS Havayolları Kargo Taşımacılık A.Ş.	3	3
Air Anka Hava Yolları A.Ş.	2	3
Toplam	598	668
Koltuk Kapasitesi	113.054	130.196

Çizelge 1.6. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Türk Hava Yolları) (SHGM,2023)

THY A.O	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 402 Adet Toplam Koltuk Kapasitesi: 83.301 Kargo Uçağı Sayısı: 18 Adet Toplam Kargo Kapasitesi: 1.506.000 kg
	A319	6	864	
	A320	21	3339	
	A321	121	23601	
	A330	49	12250	
	A350	16	5264	
	B737-800	85	13681	
	B737-MAX 8	27	4077	
	B737-MAX 9	5	755	
	B737-900ER	15	2265	
	B777-300ER	35	10605	
	B787-9	22	6600	
	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Kargo Kapasitesi	
	A330-F	10	690.000	
	B777-F	8	816.000	

Çizelge 1.7. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Pegasus) (SHGM,2023)

Pegasus Hava Taşımacılığı A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 109 Adet
	A320	52	9048	Toplam Koltuk Kapasitesi: 21.871
	A321	41	9799	
	B737-800	16	3024	

Çizelge 1.8. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Güneş Ekspres) (SHGM,2023)

Güneş Ekspres Havacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 62 Adet
	B737-800	50	9450	Toplam Koltuk Kapasitesi: 11.718
	B737-MAX 8	12	2268	

Çizelge 1.9. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Turistik Hava Taşımacılık) (SHGM,2023)

Turistik Hava Taşımacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 19 Adet
	B737-800	12	2268	Toplam Koltuk Kapasitesi: 3.591
	B737-MAX 8	7	1323	

Çizelge 1.10. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Cortex Havacılık) (SHGM,2023)

Cortex Havacılık ve Turizm Ticaret A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 12 Adet
	A321	3	700	Toplam Koltuk Kapasitesi: 3.963
	A330	2	624	
	B777-300ER	4	2072	
	B737-MAX8	3	567	

Çizelge 1.11. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Hürkuş Hava Yolu Taşımacılık) (SHGM,2023)

Hürkuş Hava Yolu Taşımacılık ve Ticaret A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 10 Adet
	A320	10	1800	Toplam Koltuk Kapasitesi: 1800

Çizelge 1.12. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Tailwind Havayolları) (SHGM,2023)

Tailwind Havayolları A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 7 Adet
	B737-400	5	840	Toplam Koltuk Kapasitesi: 1.218
	B737-800	2	378	

Çizelge 1.13. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (BBN Hava Yolları) (SHGM,2023)

BBN Hava Yolları ve Taşımacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 5 Adet
	A321	4	876	Toplam Koltuk Kapasitesi: 1.056
	A320	1	180	
	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Kargo Kapasitesi	Kargo Uçağı Sayısı: 1 Adet
	A321-F	1	27000	Toplam Kargo Kapasitesi: 27.000 kg

Çizelge 1.14. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Mavi Gök Havacılık) (SHGM,2023)

Mavi Gök Havacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 5 Adet
	B737-800	2	378	Toplam Koltuk Kapasitesi: 1.019
	B737-900ER	2	302	
	B777-300ER	1	339	

Çizelge 1.15. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (Air Anka Havacılık) (SHGM,2023)

Air Anka Hava Yolları A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam Koltuk Kapasitesi	Yolcu Uçağı Sayısı: 3 Adet
	A320	2	515	Toplam Koltuk Kapasitesi: 659
	A319	1	144	

Çizelge 1.16. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (MNG Hava Yolları) (SHGM,2023)

MNG Hava Yolları ve Taşımacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam kargo Kapasitesi	Kargo Uçağı Sayısı: 8 Adet
	A300	3	141000	Toplam Kargo Kapasitesi: 405.000 kg
	A330-F	3	210000	
	A321-F	2	54000	

Çizelge 1.17. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (ACT Hava Yolları) (SHGM,2023)

ACT Hava Yolları A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam kargo Kapasitesi	Kargo Uçağı Sayısı: 4 Adet
	B747-400	4	454300	Toplam Kargo Kapasitesi:454300 kg

Çizelge 1.18. Havayolu Şirketlerine Göre Uçak Filosu Detayları (ULS Hava Yolları) (SHGM,2023)

ULS Havayolları Kargo Taşımacılık A.Ş.	Uçak Cinsi	Miktar	Toplam kargo Kapasitesi	Kargo Uçağı Sayısı: 3 Adet Toplam Kargo Kapasitesi:121575 kg
	A310-F	3	121575	

Bu tez kapsamında, karbon ayak izi Türkiye iç hat uçuşları için uçuş hattında açığa çıkan karbon emisyonlarının yönetilmesi ve ortaya konması amaçlanmaktadır. Hesaplama uçak tipine ve uçuş sürelerine bağlı verilerden hesaplanacaktır. Emisyon ölçümü için başta ICAO olmak üzere farklı ölçüm teknikleri ile hesaplanıp kıyaslanması amaçlanmaktadır.

1.3. Türkiye’de Havacılık Endüstrisi Kaynaklı Salımlar

Türkiye’de sivil havacılığın düzenleyici ve denetleyici kurumu olan Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM), havacılık faaliyetlerinin çevresel etkilerini azaltmak ve sektörde sürdürülebilirlik ilkelerini hayata geçirmek amacıyla çeşitli stratejik adımlar atmaktadır. Bu bağlamda, SHGM’nin gerçekleştirdiği çalışmalar, uluslararası düzenlemelere uyumun sağlanması, çevre dostu teknolojilerin teşvik edilmesi ve karbon emisyonlarının izlenmesi gibi çok boyutlu bir perspektifle ele alınmaktadır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı (CORSIA) çerçevesinde SHGM, Türkiye’nin yükümlülüklerini yerine getirmesi için gerekli idari ve teknik altyapıyı oluşturmuştur. Bu kapsamda, Türkiye’de faaliyet gösteren havayolu şirketlerinin yıllık karbon emisyonlarının raporlanması, doğrulanması ve izlenmesi süreçleri SHGM koordinasyonunda yürütülmektedir (SHGM, 2022). SHGM, ayrıca CORSIA kapsamında sertifikalı karbon denkleştirme mekanizmalarının kullanımına ilişkin rehber dokümanlar hazırlamış ve sektöre yönelik bilgilendirme toplantıları gerçekleştirmiştir.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), 39. Genel Kurulunda, küresel hava taşımacılığı sektöründe emisyonların azaltılmasına yönelik önemli bir anlaşma üzerinde mutabakata varmıştır. Bu anlaşma, Uluslararası Havacılık İçin Karbon Telafi ve Azaltım Planı (CORSIA) adıyla bilinir. CORSIA’nın ana amacı, havacılık sektöründen kaynaklanan zararlı gaz emisyonlarını azaltmak ve çevreye daha az zarar veren bir havacılık sektörü yaratmaktır. Bu doğrultuda, temiz teknolojiye yatırım yapılması, çevre dostu yakıtların kullanımının artırılması ve orman alanlarının genişletilmesi gibi hedefler belirlenmiştir. Ayrıca, CORSIA’nın bir diğer hedefi de 2020 sonrasında hava taşımacılığında kaynaklanacak emisyon artışlarını engellemektir. Bunun için uçak operatörlerinden, emisyon artışına karşılık karbon salınımlarını telafi etmek amacıyla belirli emisyon birimleri alması talep edilmektedir (ICAO, 2017).

Ancak CORSIA anlaşması hemen uygulamaya konulmayacaktır. Ülkelerin ekonomik ve çevresel durumları dikkate alınarak, plan aşamalı bir şekilde devreye girecektir. 2021 ile 2026 yılları arasında, CORSIA yalnızca gönüllü katılım sağlayan ülkeler için geçerli olacaktır. 2026 yılından itibaren ise, gelişmiş ülkeler ve küçük ada devletleri hariç, uygulama zorunlu hale gelecektir. Bu, özellikle havacılık sektörünün küresel çapta yaygın olduğu ve birçok ülkenin hava taşımacılığından etkilendiği dikkate alındığında, büyük bir adım olarak değerlendirilmektedir. CORSIA, sektördeki çevresel etkilerin azaltılması amacıyla önemli bir araç olacaktır (ICAO, 2017).

Havacılık sektörü, küresel ölçekte sera gazları salarak çevresel dışsallıklara yol açan bir sektör olma özelliği taşır. Bu nedenle, sektördeki emisyonları tek bir merkezi oluşumun denetlemesi büyük önem arz etmektedir. Eğer her ülke kendi başına vergi, fiyatlandırma ve teşvik politikalarını uygularsa, bu durum sektördeki etkinliği zayıflatabilir ve küresel çapta karışıklığa yol açabilir. Bu noktada, CORSIA'nın hayata geçirilmesi, sektördeki emisyonları izleyen ve denetleyen tek bir çatı altında birleştirilen bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, ICAO'nun hedeflerinden biri de, 2020 yılında oluşan emisyon miktarlarının 2035 yılına kadar %80 oranında azaltılmasıdır. Bu hedefin gerçekleştirilmesi, hem küresel ısınma ile mücadele hem de havacılık sektörünün çevreye olan etkilerini azaltma konusunda büyük bir adım olacaktır (ICAO, 2017).

CORSIA'nın uygulanması, uçakların emisyon salınımlarını azaltmaya yönelik bir dizi politika ve strateji geliştirecek olsa da, ilk aşama gönüllü katılım ile 2021-2023 yılları arasında başlayacak ve 2024-2026 yıllarında bu sürecin ilk aşaması, gönüllü katılımı uygulanmaya devam edecektir. 2027 yılı itibarıyla ise zorunlu uygulama dönemi başlayacaktır. Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 66 ülke, 12 Ekim 2016 tarihinde, bu sürece gönüllü olarak katılacaklarını taahhüt etmiştir (ICAO, 2017).

Küresel ölçekte havacılık sektörü, toplam sera gazı emisyonlarının %2'sini ve karbondioksit emisyonlarının %1,3'ünü oluşturmakta olup, bu emisyonların azaltılması için yapılan çalışmalar, sektörde önemli maliyetler doğuracaktır. Yapılacak iyileştirme çalışmalarının maliyeti, tahminlere göre 5,3 ile 23,9 milyar dolar arasında bir aralıkta değişecektir. Bu çalışmalar, sektördeki çevresel etkinin azaltılmasında önemli bir adım olsa da, maliyetlerin yönetilmesi de büyük bir öneme sahiptir. CORSIA'nın sadece yurt dışı uçuşlarını kapsayacak şekilde 2035 yılına kadar süreceği öngörülmektedir (ICAO, 2017).

SHGM, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımının artırılmasına yönelik olarak özel sektörle iş birliği içinde çeşitli projeleri desteklemektedir. Bu bağlamda, biyo yakıtların ve diğer alternatif enerji kaynaklarının sivil havacılıkta kullanımı ile ilgili teknik değerlendirme ve mevzuat uyumu süreçleri devam etmektedir (SHGM, 2023). Avrupa Birliği'nin ReFuelEU Aviation girişimi doğrultusunda, Türkiye'nin de bu sürece entegre olmasına yönelik analizler yapılmaktadır.

SHGM, Türkiye'deki sivil havacılık faaliyetlerine ilişkin karbon emisyonlarını daha etkin izlemek amacıyla Ulusal Emisyon İzleme ve Raporlama Sistemini geliştirmiştir. Bu sistem sayesinde, havayolu işletmelerinin faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon verileri merkezi olarak

toplanmakta ve analiz edilmektedir. Böylece, ulusal düzeyde daha şeffaf ve hesap verebilir bir çevresel raporlama mekanizması sağlanmaktadır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022).

SHGM, havalimanlarında çevre dostu uygulamaların yaygınlaştırılması amacıyla Yeşil Havalimanı (Green Airport) projesini yürürlüğe koymuştur. Bu proje kapsamında, atık yönetimi, enerji verimliliği, gürültü kontrolü ve karbon ayak izinin azaltılması gibi başlıklarda belirli kriterleri sağlayan havalimanlarına “Yeşil Havalimanı Sertifikası” verilmektedir. İstanbul Havalimanı ve Ankara Esenboğa Havalimanı bu sertifikayı alan ilk örnekler arasındadır (SHGM, 2021).

SHGM, ICAO ve Avrupa Sivil Havacılık Konferansı (ECAC) başta olmak üzere birçok uluslararası kuruluşla iş birliği içinde çalışmaktadır. Bu kapsamda, ICAO’nun 2050 yılı net sıfır karbon hedefi doğrultusunda, ulusal havacılık iklim stratejisinin oluşturulması sürecinde aktif rol oynamaktadır. Ayrıca, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve küresel karbon piyasalarıyla ilgili gelişmeler de SHGM’nin politika gündeminde yer almaktadır (ICAO, 2023).

Karbon ayak izi hesabı ve raporunun, ICAO Ek – 16 kapsamında ISO 14064 Sera Gazı Hesaplama Standardı hükümleri çerçevesinde bağımsız olarak doğrulanması gerekmektedir (ICAO, 2017). Havalimanı Karbon Akreditasyonu tarafından kullanılan emisyonların ayak izleri tanımları sürdürülebilir kalkınma için ICAO hesaplama ve raporlama standardı ilkeleri doğrultusunda belirlenmektedir.

Havacılık emisyonlarına yönelik küresel endişeler, uluslararası düzeyde politika yapımını etkilemiş ve havacılık endüstrisini çevresel sürdürülebilirlik hedefleri belirlemeye teşvik etmiştir. Uluslararası Havacılık Örgütü (ICAO) gibi kuruluşlar, havacılık emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejiler ve yöntemler geliştirmiştir. Bu stratejiler arasında daha yakıt verimli uçak teknolojilerinin teşvik edilmesi, alternatif yakıtların kullanımı, hava trafik yönetimi iyileştirmeleri ve karbon emisyonlarını telafi etme mekanizmaları bulunmaktadır.

Bu tez, havacılık sektörünün çevresel etkilerini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmek ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik stratejik politika önerileri sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) sertifikasyon sistemi ile ICAO’nun Tier 2 metodolojisi kullanılarak havacılık kaynaklı karbon emisyonları hesaplanmış, her iki yöntemin çıktıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, yöntemler arasında oluşan yapısal ve nicel farklılıklar detaylı biçimde tartışılmış, bu bağlamda havacılık emisyonlarının daha doğru, izlenebilir ve kıyaslanabilir biçimde hesaplanmasına yönelik yöntemsel iyileştirme önerileri sunulmuştur. Çalışma, sürdürülebilir bir havacılık endüstrisi inşa edebilmek için karar vericilere ve politika yapıcılara bilimsel veri temelli katkı sağlamayı amaçlamaktadır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Genel Literatür Özeti

Journal of Aerospace Science and Management (2024) tarafından yayımlanan güncel bir çalışmada, sürdürülebilir havacılık konusu detaylı bir biçimde ele alınmakta; bu bağlamda havacılık sektöründe enerji kullanımının mevcut durumu teknik ve çevresel açılardan değerlendirilmektedir. Çalışmada, havacılık endüstrisinin küresel sera gazı emisyonlarına olan katkısı göz önünde bulundurularak, sektörün iklim değişikliği ile mücadelesinde üstlendiği rol vurgulanmaktadır. Bu çerçevede sürdürülebilir havacılık, çevresel etkilerin en aza indirilmesini amaçlayan bir yaklaşım olarak tanımlanmakta olup; özellikle alternatif, düşük karbonlu yakıtların geliştirilmesi ve kullanılması ile enerji verimliliğini artırmaya yönelik yeni teknolojilerin entegrasyonuna dayandığı ifade edilmektedir. Sürdürülebilir havacılık uygulamaları, hem çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına hem de havacılık sektörünün uzun vadeli büyüme stratejilerine katkı sunmayı hedeflemektedir (Wolfgang, 2023).

Alternatif yakıtları ve bu yakıtların uygunluğunu etkileyen temel faktörler araştırılmıştır, sürdürülebilir havacılığın geleceği ile ilgili yaklaşımları karşılaştırmalı bir analizle özetlenmiştir. Çalışmanın girişinde öncelikle 2005 yılında imzalanan Kyoto Protokolü doğrultusunda belirlenen başlıca altı farklı sera gazı tanımlanmıştır ve havacılık kaynaklı sera gazlarının bu gruptaki rolü gösterilmiştir. Uçuşlar sırasında CO₂, NO_x, partikül madde (kurum/is), su buharı gibi sera gazları ve diğer emisyonları salınır. Uçaklardan kaynaklanan CO₂ emisyonları, yakıtın doğrudan yanması sonucunda ortaya çıkar. CO₂, emisyonların yaklaşık %70'ini oluştururken, su buharı geri kalan %30'luk dilimin önemli bir kısmını oluşturur. Yakılan yakıt miktarının azaltılması, salınan CO₂ miktarının azalmasına doğrudan neden olur. Uçak motorları ayrıca çevresel etkisi olan diğer kirleticileri de atmosfere salarlar (Mrazova, 2014).

Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının araştırılması, hava taşımacılığının çevresel etkisini ve toplam CO₂ ayak izini azaltma hedefi, Airbus ve Boeing gibi pek çok uçak üreticisinin ana prensibi haline gelmiştir. Çalışmaya göre, 2050'ye kadar, havacılığın küresel karbon emisyonlarındaki payının şu anki %2,46'lık payından %3'e yükselmesi ve toplam sera gazı emisyonlarının %5'ini oluşturması öngörülmüyor. IPCC verilerine göre, havacılığın küresel CO₂ emisyonları 2000 yılında yaklaşık 480 milyon ton civarındaydı (GAO, 2009). Son IPCC raporuna göre, taşımacılık sektörü 2010'da küresel CO₂ doğrudan 26 emisyonlarının %2,7'sini oluşturdu ve temel CO₂ emisyonlarının 2050'ye kadar yaklaşık iki katına çıkacağı tahmin ediliyor (Abdullah ve ark., 2016).

Çevre Koruma (2023), uçakların motorlarından kaynaklanan karbondioksit, nitrojen oksit ve su buharı gibi zararlı emisyonların, iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ifade etmektedir. Uçuş sırasında geride bırakılan ve atmosferde ince beyaz çizgiler şeklinde görülen havacılık kontrailerinin azaltılması ise sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, Google Research, American Airlines ve Breakthrough Energy iş

birliği yaparak, uçuşların iklim üzerindeki olumsuz etkilerini yapay zeka kullanımıyla ölçmeye yönelik önemli bir projeye imza atmıştır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) üyesi havayolu şirketleri ise 2021 yılında karbon emisyonlarını 2050 yılına kadar net sıfır seviyesine indirme taahhüdünde bulunmuştur. IATA, bu taahhüdün, hava taşımacılığının Paris Anlaşması'nın küresel sıcaklık artışını 2 santigrat derecenin altında tutma hedefine uyumlu hale gelmesini sağlayacağını belirtmektedir.

Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) tarafından desteklenen Çevreciyiz platformunun 2023 yılında gerçekleştirdiği çalışmaya göre, NASA ve Boeing, uçakların emisyonlarını azaltmak amacıyla havacılık alanındaki uzmanlıklarını birleştirdiğini Ocak 2023'te duyurmuştur. Bu iş birliğinin temel hedefi, daha verimli uçak tasarımları geliştirmek ve uçuşların iklim değişikliği üzerindeki etkilerini en aza indirmektir. Boeing tarafından yapılan açıklamada, NASA'nın Kiriş Destekli Transonik Kanat (TTBW) tasarımına sahip tam ölçekli bir test uçağının geliştirilmesi ve uçuş testlerinin gerçekleştirilmesi için Boeing'i seçtiği belirtilmiştir. Bu çalışmalar, Sürdürülebilir Uçuş Test Aracı (SFD) programı kapsamında yürütölmektedir ve bu program aracılığıyla test edilen teknolojilerin, gelecekteki uçak tasarımlarını şekillendirmenin yanı sıra aerodinamik ve yakıt verimliliğinde önemli gelişmeler sağlayacağı vurgulanmıştır. Ayrıca, tek koridorlu bir uçağın, mevcut en verimli tek koridorlu uçaklara kıyasla yakıt tüketimini ve emisyonları görevine bağlı olarak %30'a kadar azaltabileceği bilgisi paylaşılmıştır.

Pegasus Hava Yolları (2023), Norveç merkezli iklim teknolojisi şirketi CHOOOSE ile iş birliği yaparak, misafirlerine uçuşlarından kaynaklanan karbon emisyonlarını dengeleme imkânı sunan yeni bir iklim programını hayata geçirmiştir. Bu kapsamda, Pegasus Hava Yolları'nın internet sitesi üzerinden bilet alan yolcular, biletleme teyit sayfasında sunulan bağlantı aracılığıyla CHOOOSE tarafından geliştirilen bir hesaplama aracı sayesinde uçuşlarının karbon emisyon etkisini ölçebilmektedir. Yolcular, bu hesaplama aracıyla doğrulanmış iklim çözümlerine destek olarak uçuş kaynaklı emisyonlarını dengeleme fırsatına sahip olmaktadır. Bu sayede, bireyler karbon ayak izlerini azaltma yolunda somut bir adım atarak sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) dahil, dünya çapında iklim eylemini destekleyen projelere katkı sağlayabilmektedir.

Literatürde, havacılığa bağlı emisyonların ölçümü ve modellenmesi konusunda farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Özellikle EUROCONTROL ve ICAO tarafından geliştirilen AEM (Advanced Emissions Model) ve ICAO Carbon Emissions Calculator gibi araçlar, uçuş rotası, uçak tipi, yük durumu gibi değişkenleri dikkate alarak emisyon hesaplamaları yapılmasını mümkün kılmaktadır (Eurocontrol, 2020). Bu tür araçlar, çevresel politika üretiminde önemli rol oynamaktadır.

Son yıllarda, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) ve elektrikli veya hibrit tahrik sistemleri gibi alternatif teknolojilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artmıştır. SAF kullanımının mevcut fosil bazlı jet yakıtlarına göre %60–80 oranında daha düşük yaşam döngüsü emisyonuna neden

olabileceği bildirilmektedir (IATA, 2023). Ancak SAF üretiminin teknik ve ekonomik sınırlılıkları, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını engellemektedir (Khadilkar & Balakrishnan, 2020).

COVID-19 pandemisi sonrası havacılık faaliyetlerinde yaşanan düşüş, sektördeki emisyonların geçici olarak azalmasına yol açmıştır. Bu durum, sektörün karbon ayak izinin azaltılması yönünde yeniden yapılandırılması gerektiğine işaret etmiştir. Filoların modernizasyonu, operasyonel verimlilik artırımı ve alternatif enerji kaynaklarına geçiş, literatürde sıkça vurgulanan stratejiler arasındadır (Sustainable Aviation, 2021).

İklim Değişikliği Başkanlığı (2022) tarafından yapılan açıklamalara göre, havacılık sektöründen kaynaklanan emisyonlar, küresel toplam emisyonların %2'sini oluşturmaktadır. Türkiye'de bu emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, 25 Mart 2022 tarihinde "Havacılık Faaliyetlerinden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik" Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Yönetmeliğin EK-4 bölümünde, ulusal ve uluslararası havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması süreçlerinin başlatıldığı belirtilmiştir.

Havacılık sektörü, küresel sera gazı (GHG) emisyonları içinde küçük fakat etkisi büyük bir paya sahiptir. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'ne (ICAO) göre, sivil havacılığın küresel CO₂ emisyonlarındaki payı yaklaşık %2–3 düzeyindedir (ICAO, 2022). Ancak bu oran, havacılığın yüksek irtifalarda gerçekleştirdiği faaliyetlerin iklim üzerindeki etkisi göz önüne alındığında daha kritik hale gelmektedir. Özellikle azot oksitler (NO_x), su buharı, partikül maddeler ve yoğunlaşma izleri (contrails) gibi diğer emisyon türleri iklim üzerinde dolaylı ama güçlü etkiler yaratmaktadır (Lee ve ark., 2021).

Birçok çalışma, havacılık emisyonlarının sadece CO₂ değil, aynı zamanda NO_x, SO_x ve uçucu organik bileşikler (VOC) gibi diğer kirleticilerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Lee ve arkadaşlarının (2021) gerçekleştirdiği çalışmada, havacılığın toplam iklim etkisinin sadece CO₂ emisyonlarına indirgenemeyeceği ve çoklu etki faktörleriyle (RF - radiative forcing) analiz edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, havacılığın iklim değişikliğine katkısı %3.5 seviyesinde tahmin edilmektedir.

Kumaş ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada, 2019 yılında Muğla'daki havalimanlarından gerçekleştirilen uçuş sayıları ve uçak türlerine dair veriler kullanılarak emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalarda, IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) tarafından önerilen Tier yaklaşım metodolojisi uygulanmıştır. Ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazları arasında, özellikle CO₂ gazının önemli bir paya sahip olduğu gözlemlenmiş ve bu nedenle CO₂ emisyon seviyeleri belirlenmiştir. Hesaplamalar, yakıt tüketimindeki artışın CO₂ emisyonlarını yükselttiğini göstermektedir.

Ekici ve Şöhret (2018) çalışmasında, havayolu taşımacılığına olan ilginin artmasının, daha yüksek enerji tüketimi ve emisyon salınımlarına neden olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, hava

taşımacılığından kaynaklanan emisyonların incelenmesini araştırmacıların önemli bir gündemi haline getirmiştir. Bu bağlamda, çalışmada 2018 yılında Isparta Süleyman Demirel Havalimanı'nda uçaklardan kaynaklanan emisyonların çevresel ve ekonomik etkileri ele alınmıştır.

Lükewille (2018) ise son on yıl içinde küresel ticarete önemli bir büyüme gözlemlendiğini ve bu gelişmenin hem havacılık hem de denizcilik sektörlerinde büyük bir genişleme yarattığını ifade etmiştir. Bu durum, emisyonlarda sürekli bir artışa yol açmaktadır. Örneğin, Avrupa'da ve dünya genelinde havayoluyla seyahat eden yolcu sayısı 1990'dan itibaren üç katına çıkmıştır. Ayrıca, gelişen ekonomilerle artan ticaret ve buna bağlı olarak uzayan seyahat mesafeleri, emisyonları artıran faktörler arasında yer almaktadır. İndirimli havayollarının büyüyen pazar payı da daha düşük maliyetli uçuşların sayısını artırırken, bu havayollarının filoları genellikle daha yeni ve çevre dostu olmasına rağmen, uçuş payları son on yıl içinde iki katına çıkmıştır.

NASA (2017) tarafından yapılan araştırmalara göre, bilim insanları havacılıkla ilgili çalışmalarını sürdürmekte olsa da, bu sorunun karmaşıklığı devam etmektedir. Jet motorları, otomobil motorları gibi içten yanmalı motorlardır ve bu motorlarda yakıt yüksek hızla dar bir açıklıktan dışarı atılmaktadır. Modern jet yakıtı olan kerosen, evlerde kullanılan fosil yakıtlara benzer bir yapıya sahiptir. Bu yakıtın yanması sonucu, karbon dioksit (CO₂), su buharı (H₂O), nitrik oksit (NO) ve azot oksit (NO₂) gibi gazlar atmosfere salınmaktadır. Dünya, güneşten gelen ışınlarla kıyasla, geri yansıyan ışınlarla daha fazla ısınmaktadır. Bu ışınlar, karbondioksit ve su buharı tarafından geri yansımaları engellenerek atmosferde tutulmakta, bu da Dünya'nın aşırı ısınmasına yol açmaktadır. Bu fenomen, sera etkisi olarak tanımlanmaktadır.

Yılmaz İ. (2017) çalışmasında, Kayseri Havaalanı'ndaki pistte yapılan 2 dakikalık bir ilerleme azaltılmasıyla, LTO aşamasındaki toplam emisyonların yaklaşık %4 oranında azalma gösterebileceğini belirtmiştir.

Ünal, İ. ve arkadaşları (2014), dünya genelinde tüketilen yakıtın %5-6'sının yolcu taşımacılığı yapan uçaklar tarafından kullanıldığını ifade etmişlerdir. Yeni nesil uçaklar, 100 kilometrede kişi başına ortalama 3.5 litre yakıt tüketirken, eski uçaklarda bu miktar 12 litre civarındadır. Uçak motorlarından salınan emisyonlar genellikle %70 CO₂, %29 H₂O ve %1 diğer zararlı gazlar olarak dağılmaktadır. Bu emisyonlar, kullanılan yakıtın türü, motor tipi, uçuş mesafesi ve irtifa gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Rismann ve arkadaşları (2013), çalışmalarında, uçak emisyonlarının etkilerini değerlendirmek amacıyla dünyanın en yoğun havaalanı olan Atlanta Havaalanı'nda LTO emisyonlarını, Advanced Modelling System for Transport, Emissions, Reactions and Deposition of Atmospheric Matter (AMSTERDAM) modelini kullanarak incelemişlerdir.

Schmidt, F. (2012), uçaklardan yayılan karbon dioksit, su buharı ve nitrik asit gibi gazların havayı doğrudan kirlettiğini vurgulamaktadır. Uçaklarda kullanılan kerosenin %86'sı karbon ve %14'ü hidrojen içermektedir. Her kilogram kerosenin yakılması sonucu 3,15 kilogram karbondioksit salınmakta ve bu gaz üst atmosferde küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır. Sera gazları arasında

yer alan bu gazların etkileri, havacılık sektörünün büyümesiyle birlikte artmaktadır. Küresel ısınmadaki havacılığın payı %3 olup, her yakılan kilogram kerosen ile 1,23 kilogram su buharı salınmakta ve bu su buharı, havanın soğuk olduğu durumlarda su damlacıklarına dönüşerek uçakların geride bıraktığı izlere yol açmaktadır. Bu bulutlar, sirrüs adı verilen ve genel bulutlanmanın %10 ile %20'si arasında değişen bulutlardır.

Song ve Shon (2012), Kore'deki dört farklı havaalanı için 2009-2010 yılları arasında yapılan çalışmada, uçaklardan kaynaklı emisyonları tahmin etmek için Emission and Dispersion Modeling System (EDMS) metodunu kullanmışlardır.

Çağatan, A. (2011) ise havacılık sektörünün son yıllarda gösterdiği gelişmelerle birlikte, uçak sayısı ve uçuş seferlerinin artmasının hava kirliliği üzerinde önemli bir etki yarattığını belirtmiştir. Uçaklar, uçuşları sırasında atmosfere önemli miktarda kirletici madde salmaktadırlar. Bu emisyonların başında karbondioksit gelmektedir; ancak bunun dışında azot oksit, karbon monoksit, kükürt oksit ve diğer gazlar ile partiküller de atmosfere karışmaktadır. Bu zararlı emisyonlar, atmosfer ve üst troposfer üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Emisyonların çevresel etkilerinin yanı sıra, sağlık üzerinde de olumsuz etkiler doğurduğu bilinmektedir.

Prakash Karamchandani ve arkadaşları (2010), Advanced Modelling System for Transport, Emissions, Reactions and Deposition of Atmospheric Matter (AMSTERDAM) modeli ile havacılık endüstrisinde hava trafik yönetimi ve havalimanı operasyonlarının analiz edilmesi ve optimize edilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu tür simülasyonlar, büyük veri kümeleri ve karmaşık algoritmalar kullanarak hava trafiği ve havalimanı operasyonlarının çeşitli yönlerini incelemeye olanak tanımaktadır.

Schürmann ve arkadaşları (2007), Zurich Havalimanı'nda uçakların rölanti sırasında saldıgı NO, NO₂, CO ve CO₂ emisyonlarını ölçmüş ve bu verileri ICAO tarafından belirlenen emisyon standartları ile karşılaştırmışlardır.

Kaygusuz, K. (2003) yaptığı çalışmada, 2001 yılına ait LTO aşamasındaki NO_x ve CO emisyonlarının, Türkiye genelindeki toplam emisyon miktarının %0,25 ila %0,3'ünü oluşturduğunu belirtmiştir.

2.2. Havacılık Endüstrisi Emisyon Hesaplama Modelleri

2.2.1. AMSTERDAM Modeli

Son yıllarda küresel havacılık literatüründe ön plana çıkan kavramsal modellerden biri olan Amsterdam modeli, adını Hollanda'daki Amsterdam Schiphol Havalimanı'nın benzersiz işleyiş yapısından almaktadır. Bu model, yalnızca hava ulaşımı sağlayan geleneksel bir havalimanı anlayışının ötesine geçerek, entegre ulaşım, çok işlevli alan kullanımı, kamu-özel sektör iş birlikleri, sürdürülebilirlik, bölgesel kalkınma ve şehir-havalimanı entegrasyonu gibi pek çok alanı kapsayan stratejik bir planlama yaklaşımını temsil etmektedir. Bu öncü çalışma, Amsterdam Schiphol Havalimanı'nı, geleneksel havalimanı konseptinden çok işlevli "airport city" (havaalanı şehri)

modeline geçişin en başarılı örneklerinden biri olarak incelemiştir. Çalışmada, Schiphol'un yalnızca bir ulaşım merkezi değil, aynı zamanda iş, alışveriş, konaklama, kültür ve lojistik faaliyetlerin entegre bir parçası hâline geldiği gösterilmiştir. Yazarlar, bu yapının sürdürülebilir kentsel gelişim ve ekonomik büyüme açısından örnek teşkil ettiğini vurgulamaktadır. (Kasarda & Lindsay, 2011; Güller & Güller, 2003).

Amsterdam modeli, havalimanlarının sadece yolcu ve kargo taşıma merkezleri değil, aynı zamanda ticaret, konaklama, ofis, eğitim ve kültürel faaliyetlerin de yürütüldüğü çok işlevli yaşam alanları haline gelmesini amaçlar. Bu nedenle model, sıkça "airport city" (havaalanı şehri) ya da "aerotropolis" kavramları ile birlikte anılmaktadır (de Neufville & Odoni, 2013).

Bu çalışmada, atmosferik maddelerin taşınması, emisyonları, reaksiyonları ve çökmesi için geliştirilen AMSTERDAM modelinin paralel versiyonunun geliştirilmesi ve uygulanması ele alınmıştır. Bu model, hava kalitesini ve atmosferdeki kimyasal süreçleri daha verimli bir şekilde simüle etmek için optimize edilmiştir.

AMSTERDAM modeli, havacılık endüstrisinde hava trafik yönetimi ve havalimanı operasyonlarının analiz edilmesi ve optimize edilmesi için kullanılan bir simülasyon ve analiz aracıdır. Bu tür modeller genellikle büyük veri kümelerini ve karmaşık algoritmaları kullanarak hava trafiği ve havalimanı operasyonlarının çeşitli yönlerini incelemek için kullanılır.

AMSTERDAM modelinin temel özellikleri ve kullanım amaçları şu şekilde özetlenebilir:

a- Şehir-Havalimanı Entegrasyonunun Sağlanması

Amsterdam modeli, havalimanının şehirle bütünleşmesini ve kentsel yapının bir parçası haline gelmesini hedefler. Schiphol Havalimanı örneğinde olduğu gibi, model toplu taşıma sistemleri, otoyollar ve demiryolu ağlarıyla entegre ulaşım altyapısını önceler. Bu çalışmada, Amsterdam modelinin başarısında kamu-özel sektör ortaklıklarının (PPP) kritik rol oynadığı ortaya konmuştur. Schiphol Havalimanı'nın yönetim yapısı, devlet desteğiyle özel yatırımcıların entegre edildiği karma bir modelle yürütülmektedir. Araştırma, bu tür bir modelin hem altyapı yatırımlarını teşvik ettiğini hem de operasyonel verimliliği artırdığını göstermektedir. (Van Wijk & Van der Hoek, 2007).

Amsterdam Schiphol modelinin şehir ekonomisine olan etkilerini detaylı biçimde analiz etmiştir. Schiphol'un etrafında gelişen iş merkezleri, serbest bölgeler ve lojistik üsler sayesinde bölgesel kalkınmanın hızlandığı ve istihdamın arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca, Schiphol'un yönetim modeli ve çevresel sürdürülebilirlik uygulamaları da Türkiye'deki havalimanı planlamalarına örnek olarak sunulmuştur (Yıldız, R. Ve Karakoç, D, 2018).

Amsterdam Schiphol'un Avrupa'daki kentsel havalimanı yönetimi açısından lider rol üstlendiğini savunmaktadır. Schiphol'un ulaşım, turizm, konut ve ticaret gibi alanları entegre biçimde geliştirdiği ve şehir-havalimanı etkileşimini optimize ettiği gösterilmiştir. Özellikle hava

taşımacılığının mekânsal planlama süreçleriyle birlikte yürütülmesi sayesinde sürdürülebilir kentsel dönüşüm desteklenmektedir (Conway, C. Ve Timms, P. 2010).

b- Ekonomik Gelişmeyi Teşvik Etme

Model, havalimanı etrafında oluşan ekonomik kümelenmeler sayesinde bölgesel kalkınmayı destekler. Havalimanı çevresinde ofis alanları, ticaret merkezleri, oteller ve lojistik üsler kurulmasıyla istihdam ve ticaret artışı sağlanır (Button & Taylor, 2000).

c- Sürdürülebilirlik ve Çevresel Uyum

Amsterdam modeli, sürdürülebilir havacılığı desteklemek amacıyla enerji verimliliği, karbon emisyonu azaltımı ve yeşil altyapı uygulamaları gibi çevresel politikaları da içermektedir. Schiphol, bu alanda karbon ayak izi yönetimi ve yeşil bina sertifikalarıyla örnek teşkil etmektedir (SHGM, 2023; ICAO, 2023).

d- Kamu-Özel Ortaklıklarının Geliştirilmesi

Modelin başarısındaki temel unsurlardan biri, etkin kamu-özel sektör iş birliğidir. Schiphol Havalimanı'ndaki altyapı yatırımları ve hizmet yönetimi bu iş birlikleriyle gerçekleştirilmektedir (Van Wijk & Van der Hoek, 2007).

e- Yolcu Deneyimini ve Operasyonel Verimliliği Artırma

Schiphol, havalimanı planlaması ve tasarımında örnek vaka olarak ele alınmıştır. Özellikle “tek terminal konsepti” ve çok modlu ulaşım entegrasyonu vurgulanmıştır. Schiphol’un terminal ve pist sistemlerinin verimli organizasyonu, yolcu deneyimini artıran bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu yapı sayesinde operasyonel esneklik sağlandığı ve kapasite kullanımının optimize edildiği ifade edilmektedir. (de Neufville & Odoni, 2013).

2.2.2. Emisyon Dağılım Modeli (Emission and Dispersion Modeling System) (EDMS)

Günümüzde havacılık sektörünün çevresel etkilerinin analiz edilmesi, özellikle hava kalitesi üzerindeki etkilerin modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, Amerika Birleşik Devletleri Federal Havacılık İdaresi (FAA) tarafından geliştirilen Emisyon Dağılım Modeli (EDMS – Emissions and Dispersion Modeling System), sivil havacılığa bağlı emisyonların değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın modelleme araçlarından biridir. EDMS, hem havaalanı kaynaklı emisyonların hesaplanması hem de bu emisyonların atmosferdeki yayılım davranışlarının analiz edilmesi amacıyla geliştirilmiştir (FAA, 2009).

Bu model, uçak motorları, yer destek araçları, havaalanı içi taşıma sistemleri, araç trafiği ve sabit kaynaklar (örneğin jeneratörler) dahil olmak üzere çok çeşitli emisyon kaynaklarını kapsayarak,

hava kalitesi yönetimi, çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) ve iklim politikaları bağlamında karar vericilere bilimsel dayanak sunmaktadır (Briggs ve ark., 2012).

Emission and Dispersion Modeling System (EDMS), özellikle havaalanları ve havacılık sektörü için tasarlanmış bir emisyon ve dağılım modelleme sistemidir. Bu sistem, havaalanı operasyonları sırasında oluşan emisyonların tahmin edilmesi ve bu emisyonların hava kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılır. EDMS, havacılık sektöründeki çeşitli kaynaklardan (uçaklar, yer destek ekipmanları, araçlar vb.) kaynaklanan emisyonların modellenmesi ve bu emisyonların atmosferde nasıl yayıldığına belirlenmesi için geliştirilmiştir.

EDMS'nin kullanım amaçları ve temel özelliklerine göre yapılan bazı çalışmalar şu şekilde sıralanmıştır:

a- Havaalanı Kaynaklı Emisyonların Hesaplanması

EDMS, havaalanlarında meydana gelen karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), uçucu organik bileşikler (VOC), kükürt dioksit (SO₂) ve partikül madde (PM₁₀ ve PM_{2.5}) gibi çeşitli kirleticilerin miktarlarını nicel olarak hesaplayabilmektedir. Bu yönüyle model, havaalanı faaliyetlerinin çevresel etkilerinin ölçülmesinde etkin bir araçtır (Kim ve ark., 2004).

b- Emisyonların Atmosferdeki Yayılımının Modellenmesi

Model, sadece emisyon miktarlarını değil, bu emisyonların meteorolojik koşullar altında coğrafi dağılımını ve konsantrasyon profilini de belirleyebilmektedir. Böylece, çevreye yayılan kirlilik düzeyleri detaylı bir şekilde simüle edilmekte ve hava kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilebilmektedir (Barrett ve ark., 2010).

c- Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Süreçlerinde Kullanım

ABD ve bazı diğer ülkelerde havalimanı projeleri için yapılması gereken çevresel etki değerlendirme süreçlerinde, EDMS modeli zorunlu veya önerilen analiz araçlarından biri olarak kullanılmaktadır (FAA, 2009). Bu bağlamda, yeni pist yapımı, terminal genişletme veya trafik artışı gibi durumların çevresel etkileri bilimsel verilerle öngörülebilmektedir.

d- Politika Geliştirme ve Karar Destek Sistemi

EDMS, özellikle karbon yönetimi ve sürdürülebilir havacılık politikaları geliştirme sürecinde karar vericilere destek sağlamaktadır. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Avrupa Çevre Ajansı gibi kurumlar da benzer modelleme yaklaşımlarını kendi analiz sistemlerine entegre etmektedir.

EDMS, havaalanı operasyonları sırasında oluşan emisyonların ve bu emisyonların çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için kritik bir araçtır. Havaalanı yönetimi, çevresel uyum, hava kalitesi yönetimi ve araştırma geliştirme çalışmalarında önemli bir rol oynar. Bu sistem, havacılık

sektöründeki emisyonların doğru bir şekilde hesaplanmasını ve yönetilmesini sağlayarak, çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olur. Dolayısıyla teknik olarak;

- Meteorolojik Veri Girişi: Rüzgâr hızı, sıcaklık, basınç gibi verileri içerecek şekilde yapılandırılmıştır.
- Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) ile Uyumluluk: Emisyonların mekânsal dağılımını görselleştirme olanağı sunar.
- Kullanıcı Arayüzü: Grafik temelli kullanıcı dostu bir arayüz sunar.
- Hareket Profili Verisi: Uçakların iniş-kalkış döngüsündeki motor kullanımı, yakıt tüketimi ve zaman dağılımları dikkate alınır (LTO – Landing and Take-Off Cycle).

EDMS Yöntemini kullanarak yapılan belli başlı bazı literatür çalışmaları;

(Kim, B ve ark, 2024) ABD'deki 18 büyük havaalanında EDMS kullanılarak yapılan hava kalitesi modellemelerini analiz etmiştir. Araştırma, uçak motoru emisyonlarının özellikle azot oksit (NO_x) ve karbon monoksit (CO) düzeylerinde önemli bir katkı sağladığını ortaya koymuştur. EDMS'nin, iniş-kalkış döngüsü (LTO) süresince gerçekleşen motor emisyonlarını doğru tahmin edebilme yeteneği vurgulanmış ve yerel hava kalitesine etkilerin bölgesel düzeyde değiştiği belirlenmiştir.

(Barrett, S.R.H. ve ark, 2010) EDMS ve benzeri modelleme araçları kullanılarak uçak kaynaklı emisyonların sağlık üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, özellikle iniş-kalkış fazında yayılan emisyonların şehir merkezlerine yakınlığı nedeniyle halk sağlığı açısından daha yüksek risk oluşturduğunu göstermektedir. EDMS, bu bağlamda, havacılığa bağlı $\text{PM}_{2.5}$ partikül madde emisyonlarının mekânsal dağılımını belirlemede önemli bir rol oynamıştır.

(Brigs, G.A, 2012) EDMS, AERMOD (Atmospheric Dispersion Modeling System) ile entegre bir biçimde kullanılarak, emisyonların çevresel yayılım davranışları modellenmiştir. Bulgular, EDMS'in özellikle düşük irtifada gerçekleşen motor emisyonlarının konsantrasyon ve dağılım hesaplamasında yüksek doğruluk sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, modelin meteorolojik veri entegrasyonu sayesinde yerel hava koşullarına bağlı emisyon etkilerinin hassas bir biçimde analiz edilebildiği ortaya konmuştur.

(Ashok, A., ve ark, 2013) Havalimanlarındaki uçuş operasyonları azaltıldığında hava kalitesinde gözlemlenen iyileşmeleri modellemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, uçuş sıklığının azaltılmasının NO_x ve CO emisyonlarında %15–25 oranında düşüş sağladığını ve bunun kent içi hava kalitesine pozitif yansıdığını göstermektedir. EDMS, bu tür politika simülasyonlarının etkilerini değerlendirmede temel araç olarak öne çıkmıştır.

2.2.3. Tier Yöntemi

Günümüzde küresel ölçekte sera gazı (GHG) emisyonlarının hesaplanması ve raporlanması, hem iklim politikalarının oluşturulması hem de sektörel bazda sürdürülebilirlik uygulamalarının izlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında kabul gören TIER sistemi, emisyon hesaplamalarında kullanılan kademeli metodolojik yaklaşımı ifade etmektedir (IPCC, 2006). “TIER” terimi, İngilizce’de “kademe” veya “seviye” anlamına gelmekte olup, farklı veri düzeyleri ve metodolojik karmaşıklık derecelerine göre sınıflandırılmış üç ana kademedan oluşur.

TIER sistemi, özellikle havacılık, enerji, sanayi ve ulaştırma sektörlerinde sera gazı envanterlerinin hazırlanmasında kullanılan standartlaştırılmış bir yöntemler bütünüdür. Bu sistem, ülkelerin ve kurumların sahip oldukları veri düzeyi, kapasite ve teknik altyapıya göre emisyon hesaplama yöntemlerini farklı karmaşıklık seviyelerine göre uygulamalarına olanak tanır. Bu temel kaynak, TIER sisteminin kuramsal çerçevesini ve uygulanma biçimlerini açıklayan başvuru niteliğinde bir çalışmadır. Tier 1, 2 ve 3 düzeylerinin nasıl ayrıştığını, veri derinliğine göre nasıl seçileceğini ve her düzeyin sağladığı doğruluk seviyesini tanımlamaktadır. Yönergeler, enerji, sanayi, ulaştırma ve havacılık gibi sektörlerde emisyon hesaplamalarının nasıl yapılması gerektiğine dair örneklerle desteklenmiştir. Bulgulara göre Tier 3 metodolojisi, gelişmiş ülkelerde sera gazı envanterlerinin güvenilirliğini artıran en kapsamlı düzeydir. (Eggleston ve ark., 2006).

Uluslararası sivil havacılıkta, özellikle CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) gibi karbon denkleştirme sistemlerinde emisyon hesaplamalarının doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, havayolu şirketleri genellikle Tier 2 ve Tier 3 metodolojilerini kullanarak, daha hassas ve uçuşa özgü emisyon envanterleri oluşturmaktadırlar (ICAO, 2020). Türkiye’de ise Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM), CORSIA kapsamında havayolu işletmelerinden Tier 3 düzeyinde raporlama yapmalarını teşvik etmektedir (SHGM, 2022).

Avrupa Çevre Ajansı tarafından hazırlanan bu rehberde, farklı sektörlerle yönelik emisyon envanteri oluşturulurken kullanılabilecek TIER düzeyleri tanımlanmıştır. Rehber, her sektörün teknik kapasitesine göre hangi Tier düzeyinin tercih edilmesi gerektiğini belirtirken, Tier 1’in temel seviye analizler için uygun olduğunu, detaylı politika önerilerinde ise Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımlarının tercih edilmesinin daha yerinde olacağını göstermektedir. Havacılık emisyonlarının hesaplanmasında özellikle uçuş sayısı, motor verileri ve yakıt tipi gibi değişkenlerin Tier 2 ve 3 düzeylerine uygun veri setleriyle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Friedrich, R. Ve Reis, S. 2004).

IPCC tarafından geliştirilen TIER yaklaşımı, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan metodolojik bir çerçeve sunar ve farklı ülkelerin ya da kurumların sahip oldukları veri

derinliği ve teknik kapasiteye göre üç farklı düzeyde uygulanabilir. En basit düzey olan Tier 1, varsayımsal ve genelleştirilmiş emisyon faktörleriyle çalışır; IPCC'nin sağladığı ortalama katsayılar kullanılarak toplam yakıt tüketimi üzerinden emisyonlar hesaplanır. Bu yöntem, düşük veri erişimine sahip ülkeler için başlangıç düzeyinde uygun bir araç olarak değerlendirilir (IPCC, 2006; Eggleston ve ark., 2006).

Daha gelişmiş bir yöntem olan Tier 2, lke ya da sektör ölçeğinde daha hassas ve detaylı emisyon faktörlerinin kullanımına dayanır. Bu düzeyde hesaplamalar, yerel koşulları ve sektörel özellikleri dikkate alarak daha özgün sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Örneğin havacılık sektöründe uçak türü, motor tipi, uçuş profili ve yakıt cinsi gibi değerkenlere dayalı analizler yapılabilir (Lee ve ark., 2009)..

Bu alışma, küresel havacılık emisyonlarının hesaplanmasında IPCC'nin Tier 2 ve Tier 3 yöntemlerinin karşılaştırılmalı olarak nasıl uygulandığını analiz etmiştir. Araştırmacılar, Tier 1 düzeyindeki basitleştirilmiş hesaplamaların havacılık gibi yüksek değerkenliğe sahip bir sektörde yetersiz kaldığını ve daha hassas veri temelli modellemelerin (Tier 2 ve 3) tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, iklim değerikliği üzerindeki havacılık kaynaklı etkilerin doğru şekilde belirlenebilmesi için gelişmiş düzeyde metodolojilerin zorunlu olduğu vurgulanmıştır (Lee ve ark., 2009). Bu sayede, ulusal düzeyde yapılan raporlamalarda daha doğru emisyon envanterleri elde edilir.

CORSIA (Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Programı) kapsamında ICAO tarafından yayımlanan bu metodoloji dokümanında, TIER sistemine dayalı emisyon hesaplamaları açıkça tanımlanmıştır. Özellikle havayolu şirketlerinin CO₂ emisyonlarını raporlarken hangi Tier düzeyini (zellikle Tier 3) tercih etmeleri gerektiği belirtilmiştir. Bulgulara göre, Tier 3 düzeyinde kullanılan uçuş bazlı gerçek veri analizi, doğruluk açısından en güvenilir yöntemdir ve CORSIA'nın temelini oluşturur (ICAO, 2020).

(Karagl, H. ve Demirtaş, . 2021) yaptıkları çalışmada Türkiye'deki sivil havacılık kaynaklı emisyonların IPCC'nin Tier düzeyleri kullanılarak hesaplanabilirliğini analiz etmiştir. Tier 1 ve Tier 2 düzeylerinde yapılan hesaplamalar karşılaştırılmış ve Tier 2 metodolojisinin çok daha hassas ve güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Çalışma, Türkiye'nin gelecekteki karbon raporlama süreçlerinde Tier 3 düzeyine geçiş yapmasının önemine dikkat çekmiştir.

En yüksek doğruluk seviyesini temsil eden Tier 3 ise doğrudan ölçüm verilerine, gelişmiş modelleme yazılımlarına (rneğin EDMS, AERMOD, GHG Protocol araçları) ve detaylı uçuş operasyon verilerine dayanır. Bu düzey, özellikle gelişmiş ülkeler veya detaylı çevresel etki analizlerinin gerekli olduğu projelerde kullanılır. Tier 3 yaklaşımı, yalnızca emisyon miktarını değil, bu emisyonların zamansal ve mekânsal dağılımını da modelleyerek kapsamlı bir analiz imkânı sunar (ICAO, 2020; ICAO, 2022).

Bu üç düzeyli yapı, ülkelerin emisyon raporlama süreçlerini hem şeffaf hem de karşılaştırılabilir kılmak amacıyla esnek bir ereve sunar. Havacılık gibi yüksek hassasiyet

gerektiren sektörlerde Tier 2 ve Tier 3 düzeyleri öncelikli olarak tercih edilirken, Türkiye’de Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü de CORSIA kapsamındaki raporlamalarda Tier 3 düzeyinin benimsenmesini teşvik etmektedir (SHGM, 2022).

Tier yöntemi, emisyon envanterleri ve hava kalitesi yönetimi alanında geniş çapta kabul görmüş ve kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve raporlanması amacıyla geliştirilen uluslararası kılavuzlar ve protokoller çerçevesinde oluşturulmuştur. Tier yaklaşımının kökenleri, büyük ölçüde Birleşmiş Milletler (BM) tarafından geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan emisyon envanteri kılavuzlarına dayanır.

Tier yöntemi, emisyon hesaplamalarında farklı doğruluk seviyeleri sunarak ülkeler ve kuruluşların mevcut veri ve kaynaklarına uygun yöntemleri benimsemelerine olanak tanıyan esnek bir metodolojik çerçeve sunar. Bu yaklaşım, ilk olarak 1996 yılında IPCC tarafından yayımlanan Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories dokümanı ile tanıtılmıştır (IPCC, 1996). Ardından 2006 ve 2019 yıllarında yayımlanan güncellemelerle (2006 IPCC Guidelines ve 2019 Refinement) daha da geliştirilmiştir (IPCC, 2006; IPCC, 2019).

Tier yaklaşımı; Tier 1, basit yakıt tüketimi ve varsayılan emisyon faktörlerine dayalı hesaplamaları içerirken; Tier 2, ülkeye özgü emisyon faktörlerinin ve daha ayrıntılı verilerin kullanımına dayalıdır (IPCC, 2006). Tier 3 ise doğrudan ölçümler, model tabanlı analizler ve ayrıntılı izleme sistemlerini gerektiren ileri düzey yöntemleri kapsamaktadır (IPCC, 2019).

Bu yapı, sera gazı emisyonlarının raporlanmasında karşılaştırılabilirlik, şeffaflık ve doğruluk ilkelerini destekleyerek ulusal ve uluslararası çevresel politika geliştirme süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır (UNFCCC, 2023). Günümüzde Tier metodolojisi, hem emisyon envanteri hazırlama hem de hava kalitesi yönetimi alanlarında yaygın biçimde kullanılmakta olup, IPCC kılavuzları ve Birleşmiş Milletler çerçevesindeki iklim protokollerinin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (IPCC, 2006; UNFCCC, 2023).

Havacılıkta emisyon envanteri, IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) kılavuzlarına göre hazırlanmaktadır. IPCC, 1988 yılında Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından kurulmuş olup, iklim değişikliği ile ilgili bilimsel değerlendirmeler yapmak amacıyla faaliyet göstermektedir. 1990 yılında yayımlanan ilk raporu, iklim değişikliğiyle mücadele için uluslararası bir anlaşmaya zemin hazırlamıştır. Bu rapor, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi’nin (UNFCCC) temelini oluşturmuş ve 195 ülke tarafından imzalanmıştır. IPCC, düzenlediği Hükümetler arası İklim Değişikliği Panelleri ile üye ülkelerin temsilcileri ile toplantılar yapar ve sonuçlarını rapor halinde sunar. IPCC raporları, kapsamlı ve objektif olmakla birlikte, açık ve şeffaf bir şekilde binlerce uzman tarafından incelenerek yayımlanır. Bu raporlar, küresel iklim değişikliği sorununa yönelik uluslararası stratejilerin şekillendirilmesine katkı sağlar (URL-2, 2017).

Raporların ilki 1990 olacak şekilde, 1995, 2001, 2007, 2014 ve 2022 yılında çıkmıştır. Bu raporlar Dünya genelinde üretilen, iklim değişikliği ile ilgili en kapsamlı bilimsel değerlendirmelerdir. Ülkelerin iklim ile ilgili her türlü sorunlarına cevap vermektedir (IPCC, 2022).

IPCC kuralları ilk olarak 1994 yılında kabul edilip, 1995 yılında yayımlanmıştır. 1996 yılında ise, bu kurallar Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Rehberi olarak kitap haline getirilmiştir. Bu rehberde, antropojenik emisyon kaynaklarının tahmin edilmesi ve sera gazlarını azaltarak giderilmesine yönelik metodolojiler yer almaktadır. 1997 yılında Kyoto’da yapılan UNFCCC toplantısında, 1996 yılında yayımlanan Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Kılavuzu’ndaki ilkeler yasal bağlayıcı kabul edilmiştir (URL-3, 2017). UNFCCC sözleşmesinden farklı olarak, Kyoto Protokolü sanayi olarak gelişmiş ülkeler için sera gazı salınımlarına sınırlamalar getirmiştir. Türkiye ise 2004 yılında UNFCCC ülkelerine 184. taraf olarak katılmış ve 2009 yılında Kyoto Protokolüne taraf olmuştur (URL-3, 2017).

1996 yılında yayımlanan Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Rehberi üç ciltten oluşmaktadır. Birinci cilt, emisyon envanteri hazırlamak için gerekli verilerin nasıl temin edileceği, verilerin nasıl değerlendirileceği ve değerlendirme sonuçlarının nasıl raporlanacağına dair teorik bilgileri sunmaktadır. İkinci cilt, hesaplamalar için kullanılacak denklemleri ve raporlama esnasında kullanılacak çizelgeleri içermektedir. Üçüncü cilt ise, ülkelerin emisyon hesaplamaları için eksik verileri tamamlamak amacıyla referans alabilecekleri değerlerin yer aldığı bir referans kitabıdır (URL-4, 2017). Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Rehberi, enerji, endüstriyel işlemler, çözücüler (solvent) ve diğer ürünlerin kullanımı, tarım, ormancılık ve arazi kullanımı ile atıklar olmak üzere toplamda 6 ana başlık altında düzenlenmiştir (URL-5, 2017).

1996 yılındaki kılavuz 2006 yılında UNFCCC Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü ile ilgili çalışmaları dikkate alınarak yenilenmiştir (URL-5 2017).

Yenilenen 2006 Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Rehberi, anlaşılabilirliğini artırmak amacıyla 5 ciltten oluşacak şekilde hazırlanmıştır. Birinci cilt, genel olarak raporlama süreçlerinden bahsederken, ikinci cilt enerji konularına odaklanmaktadır. Üçüncü cilt, sanayi süreçleri ve ürün kullanımıyla ilgili hesaplamaları içermektedir. Dördüncü cilt, tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımlarını ele alırken, beşinci cilt ise atıklarla ilgili emisyon hesaplamalarını kapsamaktadır (URL-6, 2017).

2.2.4. CORSIA Yöntemi

Uluslararası hava taşımacılığı, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %2’sini oluşturmasına rağmen, yüksek büyüme potansiyeli nedeniyle iklim değişikliği açısından stratejik önemde bir sektördür. Ancak bu sektör, Paris Anlaşması gibi bağlayıcı uluslararası iklim anlaşmalarına doğrudan dâhil edilmemiştir. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) öncülüğünde CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) mekanizması geliştirilmiştir. Bu sistemin temel hedefi, 2021 sonrasında

uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonların 2019 seviyesinde sabitlenmesi ve artışların karbon kredileriyle dengelenmesidir (ICAO, 2019).

CORSIA, üç temel fazdan oluşan bir uygulama sürecine sahiptir: Pilot Faz (2021–2023), İlk Faz (2024–2026) ve Zorunlu Faz (2027 sonrası). İlk iki aşama gönüllülük esasına dayanırken, 2027'den itibaren ICAO'ya üye 193 ülkenin büyük çoğunluğu için zorunlu hale gelecektir. Ancak bu noktada, düşük gelirli ve az gelişmiş ülkeler için istisnalar tanımlanmıştır. Sistem, katılımcı ülkelerin havayollarının yıllık karbon emisyonlarını izlemelerini, raporlamalarını ve doğrulamalarını (MRV süreci) zorunlu kılmaktadır. Ardından, bu emisyonların artış kısmı uygun karbon kredileriyle dengelenmektedir (Efthymiou & Papatheodorou, 2019).

CORSIA'nın metodolojik yapısı, ICAO tarafından yayımlanan rehberlerde Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olmak üzere üç teknik düzeyde emisyon hesaplama yöntemine dayandırılmıştır. Tier 3 yöntemi, uçuş bazlı yakıt tüketimi verilerinin kullanıldığı en hassas ve güvenilir düzeyi temsil eder. Bu hesaplama yapısı, havayolu şirketlerinin operasyonel veriler üzerinden karbon salımlarını daha doğru raporlamalarına imkân tanımaktadır. Ayrıca, ICAO'nun geliştirdiği IMPACT, AEDT ve FAST gibi modelleme araçları da bu hesaplamaların desteklenmesinde aktif rol oynamaktadır (ICAO, 2020; FAA, 2020).

CORSIA'nın ortaya çıkışı, aynı zamanda Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi (EU ETS) ile yaşanan uluslararası tartışmaların da bir sonucudur. AB'nin 2012 yılında kendi emisyon ticareti sistemini uluslararası uçuşlara uygulama girişimi, Çin, ABD ve Hindistan gibi ülkelerden ciddi tepki almış ve küresel bir çözüm ihtiyacını gündeme taşımıştır. CORSIA, bu çerçevede evrensel ve kapsayıcı bir piyasa mekanizması olarak kabul edilmiş, ulusal sistemler arası çatışmaları azaltmak amacıyla geliştirilen uzlaşmacı bir araç haline gelmiştir (Scheelhaase, 2020; Gössling & Higham, 2020).

Uluslararası havacılık sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %2–3'ünü oluşturmaya rağmen, yüksek büyüme hızı ve sınırlı alternatif yakıt kullanımı nedeniyle sürdürülebilirlik açısından kritik bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, karbon emisyonlarını azaltma çabalarının uluslararası düzeyde koordine edilmesi gereği, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) öncülüğünde 2016 yılında kabul edilen CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) mekanizmasının temelini oluşturmuştur. CORSIA, özellikle 2021 sonrası dönemde uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonların 2019 seviyesinde sabitlenmesi hedefiyle tasarlanmış, piyasa temelli ilk küresel karbon dengeleme sistemidir (ICAO, 2019).

CORSIA'nın altyapısı, ICAO'nun 2010'lu yıllarda geliştirdiği bir dizi araç ve politika çerçevesine dayanmaktadır. Bunlar arasında yer alan Global Market-Based Measure (GMBM) politikası, CORSIA'nın temel yapı taşlarını oluşturmuş ve sektörün karbon nötr büyümesini sağlamak üzere 39. ICAO Genel Kurulu'nda onaylanmıştır. CORSIA, yalnızca emisyon dengeleme mekanizması sunmakla kalmayıp aynı zamanda raporlama, izleme ve doğrulama (MRV –

Monitoring, Reporting, Verification) süreçlerine dair ayrıntılı teknik kılavuzlar da sağlamaktadır (ICAO, 2016).

CORSIA, havayolu şirketlerinin yıllık karbon emisyonlarını raporlamasını ve bu emisyonlar doğrultusunda karbon dengeleme yükümlülüklerini yerine getirmesini zorunlu kılar. Yöntem, yakıt tüketimine dayalı hesaplama sistemi, emisyon izleme-planlama-doğrulama (MRV) süreçleri ve karbon kredisi satın alımı gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sistem aynı zamanda IPCC TIER metodolojisi ile uyumlu çalışmakta ve emisyon hesaplamalarında genellikle Tier 2 ve Tier 3 düzeyleri kullanılmaktadır (ICAO, 2020).

CORSIA sistemine ilişkin eleştirel değerlendirmeler, literatürde özellikle çevresel etkinlik, yapısal uygulanabilirlik ve piyasaya dayalı mekanizmaların işlevselliği gibi yönlerde yoğunlaşmaktadır. Gössling ve Higham (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, CORSIA'nın küresel ölçekte uygulanabilirliği ve çevresel etkinliği sorgulanmış; sistemin karbon dengeleme yaklaşımına dayalı olmasının gerçek emisyon azaltımını geciktiren bir çözüm sunduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, karbon piyasalarında denetim eksiklikleri ve karbon kredilerinin “eklik” (additionality) kriterini yeterince karşılamaması önemli yapısal sorunlar olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte araştırmacılar, CORSIA'nın kısa vadede sektör genelinde izleme ve raporlama kültürü oluşturmada bakımından önemli bir başlangıç noktası sunduğunu da belirtmektedir (Gössling & Higham, 2020).

Efthymiou ve Papatheodorou (2019) tarafından yapılan karşılaştırmalı analizde, CORSIA ve Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi (EU ETS) uygulamaları değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, AB merkezli taşıyıcılar emisyon raporlaması ve karbon dengeleme süreçlerinde daha kurumsallaşmış bir yapıya sahipken, AB dışı ülkelerde faaliyet gösteren havayolu şirketlerinde CORSIA'nın uygulanabilirliğini sınırlayan teknik ve yönetsel altyapı eksiklikleri dikkat çekmektedir. Araştırma, özellikle gelişmekte olan ülkelerde CORSIA'nın etkinliğinin artırılması için kapasite geliştirme ve altyapı yatırımlarının gerekliliğini vurgulamaktadır (Efthymiou & Papatheodorou, 2019).

CORSIA'nın teorik arka planı, CORSIA öncesi dönemde yapılan karbon ticaretine ve piyasa temelli mekanizmalara ilişkin çalışmalarla güçlendirilmiştir. Özellikle Kharina, Rutherford ve Zeinali (2016) tarafından yapılan maliyet etkinliği değerlendirmesinde, havayolu sektörünün karbon dengeleme sistemlerine nasıl adapte olabileceği ve bu sistemlerin sürdürülebilirlik açısından ne gibi avantajlar sunduğu analiz edilmiştir. Benzer şekilde Gössling ve Upham (2009), piyasa bazlı çözümlerin çevresel etkinliğini sorgulayarak bu tür sistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleriyle olan uyumsuzluklarını ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, CORSIA gibi küresel ölçekte tasarlanmış sistemlerin arka planını oluşturan literatür temelini oluşturmaktadır (Kharina et al., 2016; Gössling & Upham, 2009).

CORSIA'nın potansiyel çevresel etkilerine ilişkin senaryo temelli modelleme çalışmaları da literatürde yer almaktadır. Scheelhaase (2020) tarafından yapılan değerlendirmede, sistemin ilk uygulama aşamasında uluslararası havacılıktan kaynaklanan yıllık emisyon artışının yaklaşık

%80'ini dengeleme kapasitesine sahip olduğu ifade edilmiştir. Ancak uzun vadede bu yapının tek başına yeterli olamayacağı, daha etkili sonuçlar için sürdürülebilir havacılık yakıtları, operasyonel verimlilik ve teknolojik dönüşüm gibi doğrudan emisyon azaltıcı önlemlerle desteklenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışma, CORSIA'nın geçici bir çözüm niteliğinde olup kalıcı çevresel fayda için daha kapsamlı stratejilerle bütünleştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Scheelhaase, J. Maertens, S. 2020).

CORSIA'nın teknik altyapısı, izleme ve raporlama süreçlerine dair çeşitli modelleme araçlarıyla desteklenmektedir. ICAO tarafından geliştirilen IMPACT modeli ve ABD Federal Havacılık İdaresi (FAA) tarafından geliştirilen AEDT (Aviation Environmental Design Tool) yazılımı, havayolu şirketlerinin büyüme senaryoları altında karbon dengeleme yükümlülüklerini hesaplamak için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu araçlar, emisyonların tahmini, bölgesel dağılımı ve geleceğe yönelik yükümlülüklerin simülasyonu gibi işlevleriyle, CORSIA'nın uygulanabilirliğini güçlendirmektedir (Sun et al., 2020; FAA, 2020).

Türkiye bağlamında gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise CORSIA'nın yerel taşıyıcılara getirdiği yükümlülükleri değerlendirmiştir. Yıldız ve Kırılı (2021), Türk havayolu sektöründe sistemin uygulanmasında veri toplama altyapısı, yetkilendirilmiş doğrulayıcı kuruluşlara erişim ve karbon piyasasına entegrasyon gibi konularda çeşitli kurumsal ve teknik zorluklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, araştırmada CORSIA'nın Türkiye'nin havacılık iklim politikalarıyla uyumlaştırılması durumunda, sektörde uzun vadeli sürdürülebilirlik fırsatları yaratabileceği ifade edilmiştir (Yıldız & Kırılı, 2021).

CORSIA'nın karbon kredileri temelli sistemi, henüz sınırlı sayıda kredi sunabilmekte ve bu durum sistemin başarısını kısıtlayabilmektedir. Reuters tarafından yapılan bir analizde, şu anda yalnızca Guyana'dan gelen kredi arzının sınırlı olduğu ve bu arzın sektörün ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalabileceği vurgulanmıştır. Bu durumun, karbon fiyatlarında ciddi dalgalanmalara ve yeşil projelere yeterli destek sağlanamamasına yol açabileceği belirtilmiştir (Reuters, 2025)

CORSIA'nın özellikle gelişmekte olan ülkelere uygulanabilirliğine dair endişeler, akademik alanda da sıklıkla ele alınmaktadır. EASA'nın desteklediği bir çalışmada, CORSIA uygulamasına yönelik teknik ve kurumsal kapasite eksikliklerinin Afrika ve Karayip ülkelerinde belirgin olduğu belirtilmiş; bu bölgelerde finansman, eğitim, veri altyapısı ve piyasa entegrasyonu gibi alanlarda ciddi geliştirme ihtiyaçları olduğu vurgulanmıştır (EASA, 2024).

CORSIA'nın karbon kredilerine dayalı yapısı, emisyonların doğrudan azaltımı yerine dolaylı olarak dengelenmesini esas alır. Bu durum, bazı akademik çalışmalarda eleştirel biçimde değerlendirilmiştir. Örneğin, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)* yayınevinde yayımlanan araştırmalarda, karbon dengeleme kredilerinin yeterliliği, fiyatlandırma şeffaflığı ve çevresel bütünlük konuları tartışılmıştır. MDPI, açık erişimli, hakemli akademik dergiler yayımlayan uluslararası bir yayınevidir ve özellikle sürdürülebilirlik, çevre politikaları ve enerji sistemleri alanlarında yoğun yayın yapmaktadır. Bu yayınevindeki çalışmalarda, CORSIA'nın sürdürülebilirlik

hedeflerine katkısının sınırlı kalabileceği; karbon piyasalarında denetim eksikliği ve “additionality” (eklik) sorununun, sistemin etkisini zayıflattığı vurgulanmıştır (Heine et al., 2022; MDPI, 2022).

Akademik projeksiyonlara dayanan diğer çalışmalar ise, CORSIA’nın küresel ısınmayı 1.5°C veya 2°C senaryolarında dengelemedeki kapasitesini tartışmıştır. Planès ve arkadaşları tarafından yapılan modelleme çalışmasında, havacılık sektöründe yalnızca dengeleme mekanizmalarına dayalı bir yaklaşımın yetersiz kalacağı, bu nedenle sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), verimli uçuş planlaması ve yeni nesil uçak teknolojileri ile desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu tür çalışmalar, CORSIA’nın uzun vadede etkili olabilmesi için sistemik bir dönüşüme ihtiyaç duyduğunu göstermektedir (Planès et al., 2021).

2.2.5. AEDT (Aviation Environmental Design Tool)

Amerikan Federal Havacılık İdaresi (FAA) tarafından geliştirilen Aviation Environmental Design Tool (AEDT), uçuş operasyonlarının çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılan entegre bir modelleme aracıdır. AEDT, uçuşun tüm aşamalarını (kalkış, tırmanış, seyir ve iniş) dikkate alarak yakıt tüketimi, karbon dioksit (CO₂), nitrojen oksit (NO_x) emisyonları ve gürültü seviyelerini hesaplayabilmektedir. AEDT, yalnızca emisyon tahminleriyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda farklı senaryolarda havaalanı kapasitesi, hava trafiği yönetimi ve operasyonel iyileştirme stratejilerinin çevresel sonuçlarını analiz etmek için de kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri’nde zorunlu çevresel etki analizlerinin (EIA) büyük bir kısmı AEDT üzerinden yürütülmekte olup, model özellikle FAA ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) iş birliklerinde kullanılmaktadır (FAA, 2021).

AEDT modeli, havalimanı operasyonlarının neden olduğu çevresel etkilerin detaylı olarak analiz edilebildiği çalışmaların başında gelmektedir. Simaiakis ve Balakrishnan (2010) tarafından yapılan araştırmada, Boston Logan Uluslararası Havalimanı’nda taksi süresini azaltmaya yönelik stratejilerin emisyon etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada, tek motorla taksi uygulamasının ve optimize edilmiş taksi yollarının CO₂ ve NO_x emisyonlarını azalttığı, AEDT modelinin bu tür operasyonel değişikliklerin çevresel çıktılar üzerindeki etkisini doğru bir şekilde ortaya koyduğu vurgulanmıştır (Simaiakis & Balakrishnan, 2010).

Reynolds, Dray ve Schafer (2007) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, farklı uçak teknolojisi gelişim senaryoları altında havacılık sektörünün uzun vadeli karbon emisyon projeksiyonları analiz edilmiştir. AEDT kullanılarak yapılan bu modelleme sürecinde, gelişmiş motor teknolojilerinin ve aerodinamik iyileştirmelerin CO₂ azaltımına olan katkısı detaylı olarak ortaya konmuştur. Çalışma, havacılığın iklim politikalarına entegrasyonu açısından modelin karar vericilere sağladığı teknik desteği öne çıkarmaktadır (Reynolds, Dray & Schafer, 2007).

Barrett, Britter ve Waitz (2010) tarafından yürütülen bir çalışmada ise AEDT, uçuş operasyonlarının neden olduğu hava kirliliğinin yer seviyesindeki etkilerini modellemek amacıyla kullanılmıştır. Boston bölgesinde yapılan uygulamada, uçaklardan kaynaklanan NO_x ve partikül

madde emisyonlarının, kent içi hava kalitesi üzerindeki dağılımı analiz edilmiştir. AEDT verileri, emisyon kaynaklarının uzamsal çözümlemesinde temel girdi olarak kullanılmıştır ve modelin, hava kalitesi modelleme sistemleriyle entegrasyon kapasitesi vurgulanmıştır (Barrett, Britter & Waitz, 2010).

National Academies of Sciences tarafından 2018 yılında yayınlanan "Enhanced AEDT Modeling of Aircraft Arrival and Departure Profiles" adlı iki ciltlik rehber çalışma, AEDT'nin uçuş profil modellerinin doğruluğunu artırmak amacıyla geliştirilmiş yöntemleri sunmaktadır. Bu çalışmada, iniş ve kalkış uçuş profillerinin (arrival/departure profiles) detaylı modellenmesiyle birlikte gürültü, yakıt tüketimi ve emisyon hesaplarında elde edilen belirsizlikler azaltılmaya çalışılmıştır. Özellikle terminal alanındaki uçuş profillerindeki küçük değişimlerin bile çevresel sonuçlar üzerinde önemli etkiler yaratabileceği vurgulanmıştır; bu da operasyonel senaryoların planlanmasında yüksek doğrulama düzeyi için AEDT profil modellerinin uyarlanmasıyla önemini göstermektedir (National Academies of Sciences, 2018).

Airport Cooperative Research Program (ACRP) tarafından finanse edilen ve 2013–2015 yılları arasında yürütülen ACRP 02-45 projesi kapsamında hazırlanan "Methodology to Improve AEDT Quantification of Aircraft Taxi/Idle Emissions" çalışması, AEDT'nin düşük itki (7 % thrust) bazlı taxi/idle evresindeki model varsayımlarının doğruluğunu test etmiştir. Araştırma, gerçek uçuş verileri ile modelin tahminleri arasındaki farkları incelemiş ve modelin kullanıcı tanımlı senaryolara uyarlanabileceğini göstermiştir. Bu sayede, özellikle ground infrastructure (örneğin apron düzenlemeleri) ve uçak motor performansı gibi gerçek koşulları yansıtan girdiler kullanıldığında AEDT'nin emisyon tahminlerinde belirgin hassasiyet artışı elde edilebilmektedir (ACRP 02-45, 2015).

Allaire et al. (2009) tarafından ATM 2009 konferansında sunulan çalışma, FAA'nın AEDT'yi bir suite içinde INM, EDMS, MAGENTA ve SAGE gibi alt bileşenlerle entegre ettiği "Araç Takımı" yapısının değerlendirmesine odaklanmıştır. Bu analiz, model girdilerine duyarlılık analizi (sensitivity analysis) ve incelenen belirsizlik kaynaklarını tanımlayarak, sistemin sunduğu çıktılarının güvenilirliğinin artması için hangi geliştirmelerin yapılabileceğini ortaya koymuştur. Eco-Modelling konusundaki bu yaklaşım, modelleme altyapısının sadece veri entegrasyonu değil, aynı zamanda sonuç güvenilirliği açısından da optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Noel, Allaire, Jacobson et al., 2009).

2.2.6. Advanced Emissions Model (AEM) – Avrupa Birliği / EUROCONTROL

EUROCONTROL tarafından geliştirilen Advanced Emissions Model (AEM), Avrupa hava sahasında gerçekleştirilen uçuşlara ilişkin karbon emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan önemli bir araçtır. Bu model, radar izleri ve uçuş planı verileri temel alınarak uçuş profili bazında CO₂, NO_x, CO ve uçucu organik bileşik (VOC) emisyonlarını yüksek uzamsal ve zamansal çözünürlükte hesaplayabilmektedir. AEM, özellikle Avrupa Birliği ülkeleri ve Avrupa Sivil Havacılık Konferansı

(ECAC) üyeleri tarafından kullanılmakta olup, AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) kapsamındaki havacılık emisyon raporlamalarının temel teknik altyapısını oluşturur. AEM, Amsterdam Modeli'nin metodolojik temellerine benzerlik gösterse de, daha gelişmiş veri bütünlüğü ve uçuş profili doğruluğu sunar (EUROCONTROL,2019) .

Bu model, özellikle hava trafik yönetimi stratejilerinin çevresel etkilerini ölçmek amacıyla birçok akademik çalışmada kullanılmıştır. Örneğin, Schäfer ve arkadaşlarının (2017) yaptığı araştırmada, AEM kullanılarak Avrupa hava sahasındaki farklı rota optimizasyonlarının CO₂ ve NO_x emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, rota kısıltmalarının ve optimize hava trafik akışının emisyonları önemli oranda azaltılabileceği gösterilmiş, bu da modelin operasyonel politika değerlendirmelerinde güvenilirliğini ortaya koymuştur (Schäfer et al., 2017).

AEM ayrıca, bölgesel hava kalitesi modelleriyle entegrasyon amacıyla da kullanılmıştır. Köhler ve meslektaşlarının (2015) çalışmasında, modelden elde edilen uçak emisyonları verileri, Avrupa'nın belirli metropol bölgelerinde hava kalitesi modellemelerinde girdiler olarak kullanılmıştır. Bu çalışma, havacılık kaynaklı emisyonların yerel hava kalitesi üzerindeki etkilerinin daha doğru tahmin edilmesine olanak tanımış ve AEM'nin geniş kapsamlı çevresel analizlerdeki önemini vurgulamıştır (Köhler et al., 2015).

AEM'nin Avrupa dışında da adaptasyon çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle Kanada ve ABD'deki hava trafik operasyonları için uyarlanma çabaları, modelin uluslararası alandaki geçerliliğini ve esnekliğini göstermektedir. Bu tür uyarlamalar, farklı hava trafik kontrol sistemlerinin ve uçak filolarının modele entegrasyonu ile çevresel etkilerin bölgesel bazda daha hassas hesaplanmasına olanak tanımaktadır (ICAO, 2014).

Bununla birlikte, AEM'nin belirsizlik analizlerine odaklanan araştırmalar da mevcuttur. Müller ve arkadaşları (2020), modelin giriş parametrelerindeki değişkenliklerin sonuçlara etkisini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, yakıt tüketimi, uçuş profili ve motor verileri gibi girdilerdeki belirsizliklerin emisyon tahminleri üzerindeki etkisi sayısal olarak ortaya konmuş ve AEM'nin bu değişkenliklere karşı dayanıklılığı analiz edilmiştir (Müller et al., 2020).

Son olarak, AEM'nin entegre simülasyon platformlarıyla kullanımı, gelecekteki havacılık politikalarının çevresel etkilerinin senaryo bazlı değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle EUROCONTROL'un FABEC (Functional Airspace Block Europe Central) ve diğer bölgesel hava sahası iş birliği projelerinde AEM, sürdürülebilir hava trafik yönetimi uygulamalarının planlanması ve izlenmesinde kilit bir araç olarak yer almaktadır (EUROCONTROL, 2021).

2.2.7. IMPACT (Integrated Aircraft Noise and Fuel Burn and Emissions Modelling Platform) Modeli

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen IMPACT modeli, sivil havacılığın iklim değişikliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılan senaryo bazlı bir modelleme aracıdır. Model, özellikle ICAO'nun Çevresel Koruma Komitesi (CAEP) kapsamında

yürütülen teknik analizlerde önemli bir rol oynamaktadır. IMPACT modeli, uçuş bazlı CO₂ ve NO_x emisyon tahminlerinin yanı sıra, alternatif yakıtların veya yeni nesil uçak teknolojilerinin uzun vadeli etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilme kapasitesine sahiptir. Model, CORSIA gibi uluslararası mekanizmaların teknik dayanağını oluşturmakta olup, ICAO'ya üye ülkeler tarafından, özellikle ulusal düzeyde karbon dengeleme stratejileri geliştirilirken kullanılmaktadır (ICAO, 2019).

Modelin küresel hava trafiği emisyonları üzerindeki uygulamaları, özellikle sera gazı salınımının uluslararası politikalarla uyumlu biçimde takip edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Lee ve meslektaşlarının (2020) çalışmasında, IMPACT modeli kullanılarak farklı senaryolar altında küresel havacılık emisyonlarının 2050 yılına kadar olan projeksiyonları yapılmıştır. Bu araştırma, teknolojik gelişmeler ve operasyonel iyileştirmelerin iklim hedeflerine ulaşmadaki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymuş ve IMPACT modelinin politika oluşturma süreçlerine güçlü katkısını göstermiştir (Lee et al., 2020).

IMPACT modeli, aynı zamanda ICAO'nun CORSIA programı kapsamında emisyon dengeleme ve azaltma stratejilerinin analizinde de önemli bir veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Chen ve arkadaşları (2018), model çıktılarının CORSIA emisyon tahminlerine entegrasyonunu inceleyerek, modelin farklı Tier seviyelerindeki veri doğruluğunu değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, IMPACT modelinin operasyonel ve envanter bazlı emisyon hesaplamalarında esnek ve güvenilir bir metodoloji sunduğunu kanıtlamıştır (Chen et al., 2018).

Bunun yanı sıra, IMPACT modelinin ulusal ve bölgesel politika analizlerinde kullanımı da literatürde yer almaktadır. Özellikle Güney Amerika ve Afrika gibi gelişmekte olan bölgelerde, modelin uyarlanması yoluyla havacılık emisyonlarının yerel etkileri ve sürdürülebilirlik stratejileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ramirez ve Lopez (2019), IMPACT modelini kullanarak Latin Amerika'daki hava trafiği gelişiminin bölgesel hava kalitesi ve karbon ayak izi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir (Ramirez & Lopez, 2019).

Modelin geliştirilmesi sürecinde gerçekleştirilen hassasiyet analizleri, model girdilerindeki belirsizliklerin çıktı üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde ortaya koymaktadır. Chevrot ve Basora'nın yaptığı çalışmada, yakıt tüketimi, uçuş mesafesi ve motor tiplerine ilişkin parametrelerin varyasyonlarının model tahminlerine olan etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Bu analizler, modelin hem küresel hem de ulusal düzeyde karar destek sistemlerinde güvenilirliğini artırmaktadır (Chevrot, & Basora, 2023).

2.2.8. GREET (Greenhouse Gases, Regulated Emissions, And Energy Use in Transportation) Modeli

GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation) modeli, Argonne National Laboratory tarafından geliştirilen bir yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) aracıdır. Havacılık sektörü özelinde bu model, özellikle sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) çevresel performansını analiz etmek için kullanılmaktadır. GREET, yalnızca uçuş sırasında

gerçekleşen emisyonları değil, yakıtın üretiminden tedarikine kadar olan tüm aşamaları (“well-to-wake”) kapsayan bir yaklaşım sunmaktadır. Model, başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere birçok OECD ülkesinde sürdürülebilir enerji politikalarının ve karbon azaltım senaryolarının teknik altlığını oluşturmaktadır (Wang, M. 2019).

Havacılık sektöründe alternatif yakıtların yaşam döngüsü emisyonlarını değerlendiren çalışmalarda GREET modeli sıkça tercih edilmektedir. Misra ve arkadaşları (2020), GREET modelini kullanarak ABD’de potansiyel biyoyakıt senaryolarının karbon emisyonu üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve biyojet yakıtlarının konvansiyonel jet A-1 yakıtına kıyasla %50’ye varan emisyon azaltımı sağlayabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, modelin düşük karbonlu yakıt politikalarının bilimsel temelini oluşturmada ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuştur (Misra et al., 2020).

Benzer şekilde Stratton ve ark. (2011), sürdürülebilir havacılık yakıtlarının çevresel etkilerini karşılaştırmak için GREET modelini kullanarak yapılan analizlerin, yakıt zinciri boyunca karbon ayak izinin yakıt türüne ve üretim yöntemine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle FT (Fischer-Tropsch) sentetik yakıtların, hammadde ve enerji kaynağına bağlı olarak negatif ya da pozitif çevresel etkilere yol açabildiği belirtilmiştir (Stratton et al., 2011).

GREET modeli sadece CO₂ emisyonları açısından değil, aynı zamanda CH₄, NO_x, PM gibi diğer düzenlenmiş emisyonları da hesapladığı için, yakıtların genel çevresel etkisini daha bütüncül bir şekilde değerlendirme imkânı sunmaktadır. Carter ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında, GREET modeli ile alternatif havacılık yakıtlarının ozon oluşum potansiyeli ve toksisite etkileri de analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, modelin sadece iklim değişikliği değil, aynı zamanda hava kalitesi politikalarına katkı sağlayacak biçimde kullanılabileceğini göstermiştir (Carter et al., 2019).

Ayrıca GREET modeli, farklı coğrafi bölgelerdeki yakıt üretim zincirlerinin karşılaştırılmasında da kullanılmıştır. Elgowainy ve meslektaşları (2018), model yardımıyla ABD, Brezilya ve Avrupa’daki biyojet yakıt üretim süreçlerini karşılaştırmış ve bölgesel farklılıkların yaşam döngüsü emisyonları üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, enerji girdileri, tarımsal verimlilik ve taşıma altyapısının emisyon sonuçlarını ciddi şekilde etkilediği belirtilmiştir (Elgowainy et al., 2018).

Havacılık dışında da yaygın olarak kullanılan GREET, entegre emisyon analiz araçlarıyla uyumlu çalışabilmesi sayesinde ICAO’nun modelleri (ör. IMPACT) veya diğer ulusal envanter sistemleriyle birlikte analiz yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Özellikle ABD Ulaştırma Bakanlığı (DOT) ve Federal Aviation Administration (FAA) gibi kurumlar, GREET çıktıları ile sürdürülebilir havacılık girişimlerinin karbon etkilerini değerlendirmektedir. Modelin açık erişimli yapısı ve düzenli güncellenmesi de akademik çevrelerde yaygın kullanılmasını desteklemektedir (Wang et al., 2021).

2.2.9. SkyBreathe Modeli

Fransız yazılım firması OpenAirlines tarafından geliştirilen SkyBreathe, gerçek zamanlı uçuş verileri ve uçuş sonrası analizler üzerinden yakıt tüketimini ve buna bağlı karbon emisyonlarını analiz etmeye yönelik ticari bir yazılımdır. Yapay zeka ve büyük veri teknolojileri kullanarak uçuş operasyonlarında iyileştirme potansiyellerini ortaya koyan SkyBreathe, Avrupa'daki Air France, Transavia ve Norwegian gibi havayollarının yanı sıra Asya-Pasifik bölgesinde de birçok firma tarafından kullanılmaktadır. Özellikle operasyonel düzeydeki davranışsal değişimlerle (örneğin motor taksi, tek motorla taksi, optimum tırmanış hızı) elde edilebilecek karbon tasarrufunu hesaplamak için etkilidir (Pardo, A. ve Alibert, B. 2018).

OpenAirlines tarafından geliştirilen, uçuş operasyonlarından elde edilen gerçek zamanlı verileri kullanarak havayollarının yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmalarına yardımcı olan bir yakıt verimliliği izleme sistemidir. Bu model, uçakların FDR (Flight Data Recorder) ve ACARS gibi veri kaynaklarından gelen büyük veri kümelerini işleyerek, uçuş öncesi, uçuş esnası ve sonrası operasyonel aşamalarda iyileştirme önerileri sunar. Temel amacı, operasyonel davranışlarda küçük değişikliklerle büyük çevresel ve ekonomik kazanımlar sağlamaktır (OpenAirlines, 2021).

Model, Avrupa merkezli birçok havayolu tarafından aktif biçimde kullanılmakta ve farklı ölçeklerdeki filolarda test edilmiştir. Air France, Transavia, Norwegian Air Shuttle ve easyJet gibi taşıyıcılar, SkyBreathe'in sağladığı veri analizleri sayesinde %2 ila %5 arasında yakıt tasarrufu ve önemli düzeyde karbon emisyonu azaltımı sağladıklarını raporlamışlardır. Bertrand ve arkadaşları tarafından yürütülen bir analizde, Air France filosunda SkyBreathe'in uygulanmasıyla 12 aylık sürede yaklaşık 15.000 ton CO₂ salımının önlendiği hesaplanmıştır (Bertrand et al., 2019).

SkyBreathe modeli, uçuşun tüm aşamalarını ayrı ayrı analiz edebildiği için çok detaylı geri bildirimler sunar. Özellikle APU kullanım süresinin kısaltılması, iniş ve kalkış profili optimizasyonları, taksi süresi azaltımı ve seyir irtifası düzenlemeleri gibi başlıklar altında iyileştirme alanları belirler. Brocard ve meslektaşlarının çalışmasında, SkyBreathe verileri ile yapılan analiz sonucunda kalkış sonrası güç azaltımı (reduced climb thrust) uygulamasının hem yakıt verimliliği hem de motor bakım maliyetlerinde olumlu etki yarattığı ortaya konmuştur (Brocard et al., 2020).

Model, yalnızca havayolu firmaları tarafından değil, havaalanı işletmecileri ve düzenleyici kurumlar tarafından da sürdürülebilir havacılık uygulamalarının izlenmesinde ve modellenmesinde kullanılmaktadır. 2022 yılında Avrupa Komisyonu'nun yürüttüğü Horizon 2020 GAIA projesinde, SkyBreathe modeli kullanılarak belirli Avrupa hava sahalarında uygulanan “yeşil yaklaşım” (green approach) senaryolarının karbon emisyonu üzerindeki etkisi araştırılmış ve iniş aşamasında optimize edilen profillerle toplam emisyonların %6-8 arasında azaltılabileceği gösterilmiştir (GAIA Project Report, 2022).

SkyBreathe'in diğer yakıt analiz sistemlerinden farkı, pilotlara doğrudan bireysel geri bildirimler sağlamasıdır. SkyBreathe uygulaması olan My Fuel Coach tarafından yapılan bir değerlendirmede, pilot bazlı performans geri bildirimlerinin, davranışsal farkındalık yaratarak

operasyonel değişimlerde önemli rol oynadığı, bu durumun da yakıt tüketimi üzerinde ölçülebilir bir azalma sağladığı vurgulanmıştır. Ayrıca modelin, filo yöneticilerine günlük, haftalık ve aylık performans raporları sunması; sürdürülebilirlik hedeflerinin ölçülmesini ve şeffaf şekilde izlenmesini kolaylaştırmaktadır (Open Airline, 2022).

2.2.10. FAST (Future Civil Aviation Scenario Software Tool) Modeli

FAST, Manchester Metropolitan University (Birleşik Krallık) tarafından geliştirilmiştir. FAST'ın bir ICAO-CAEP onaylı model olduğu ve güvenilirlik ile kullanılabilirlik açısından değerlendirildiği belirtilmektedir

FAST modeli, ICAO ile EUROCONTROL'ün ortak girişimiyle geliştirilmiş, uzun vadeli çevresel öngörü ve politika değerlendirme aracıdır. Bu araç, özellikle farklı trafik senaryolarının, yeni nesil teknolojilerin ve düzenleyici politikaların havacılık sektöründe neden olacağı CO₂ emisyon değişimlerini değerlendirmede kullanılır. Model, küresel ve bölgesel ölçekteki emisyon projeksiyonlarını farklı varsayımlar altında simüle edebilmektedir. FAST, ICAO'nun küresel çevre raporlarının ve stratejik planlarının hazırlanmasında önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (ICAO, 2016).

Bows-Larkin ve Anderson (2016), FAST modelinin sunduğu trafik artışı tahminlerinin, Paris Anlaşması'nın havacılık sektörü için koyduğu karbon bütçeleriyle nasıl örtüştüğünü değerlendirmişlerdir. Bu analiz, FAST modelinin yalnızca sektörel planlama değil, aynı zamanda iklim politikalarıyla entegrasyon açısından da önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur (Bows-Larkin & Anderson, 2016).

FAST, farklı senaryo modellerini (örneğin düşük karbon teknolojilerine hızlı geçiş, yüksek trafik büyümesi gibi) paralel olarak çalıştırarak karar vericilerin gelecekteki olası emisyon yollarını daha iyi değerlendirmesine olanak tanır. Bu özelliğiyle, uzun vadeli planlamada “en kötü durum” ve “en iyimser durum” arasında kıyaslama yapılmasını sağlar. ICAO tarafından 2022 yılında yayımlanan Çevre Raporu'nda, FAST modeli aracılığıyla oluşturulan senaryolarda karbon nötrlüğe ulaşmanın mümkün olabilmesi için sürdürülebilir havacılık yakıtlarının 2050'ye kadar %60 oranında yaygınlaşması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (ICAO, 2022).

2.2.11. OpenAP – Açık Kaynaklı Akademik Model (Global Araştırma Kullanımı)

OpenAP (Open Aircraft Performance Model), açık kaynaklı yapısı sayesinde özellikle akademik çalışmalarda kullanılan bir uçuş performans ve emisyon tahminleme modelidir. Uçak tipine, hava koşullarına ve uçuş profiline göre CO₂ ve NO_x emisyonlarını yüksek çözünürlükte hesaplayabilen bu model, kullanıcıların kendi verilerini entegre edebilmesine olanak tanınması bakımından büyük esneklik sağlar. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika'daki üniversiteler ve araştırma merkezleri tarafından tercih edilen OpenAP, şeffaflık ve erişilebilirlik ilkesi sayesinde öne çıkmaktadır (Sun, J. ve Hao, L. 2020).

OpenAP, özellikle uçuşların CO₂ ve NO_x emisyon profillerinin zamana ve yüksekliğe bağlı olarak tahmin edilmesinde tercih edilmektedir. Andersson ve Sun (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada, OpenAP kullanılarak çeşitli uçak tipleri için iniş yaklaşımı ve taksi sürelerinin emisyonlara etkisi analiz edilmiş; farklı havaalanı konfigürasyonlarında operasyonel verimlilik senaryoları test edilmiştir. Sonuçlar, modelin yüksek doğrulukla emisyon dağılımı üretebildiğini ortaya koymuştur (Andersson & Sun, 2021).

Modelin en dikkat çekici uygulamalarından biri, büyük ölçekli emisyon haritaları oluşturmada kullanılabilmesidir. Koudis ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, Avrupa hava sahasında gerçekleşen 1 milyondan fazla uçuşun verisi OpenAP ile işlenmiş ve CO₂ emisyonlarının coğrafi dağılımı modellenmiştir. Çalışma, modelin yüksek hacimli veri işleme kapasitesi sayesinde hava trafiği yönetimi ve bölgesel emisyon azaltım politikaları için güçlü bir temel sunduğunu göstermiştir (Koudis et al., 2022).

OpenAP, aynı zamanda makine öğrenmesi ile desteklenmiş emisyon tahminleme yaklaşımlarında da kullanılmaktadır. Örneğin, Nguyen ve Chen (2023) tarafından yapılan çalışmada, uçuş verilerinin sinir ağları ile modellenmesinde OpenAP çıktıları “ground truth” olarak kullanılmış ve hibrit emisyon tahmin sistemleri geliştirilmiştir. Bu, modelin sadece geleneksel hesaplamalarda değil, veri bilimi tabanlı yöntemlerde de entegre edilebilirliğini göstermektedir (Nguyen & Chen, 2023).

Modelin açık kaynaklı yapısı, birçok araştırmacının aynı altyapı üzerinde çalışmasını ve çıktıları karşılaştırabilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu da bilimsel şeffaflık, tekrar üretilebilirlik ve metodolojik tutarlılık açısından ciddi bir avantaj sunmaktadır. Lillo ve meslektaşları (2021), OpenAP modelini diğer ticari modellere kıyasla değerlendirmiş ve açık kaynak yapısının metodolojik uyumu güçlendirdiğini, özellikle emisyon regülasyonları açısından şeffaf raporlama için uygun olduğunu belirtmişlerdir (Lillo et al., 2021).

Havacılık sektörünün çevresel etkilerinin doğru şekilde değerlendirilebilmesi, farklı metodolojik yaklaşımları temel alan model ve araçların bütüncül biçimde analiz edilmesini gerektirir. Bu kapsamda modeller genellikle beş ana grupta sınıflandırılabilir: yaşam döngüsü temelli, operasyonel-performans temelli, küresel projeksiyon temelli, yazılım tabanlı ve araştırma/üniversite kökenli modeller. Her bir grup, farklı düzeylerde veri hassasiyeti ve uygulama ölçeğiyle sürdürülebilirlik politikalarının şekillendirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Yaşam döngüsü temelli modeller, bir yakıt türünün üretiminden tüketimine kadar olan tüm süreçlerdeki sera gazı emisyonlarını analiz eder. Bu tür modeller, yalnızca uçuş sırasında değil, yakıtın çıkarılması, işlenmesi, taşınması ve kullanımına kadar olan aşamaları da kapsar. Bu alandaki en yaygın modellerden biri olan GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) modeli, ABD Enerji Bakanlığı'na bağlı Argonne Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir. GREET, geleneksel ve alternatif yakıt türlerinin yaşam döngüsü analizlerini yaparak, özellikle biyoyakıt politikalarının çevresel etkilerini değerlendirmede kullanılmaktadır (Argonne

National Laboratory, 2021). Avrupa'daki karşılığı olan BioGrace ise AB'nin Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED) kapsamında geliştirilmiş ve biyoyakıtların karbon ayak izini standartlara uygun şekilde hesaplamayı amaçlamıştır (European Commission, 2017). Ayrıca GHGenius modeli, Kanada merkezli olup benzer yaşam döngüsü prensiplerine dayalı olarak, havacılık dahil olmak üzere tüm ulaşım modlarında yakıt temelli karbon analizleri sunmaktadır (Natural Resources Canada, 2019).

Operasyonel ve performans temelli modeller, doğrudan uçuş operasyonlarından elde edilen verilere dayanır ve havayolu şirketlerinin gerçek zamanlı performans ölçümlerine odaklanır. Bu kapsamda SkyBreathe, uçuş fazlarına ayrılmış analiz yaparak taksi süresi, APU kullanımı, seyir irtifası gibi parametreler üzerinden yakıt verimliliğini optimize etmeyi amaçlar (OpenAirlines, 2022). FOQA (Flight Operational Quality Assurance) ve Flight Data Analysis (FDA) sistemleri de uçuş kayıt verilerini analiz ederek operasyonel emisyonları detaylandırır. Benzer şekilde FuelPro ve FuelPlus gibi ticari araçlar, havayolu işletmelerine özel raporlama ve yakıt optimizasyon çözümleri sunar (IATA, 2019). Airbus tarafından geliştirilen NAVBLUE Descent Profile Optimizer ise iniş profili optimizasyonuna odaklanarak özellikle terminal manevra sahasında emisyon azaltımı hedeflemektedir (Airbus, 2020).

Küresel projeksiyon temelli modeller, havacılığın gelecekteki büyüme senaryolarını, trafik artışını, teknolojik gelişmeleri ve karbon azaltım stratejilerini dikkate alarak uzun vadeli öngörüler sunar. ICAO'nun geliştirdiği IMPACT modeli, uçuş ve filo verileriyle entegre çalışarak CO₂ ve NO_x emisyon tahminleri üretir (ICAO, 2020). Aynı kuruluş tarafından sunulan FAST (Forecast and Analysis Support Tool) modeli ise alternatif yakıt senaryoları, karbon dengeleme programları ve sürdürülebilirlik politikaları için emisyon eğrileri oluşturur (ICAO, 2021). Avrupa özelinde, AEM (Advanced Emissions Model) ve AERO-MS gibi sistemler, EUROCONTROL ve Avrupa Çevre Ajansı tarafından kullanılarak bölgesel senaryo modellemesine katkı sunar (EUROCONTROL, 2019; EEA, 2020). AERO2k ise bu alandaki ilk küresel emisyon envanterlerinden biri olarak ICAO'nun 2000'li yıllardaki temel referans modelidir (Eyers et al., 2005).

Yazılım tabanlı sistemler, genellikle düzenleyici kurumlar ve havacılık şirketleri tarafından kullanılan teknik yazılımlar olup, uçuş profili oluşturma, yer operasyonları emisyon hesaplama ve çevresel etki değerlendirmesi gibi işlevler sunar. AEDT (Aviation Environmental Design Tool), ABD Federal Havacılık İdaresi tarafından geliştirilen ve CO₂, NO_x, HC gibi emisyon türlerini detaylı biçimde modelleyen entegre bir araçtır (FAA, 2020). EMIT (Emission Measurement and Inventory Tool) gibi uygulamalar, özellikle havaalanı çevresel raporlamalarında kullanılırken, Flight Profile Generator (FPG) gibi yazılımlar uçuş profili bazlı emisyon senaryoları oluşturmaktadır. Bu tür sistemler, özellikle raporlama standartlarının karşılanması ve çevresel etki değerlendirme süreçlerinin desteklenmesi açısından önem arz eder.

Son olarak, araştırma ve üniversite temelli modeller, akademik çalışmaların desteklenmesi, bilimsel şeffaflık ve metodolojik açıklık sağlamak üzere açık kaynaklı biçimde geliştirilmiştir. Bu grupta yer alan OpenAP (Open Aircraft Performance Model), uçuş performansı ve emisyon tahmini

alanında birçok akademik çalışma tarafından kullanılmakta ve doğruluğu yüksek veri kümeleri sunmaktadır (Sun et al., 2020). SAGE (System for Assessing Aviation's Global Emissions) modeli ise FAA tarafından geliştirilmiş, küresel ölçekte emisyon tahminleri sunan ve IMPACT modeline öncülük eden bir araç olarak bilimsel literatürde yer alır (FAA, 2016). Bu modeller, hem yüksek hacimli veri analizleri hem de açık bilim ilkeleri açısından değerdendirildiğinde, güncel politika analizlerine de katkı sunmaktadır. Çizelge 2.1, tüm modellerin karşılaştırılabilmesine olanak tanıyacak şekilde genel hatlarıyla ele alınarak sunulmuştur.



Çizelge 2.1. Kullanılan Modellerin Genel Olarak Kıyaslanması

Model Adı	Geliştirici / Bölge	Temel Özellikler	Kapsam / Kullanım Alanı	Erişim	Veri Kaynağı / Detay Seviyesi
AMSTERDAM	Hollanda / Havaalanları	Havalimanı bazlı emisyon tahmini, iniş-kalkış odaklı	Bölgesel / Taktik planlama	Kısıtlı	Gerçek zamanlı operasyonel veriler
EDMS	ABD FAA	Emisyon + dağılım analizi (havaalanı çevresi)	Yerel hava kalitesi analizleri	Kapalı	LTO döngüsü, lokal hava durumu
AEDT	ABD FAA / ICAO destekli	Çok boyutlu çevresel analiz (gürültü + emisyon)	Küresel / Envanter + tahmin	Kısıtlı	Uçuş profili, motor verisi, hava trafik
AEM	Avrupa Birliği / EUROCONTROL	Avrupa çapında CO ₂ ve NO _x tahmini	Politik ve raporlama amaçlı	Kısıtlı	Trafik ve filo verileri
IMPACT	ICAO	Sertifikalı, küresel analiz aracı	CORSIA raporlama ve simülasyon	Kısıtlı	ICAO veri seti, operasyonel senaryolar
GREET	Argonne National Lab (ABD)	Yaşam döngüsü emisyon analizi (well-to-wheel)	Küresel yakıt zinciri analizi	Açık	Enerji taşıyıcıları, yakıt üretim aşamaları
SkyBreathe	Open Airlines (Fransa)	Operasyonel optimizasyon, uçuş bazlı CO ₂	Havayolu şirketleri için	Lisanslı	Gerçek uçuş verisi, performans ölçümleri
FAST	EUROCONTROL	Hızlı senaryo analizi ve tahminleme	Stratejik planlama	Kısıtlı	Trafik senaryoları, filo öngörülleri
OpenAP	Akademik topluluk (GitHub)	Açık kaynaklı emisyon modelleri (taslak uçuşlara dayalı)	Akademik kullanım	Açık	ADS-B, uçuş profili, uçak tipi verisi
Tier 2	IPCC	Detaylı emisyon hesaplama yöntemi	Ulusal envanter raporlaması	Açık	Yakıt tüketimi, uçak tipi, yıllık trafik
CORSIA CERT	ICAO	Standartlaştırılmış offset hesaplama yöntemi	Uluslararası uçuşlar & karbon pazarı	Kısıtlı (CERT Tool)	Operatör bazlı veri + emisyon faktörleri



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Bu çalışmanın materyalini, Türkiye’deki havacılık sektörüne odaklanarak gerçekleştirilen analizler oluşturmaktadır. Özellikle iç hat uçuşları kapsamında kullanılan farklı uçak tipleri esas alınarak veriler detaylandırılmış ve sektörel farklılıklar dikkate alınmıştır. Çalışmada, Türkiye’de iç hat pazarında aktif olarak kullanılan çeşitli uçak modelleri üzerinden değerlendirmeler yapılmış, bu sayede emisyon hesaplamalarının filo yapısına özgü olarak çeşitlendirilmesi sağlanmıştır. Havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının kapsamlı biçimde değerlendirilmesi amacıyla, uçuş operasyonlarına ilişkin nicel veriler ile bu verilere bağlı olarak geliştirilmiş hesaplama modelleri ve emisyon faktörleri kullanılmıştır. Kullanılan veri setleri, uçuş güzergâhları, frekanslar, uçuş süresi ve uçak tipi gibi değişkenlere göre sistematik biçimde sınıflandırılmış; böylece sektörel karbon ayak izinin daha sağlıklı, detaylı ve karşılaştırılabilir şekilde ortaya konulması hedeflenmiştir.

Türkiye’deki iç hat uçuşları, büyük ölçüde sık frekansla gerçekleştirilen kısa ve orta mesafeli rotalardan oluşmaktadır. Bu uçuşlar, toplam uçuş hacminin önemli bir bölümünü teşkil etmekte ve havacılık kaynaklı karbon emisyonlarının hesaplanmasında dikkate değer bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, çalışmada iç hat uçuşlarına ilişkin veriler; uçuş yoğunluğu, mesafe kategorileri, uçuş süresi ve uçak tipi gibi değişkenler temelinde yapılandırılmıştır. Ortalama emisyon değerinin belirlenebilmesi amacıyla, İstanbul Sabiha Gökçen – Adana hattında gerçekleştirilen bir uçuş örnek vaka olarak değerlendirilmiş; bu rota, mesafe ve operasyonel özellikleri bakımından iç hat uçuşlarını temsil etme niteliği taşıdığı için analize dâhil edilmiştir. Böylece, iç hat operasyonlarının emisyon profiline olan katkısı daha ayrıntılı ve karşılaştırmalı bir biçimde analiz edilebilmiştir.

3.1.1. Uçuş Rotası

İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanından, Adana Şakirpaşa Uluslararası Havalimanına yapılan bir uçuş ele alınmış olup. Uçuş sırasında açığa çıkan emisyonları hesaplamak için Tier Metodu ve CORSIA CERT hesaplama arayüzü kullanılarak kıyaslanmıştır. Bu sabit rota arasında iç hatlarda en fazla kullanılan uçak modelleri ele alınıp değerlendirilmiştir.

3.1.2. Kullanılan Uçak Tipleri ve Özellikleri

Airbus 319 Serisi

Airbus A319 dar gövdeli, kısa ve orta menzilli, çift motorlu bir ticari uçaktır. Airbus 320 ailesinin A318, A320 ve A321’den oluşan üyelerinden bir tanesidir. Airbus A318’den sonra A320 ailesinin en küçük üyesidir. Airbus bu uçağı rakip firma olan Boeing’in 737 modeline karşılık üretmiştir. 25 Ağustos 1995 yılında ilk kez gökyüzüyle buluşan Airbus A319 bundan bir yıl sonra hizmete girmiştir.

A319 beraberinde bazı ilkleri de getirmiştir. Bunlardan ilki tamamen dijital fly by wire kontrol sistemine sahip ilk yolcu uçağıdır. Bir diğer yenilik ise tamamı LCD ekranlardan oluşan (Glass Cockpit) kokpitidir. Bunların yanı sıra kompozit malzeme ile yapılmış ilk dar gövdeli yolcu uçağı olma özelliğine de sahiptir. Özellikle kısa mesafe ve yolcu sayısının daha az olduğu uçuşlar için oldukça ideal bir modeldir. Airbus A319 , 124 ila 156 yolcu kapasitesine sahiptir.

Bu uçağın boş ağırlığı 40,8 ton olup maksimum kalkış ağırlığı ise 75,5 tondur. Üretici firma motorlarda CFM international CFM56-5 series ya da yüksek performans ve düşük yakıt tüketimi ile IAE V2500'ü tercih etmiştir. V2500 motor sağladığı yakıt tasarrufu sayesinde havayolları için de bir tercih sebebi olmuştur zira birçok havayolu şirketi daha fazla kâr sağlayabilmek ve dünyamızı korumak adına düşük karbon emisyonunu hedeflemektedir. Ayrıca son teknoloji navigasyon sistemleri ile maksimum uçuş güvenliği sağlıyor (URL-7 , 2020).

Teknik özellikler olarak;

- Yolcu kapasitesi: 132
- Azami kalkış ağırlığı: 70.000 kg
- Kanat açıklığı: 34.10 m
- Gövde uzunluğu: 33.84 m
- Yerden yüksekliği: 11.76 m
- Max yakıt kapasitesi: 30.190 lt
- Azami menzil: 3.470 km

Airbus 320 Serisi

Airbus A320 ailesi Almanya, Fransa, İspanya, Birleşik Krallık ve Hollanda ortaklığından oluşan Airbus S.A.S. ailesinin kısa ve orta menzilli uçağıdır. Airbus A320 serisi A318, A319, A320, A321 ve ACJ özel jet versiyonlarından oluşur. İlk uçuşunu 1987 yılında gerçekleştiren A320 serisi fly by wire Flight control sistemini kullanan ilk yolcu uçaklarıdır. Yolcu uçakları arasında bu güne kadar 4658 adetten fazla üretilerek en büyük rakibi Boeing 737'in arkasından ikinci sıradadır. 1965 yılında üretime başlayan Boeing 737 şu ana kadar 8000'i geçmiştir.

Airbus A320, kısa ve orta menzilli ticari yolcu taşımacılığı için tasarlanmış, tek koridorlu ve dar gövdeli bir uçak modelidir. Tipik bir konfigürasyonda yaklaşık 180 yolcu kapasitesine sahip olan A320, iki kişilik kokpit ekibiyle yönetilmektedir. Uçak, 37,57 metre uzunluğa, 34,10 metre kanat açıklığına ve 11,76 metre yüksekliğe sahiptir. Kabin genişliği 3,70 metre, gövde genişliği ise 3,95 metredir. Boş ağırlığı 42.400 kilogram olan A320'nin maksimum kalkış ağırlığı 77.000 kilogramdır. Seyir hızı 0.78 Mach (yaklaşık 830 km/saat), maksimum hızı ise 0.82 Mach'a (870 km/saat) kadar ulaşabilmektedir. Uçak, 2.100 metrelik kalkış mesafesiyle operasyonel olarak esnek bir performans

sunmakta olup, maksimum yüklü menzili 5.700 kilometredir. Yakıt kapasitesi 29.680 litre (7.842 ABD galonu) olan A320, 11.887 metre (39.000 ft) tavan irtifasında uçuş gerçekleştirebilmektedir. Genellikle IAE V2500 veya CFM56-5 tipi çift motorlarla donatılan bu model, gelişmiş aerodinamik yapısı, yakıt verimliliği ve modern aviyonik sistemleriyle havacılık sektöründe oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Airbus, 2024).

Airbus 321 Serisi

Airbus A321, A320 ailesinin en uzun varyantı olup, dar gövdeli uçaklar arasında en yüksek yolcu kapasitesine sahip modellerden biridir. Yaklaşık 220 yolcu taşıma kapasitesi bulunan A321, iki kişilik kokpit mürettebatı ile işletilmektedir. Uçak, 44,51 metre uzunluğa, 34,10 metre kanat açıklığına ve 11,76 metre yüksekliğe sahiptir. İç kabin genişliği 3,70 metre, gövde çapı ise 3,95 metre olarak tasarlanmıştır. 48.200 kilogram boş ağırlığa sahip olan bu model, 93.500 kilogram maksimum kalkış ağırlığı ile yüksek taşıma kapasitesini destekler. Seyir hızı 0.78 Mach (830 km/saat) ve maksimum hızı 0.82 Mach (870 km/saat) düzeyindedir. Yakıt kapasitesi 29.680 litre (7.842 ABD galonu) olan A321, yaklaşık 5.600 kilometrelik menzile sahiptir. Kalkışta ihtiyaç duyduğu pist uzunluğu ise yaklaşık 2.180 metredir. Model genellikle IAE V2500 veya CFM56-5 tipi iki adet turbofan motorla donatılmakta olup, uçuş tavanı 11.887 metre (39.000 ft) ile sınırlandırılmıştır. Airbus A321, kapasite, verimlilik ve menzil dengesini sağlayan tasarımıyla yoğun yolcu trafiği olan hatlarda havayolu şirketlerinin tercih ettiği bir model haline gelmiştir (FlightGlobal, 2023).

Airbus'ın yeni jenerasyon dar gövde uçak ailesi, ticari havacılık sektöründe çevresel sürdürülebilirlik, operasyonel verimlilik ve yolcu konforunu bir arada sunan en başarılı tek koridorlu uçak ailesi olarak öne çıkmaktadır. Bu uçak ailesi, önceki nesil modellere kıyasla yakıt tüketiminde ve karbon emisyonlarında %20'ye varan azalma sağlarken, gürültü ayak izini %50 oranında düşürmektedir. 120 ile 244 yolcu arasında değişen kapasite seçenekleri sunan A320 ailesi, 8.700 kilometreye (4.700 deniz mili) kadar menzil kapasitesi ile kısa ve orta mesafeli uçuşlar kadar kıtalar arası seferlerde de tercih edilmektedir. Kabin tasarımı; atmosfer, konfor, iç mimari ve hizmet kalitesi açısından benzersiz bir yolcu deneyimi sunmaktadır. Ayrıca, tam uçak bağlantısı (full connectivity) ve dijital veri sistemleri ile veriye dayalı uçuş operasyonları ve yolcu hizmetleri desteklenmektedir. A320 ailesi, günümüzde %50'ye kadar Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF) kullanımıyla uçuş gerçekleştirebilmekte, 2030 yılı itibarıyla bu oranın %100'e çıkarılması hedeflenmektedir. Küresel ölçekte %60'ın üzerinde pazar payına sahip olan bu uçak ailesi, havacılık endüstrisinde "tercih edilen model" konumundadır (Airbus, 2024).

Airbus dar gövde ailesinin kıyaslaması Çizelge 3.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1. Airbus Uçak Tipi Genel Açından Kıyaslanması (URL-8, 2020)

Özellik	A318	A319	A320	A321
Kokpit Personeli	2	2	2	2
Yolcu Kapasitesi	110	130	180	220
Uzunluk	31,45 m	33,84 m	37,57 m	44,51 m
Kanat Açıklığı	34,10 m	34,10 m	34,10 m	34,10 m
Yükseklik	11,76 m	11,76 m	11,76 m	11,76 m
Kabin Genişliği	3,70 m	3,70 m	3,70 m	3,70 m
Gövde Genişliği	3,9 5 m	3,95 m	3,95 m	3,95 m
Boş Ağırlık	39.300 kg	40.600 kg	42.400 kg	48.200 kg
Maks. Boş Ağırlık	68.000 kg	75.500 kg	77.000 kg	93.500 kg
Seyir Hızı	0,78 mach (830 km/h)	0,78 mach (830 km/h)	0,78 mach (830 km/h)	0,78 mach (830 km/h)
Maksimum Hız	0,82 mach (870 km/h)	0,82 mach (870 km/h)	0,82 mach (870 km/h)	0,82 mach (870 km/h)
Maks. Yüklü Menzil	5.950 km	6.800 km	5.700 km	5.600 km
Maks. Yakıt Kapasitesi	23.860 lt / 6.300 US gal	29.840 lt / 7.885 US gal	29.680 lt / 7.842 US gal	29.680 lt / 7.842 US gal
Uçuş Tavanı	11.887 m (39.000 ft)	11.887 m (39.000 ft)	11.887 m (39.000 ft)	11.887 m (39.000 ft)
Motor Tipleri	2 × PW6122A2 × CFM56-5	2 × IAE V25002 × CFM56-5	2 × IAE V25002 × CFM56-5	2 × IAE V25002 × CFM56-5

Boeing 737-7 Serisi

Boeing 737 serisi, ticari havacılık tarihinde en çok tercih edilen ve en çok üretilen dar gövdeli yolcu uçağı ailesidir. 1960'ların sonunda hizmete giren seri, günümüzde 737-100 modelinden başlayarak 737 MAX 10 modeline kadar uzanan geniş bir varyant yelpazesine sahiptir. Uçak serisi, 85 ile 230 yolcu kapasitesi arasında farklı konfigürasyonlar sunmakta olup, kısa ve orta menzilli uçuşlar için optimize edilmiştir. 737 MAX serisi, önceki nesil 737 NG (Next Generation) modellerine kıyasla yakıt tüketiminde %14'e, toplam işletme maliyetlerinde ise %8'e varan tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca, yeni LEAP-1B motorları ve daha verimli aerodinamik yapısı sayesinde karbon emisyonları azalmış, çevresel etki minimize edilmiştir.

Bu ailenin bir üyesi olan Boeing 737-700, NG serisinin ilk modeli olarak 1990'lı yılların sonlarında hizmete girmiştir. Tipik konfigürasyonda 126 ila 149 yolcu kapasitesi sunan bu model, yaklaşık 6.370 kilometre (3.440 deniz mili) menzil ile segmentine göre oldukça verimli bir performans sergilemektedir. 737-700 modeli, CFM56-7B serisi motorlarla donatılmış olup, hem yakıt verimliliği hem de bakım maliyetleri açısından havayolları tarafından tercih edilmektedir. Uçuş tavanı 12.500 metre (41.000 ft) olan model, gelişmiş aviyonik sistemleri ve kısa pist performansı ile özellikle bölgesel ve iç hat operasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 2024 itibarıyla

10.000'in üzerinde teslimatla, Boeing 737 serisi, küresel hava yolu filolarında en yaygın kullanılan uçak ailesi olma özelliğini korumaktadır (Boeing, 2024).

Boeing 737-8 Serisi

Boeing 737-800, Boeing 737 Next Generation (NG) ailesinin en yaygın kullanılan modellerinden biri olup, dar gövdeli uçaklar arasında yüksek yolcu kapasitesi ve performansı ile öne çıkmaktadır. Uçak, yaklaşık 39,5 metre uzunluğa, 35,8 metre kanat açıklığına ve 12,5 metre yüksekliğe sahiptir. Kabin genişliği 3,54 metre, gövde çapı ise 3,76 metre olarak tasarlanmıştır. Boeing 737-800, iki kişilik kokpit mürettebatı ile işletilmekte olup, standart ekonomik konfigürasyonda yaklaşık 162 yolcu kapasitesine sahiptir; maksimum konfigürasyonda ise bu sayı 189'a kadar çıkabilmektedir. Uçak, CFM International tarafından üretilen CFM56-7B turbofan motorları ile donatılmıştır. Boş ağırlığı yaklaşık 41.000 kilogram olan modelin maksimum kalkış ağırlığı 79.000 kilogramdır. Seyir hızı 0.785 Mach (yaklaşık 840 km/saat) olan 737-800, menzil olarak yaklaşık 2.935 deniz mili (5.436 kilometre) kapasiteye sahiptir. Kalkış için gerekli pist uzunluğu ise yaklaşık 2.600 metre düzeyindedir. Bu özellikleriyle Boeing 737-800, kısa ve orta mesafe yolcu taşımacılığında ekonomik ve güvenilir bir seçenek olarak küresel havayolları tarafından yaygın şekilde tercih edilmektedir (Boeing, 2023).

Boeing 737 MAX Serisi

Boeing 737 MAX serisi, Boeing 737 ailesinin en yeni ve gelişmiş varyantı olarak 2010'ların ortasında tanıtılmıştır ve özellikle yakıt verimliliği, menzil ve yolcu kapasitesi açısından önceki nesillere göre önemli iyileştirmeler sunmaktadır. 737 MAX 8, serinin en yaygın modeli olup, yaklaşık 39.5 metre uzunluğa, 35.9 metre kanat açıklığına ve 12.3 metre yüksekliğe sahiptir. Kokpit iki kişilik mürettebat tarafından yönetilmektedir. Standart konfigürasyonda yaklaşık 178 yolcu kapasitesi ile hizmet veren uçak, maksimum 200 yolcu taşıyabilmektedir. Uçak, gelişmiş aerodinamik yapısı ve Boeing'in yeni nesil CFM International LEAP-1B turbofan motorları ile donatılmıştır. Boş ağırlığı yaklaşık 41.400 kilogram olup, maksimum kalkış ağırlığı 82.200 kilografa ulaşmaktadır. Seyir hızı 0.79 Mach (yaklaşık 842 km/saat) olan 737 MAX 8, yaklaşık 3.550 deniz mili (6.570 km) menzile sahiptir. Pist uzunluğu gereksinimi 2.200 metre civarında olup, bu sayede hem kısa hem de orta menzilli rotalarda etkin bir operasyon imkânı sağlamaktadır. Gelişmiş uçuş kontrol sistemleri ve yakıt tasarrufu odaklı tasarımı sayesinde, Boeing 737 MAX serisi, küresel havayolu filolarında ekonomik ve çevresel performansı artıran kritik bir model olarak konumlanmaktadır (Boeing, 2024).

Boeing dar gövde ailesinin kıyaslaması Çizelge 3.2'de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2. Boeing Uçak Tipi Genel Açidan Kıyaslanması

Özellik	Boeing 737-700	Boeing 737-800	Boeing 737 MAX 8
Kokpit Personeli	2	2	2
Yolcu Kapasitesi	126 (standart), max 149	162 (standart), max 189	178 (standart), max 200
Uzunluk	33,6 m	39,5 m	39,5 m
Kanat Açıklığı	35,8 m	35,8 m	35,9 m
Yükseklik	12,5 m	12,5 m	12,3 m
Kabin Genişliği	3,54 m	3,54 m	3,54 m
Gövde Çapı	3,76 m	3,76 m	3,76 m
Boş Ağırlık	36.000 kg	41.000 kg	41.400 kg
Maksimum Kalkış Ağırlığı	70.080 kg	79.000 kg	82.200 kg
Seyir Hızı	0,785 Mach (840 km/s)	0,785 Mach (840 km/s)	0,79 Mach (842 km/s)
Maksimum Hız	0,82 Mach (870 km/s)	0,82 Mach (870 km/s)	0,82 Mach (870 km/s)
Maksimum Menzil	3.365 km (1,818 nmi)	5.436 km (2,935 nm)	6.570 km (3,550 nmi)
Maksimum Yakıt Kapasitesi	Yaklaşık 20.865 litre	Yaklaşık 26.000 litre	Yaklaşık 26.000 litre
Motor Tipi	2 × CFM56-7B turbofan	2 × CFM56-7B turbofan	2 × CFM LEAP-1B turbofan
Uçuş Tavanı	12.500 m (41.000 ft)	12.500 m (41.000 ft)	12.200 (40.000 ft)

3.2. Metod

Bu çalışmada, Türkiye'deki iç hat uçuşlarına yönelik karbon emisyonlarının hesaplanması, İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı'ndan Adana Şakirpaşa Havalimanı'na gerçekleştirilen uçuşlar temel alınarak yürütülmüştür. Metodoloji, uçak tipine dayalı analiz yaklaşımına dayanmakta ve yakıt tüketimi ile yolcu yük faktörleri dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Havacılık kaynaklı karbon emisyonlarının hesaplanması ve yönetimi amacıyla geliştirilen bu yöntem, uçuş bazlı verilere dayanan sistematik bir süreci içermektedir.

Çalışmada kullanılan veriler, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün yayımladığı faaliyet raporlarından temin edilmiştir. Elde edilen veriler; uçuş mesafesi, uçak tipi, yük faktörleri, uçuş rotası ve yakıt tüketimi gibi değişkenlere göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca, havalimanlarında gerçekleşen iniş-kalkış döngüsü (LTO) süreleri ve bu aşamalarındaki enerji tüketimleri dikkate alınarak emisyon hesaplamaları için temel veri seti oluşturulmuştur. Bu sınıflandırma, uçuşlara özgü emisyon profilinin daha doğru şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Karbon emisyonlarının hesaplanmasında iki temel yaklaşım benimsenmiştir: Tier Metodu ve CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) CERT modeli. Hesaplama sürecinde hem yakıt bazlı hem de uçuş bazlı yöntemlerden yararlanılmıştır. Tier metodolojisi kapsamında, uçuşun iniş-kalkış (LTO) aşamasında meydana gelen yoğun yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyonlar ayrı bir analiz kategorisi olarak ele alınmıştır. Uçuşun seyir fazındaki yakıt

tüketimi ise, uzun mesafeli uçuşlarda emisyon yoğunluğunu azaltan bir unsur olarak değerlendirilmiştir.

CORSIA modeli ise, ICAO tarafından geliştirilen standartlara dayalı olarak emisyonların küresel ölçekte izlenmesi ve denkleştirilmesini amaçlayan bir çerçeve sunmaktadır. Her iki yöntem de çalışmanın bulgular bölümünde ayrıntılı biçimde değerlendirilmiş ve hesaplama çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan bu metodolojiler, 1.4 numaralı başlık altında detaylı şekilde açıklanmıştır.

3.2.1. Tier Yöntemi

Tier 2 metodolojisi daha fazla veri gereksinimine karşı daha hassas sonuçlar vermektedir. Havacılık alanında jet yakıtların kullanımı yaygındır ve hesaplamalar jet yakıtlı uçaklara göre yapılmıştır. Tier 2 yöntemi ise jet yakıt kullanan uçakların emisyonunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tier 2 yönteminin gerçekleştirilebilmesi için LTO sayısı ile uçak çeşitlerinin bilgisi gerekir. Bu yöntemde LTO emisyonu; LTO sayısı ile LTO Emisyon faktörünün çarpımı ile elde edilir.

Tier yöntemi, havacılık sektöründe emisyon hesaplama ve raporlama süreçlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, farklı doğruluk ve detay seviyeleri sunan çeşitli kademelerden (tier) oluşur ve havacılık sektöründe çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Aşağıda, havacılık sektöründe Tier yönteminin kullanım alanları detaylandırılmıştır:

Tier yöntemi, havacılık sektöründe emisyon hesaplama ve raporlama süreçlerinde esneklik ve doğruluk sağlar. Bu yöntem, havaalanı yönetimleri ve havacılık otoritelerinin emisyon envanterlerini oluşturmaya, çevresel etki değerlendirmeleri yapmasına ve sürdürülebilirlik stratejileri geliştirmesine olanak tanır. Farklı doğruluk seviyeleri sunarak, mevcut veri ve kaynaklara göre en uygun yöntemin seçilmesini sağlar ve böylece daha etkili çevresel yönetim uygulamaları geliştirilmesine katkıda bulunur.

3.2.2. CORSIA Yöntemi

Emisyon hesaplamaları, CORSIA'nın belirlediği standartlara uygun olarak, uçak tipi, uçuş mesafesi ve uçuş aşamaları (iniş-kalkış döngüsü ve seyir) dikkate alınarak yapılmıştır. Hesaplamaların tutarlılığı ve doğruluğunu sağlamak amacıyla ICAO tarafından geliştirilen çevrimiçi hesaplama aracı olan CORSIA CERT (CO₂ Estimation and Reporting Tool) kullanılmıştır. Bu araç, belirli uçak türleri ve operasyonel veriler üzerinden CO₂ emisyonlarını şeffaf ve karşılaştırılabilir bir şekilde hesaplamaya olanak tanımaktadır. Böylece, çalışma kapsamında farklı uçak modelleri arasında karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu uçuş operasyonları CORSIA kapsamı dışında tutulur ve CORSIA'nın izleme, raporlama, doğrulama (MRV) ya da denkleştirme gerekliliklerine tabi değildir.

CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) – ICAO Annex 16’ya göre 5 adet hesaplama yöntemi vardır;

1. A Yöntemi;
2. B Yöntemi;
3. Takoz çekme/ Takoz atma zamanı yöntemi;
4. Yakıt İkmali Yöntemi
5. Blok süre/uçuş süresi ile Yakıt Tahsisi Yöntemi

A yöntemi

A Yöntemi, uçuşa ait yakıt tüketimini belirlemek için belirli yakıt ölçümlerine dayanmaktadır. Bu kapsamda; ilgili uçuş için yakıt ikmalinin tamamlanmasından sonraki tanktaki yakıt miktarı, bir sonraki uçuş öncesi yapılan yakıt ikmal miktarı ve bu ikmalin ardından ölçülen yakıt miktarı dikkate alınır. Ancak burada önemli bir ayrım vardır: Yakıt ikmal sonrası ölçülen yakıt miktarı, uçağın kalkış için hareket ettiği (block-off) andaki miktardan farklıdır.

Eğer uçuş sonrasında herhangi bir yakıt ikmal yapılmamışsa, bu durumda doğrudan block-off andaki yakıt miktarı alternatif olarak kullanılabilir. Benzer şekilde, uçuş sonrasında bir bakım faaliyeti gerçekleşecekse, bir sonraki uçuşun verileri yerine bakım başlangıcındaki ya da uçuşun sona erdiği (block-on) andaki yakıt miktarı esas alınabilir.

Bu yöntemin bir sonraki uçuşa ait verilere dayandığı göz önünde bulundurularak, uçuş ister yurt içi ister yurt dışı olsun, ilgili tüm yakıt ölçümlerinin düzenli olarak kaydedilmesi önerilmektedir. Bu durum, emisyon hesaplamalarının doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca, işletmenin kısa süreli wet lease gibi geçici düzenlemeler kapsamında başka bir havayolu adına uçuş gerçekleştirmesi halinde, ilgili yakıt verilerinin üçüncü taraf işletmeden temin edilmesi gerekir. Bu mümkün değilse, yakıt tüketimi block-off/block-on yöntemi ile izlenmelidir.

Uçak işleticisi A yöntemine uygun olarak yakıt kullanımını hesaplamak için Denklem 3.1 kullanılmalıdır:

$$FN = TN - TN+1 + UN+1$$

Denklem 3.1

burada:

FN = Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (flight N) ilişkin olarak, A Yöntemi kullanılarak tespit edildiği üzere kullanılan yakıt miktarı (ton cinsinden);

TN = Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (başka bir deyişle, flight N) ilişkin yakıt ikmalinin tamamlanmasının ardından uçak depolarında mevcut olan yakıt miktarı (ton cinsinden)

$TN+1$ = Bir sonraki uçuşa (başka bir deyişle, flight N+1) ilişkin yakıt ikmalinin tamamlanmasının ardından uçak depolarında mevcut olan yakıt miktarı (ton cinsinden);

$UN+1$ = Bir sonraki uçuşa (başka bir deyişle, flight N+1) ilişkin olarak hacim cinsinden ölçülen ve bir yoğunluk değeri ile çarpılan toplam yakıt ikmal miktarı (ton cinsinden).

B yöntemi

Yöntem B, yakıt tüketimini belirlemek amacıyla aşağıdaki üç ölçüme dayanmaktadır: önceki uçuşun sonunda (block-on anında) uçak tanklarındaki yakıt miktarı, ilgili uçuş sonunda (block-on) tanklarda kalan yakıt miktarı ve ilgili uçuş için yapılan yakıt ikmal miktarı. Bu yöntem, tıpkı Yöntem A gibi, başka bir uçuşun verilerine dayalı olduğundan, söz konusu uçuşun yurt içi olması da mümkündür. Bu nedenle veri eksikliklerini önlemek adına, Yöntem B'yi kullanan işletmecilerin uluslararası operasyonlarda görev alan hava araçlarına ait tüm uçuşlarda (hem yurt içi hem yurt dışı) block-on anındaki yakıt miktarlarını düzenli olarak kaydetmeleri önerilmektedir. Eğer bir uçuşu, uçuş dışı bir faaliyet (örneğin bakım) şeklinde planlamışsa, işletmeci önceki uçuşun block-on verisi yerine, bu faaliyetin sonunda tanklarda kalan yakıt miktarını referans alabilir. Ayrıca, işletmeci kısa vadeli wet lease gibi geçici düzenlemeler kapsamında başka bir işletmeci adına uçuş gerçekleştirdiğinde, gerekli veriler üçüncü taraftan temin edilmelidir. Bu verilerin sağlanamaması durumunda ise, yakıt tüketimi block-off/block-on yöntemi esas alınarak izlenmelidir.

Uçak işleticisi, B Yöntemine uygun olarak yakıt kullanımını hesaplamak için Denklem 3.2 kullanılmalıdır:

$$FN = RN-1 - RN + UN$$

Denklem 3.2

FN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (başka bir deyişle, flight N) ilişkin olarak, B Yöntemi kullanılarak tespit edildiği üzere kullanılan yakıt miktarı (ton cinsinden).

RN-1: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuştan önce takoz atma zamanında bir önceki uçuşun (başka bir ifadeyle; flight N-1) sonunda uçak depolarında kalan yakıt miktarı (ton cinsinden).

RN: Uçuştan sonra takoz atma zamanında, değerlendirmeye tabi tutulan uçuşun (başka bir ifadeyle; flight N) sonunda uçak depolarında kalan yakıt miktarı (ton cinsinden).

UN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa ilişkin olarak hacim cinsinden ölçülen ve bir yoğunluk değeri ile çarpılan yakıt ikmal miktarı (ton cinsinden).

Takoz Çekme / Takoz Atma Zamanı Yöntemi

Block-off/block-on yöntemi, yakıt tüketiminin belirlenmesinde kullanılan ve iki temel ölçüme dayanan bir yöntemdir: ilgili uçuşun başlangıcında (block-off anı) ve uçuşun sonunda (block-on anı) uçak tanklarında bulunan yakıt miktarları. Genel kabul gören tanımlara göre, *block-off* terimi, uçağın kalkış öncesinde son kapının kapatılması ile ilk motorun çalıştırılması arasındaki zaman

aralığını ifade ederken, *block-on* terimi ise uçağın inişinden sonra son motorun durdurulması ile ilk kapının açılması arasındaki süreyi tanımlar. Emisyon izleme planı kapsamında, işletmecilerin yakıt ölçümünün gerçekleştirildiği kesin zaman noktasını açık biçimde tanımlamaları gerekmektedir. Eğer işletmeci, *block-off* veya *block-on* kavramlarını bu yaygın tanımların dışında bir zaman aralığı ile tanımlıyorsa, bu uygulamanın işletmenin mevcut operasyonel prosedürleriyle uyumlu olması koşuluyla, yetkili otorite tarafından onaylanması mümkündür.

Uçak işleticisi, Takoz çekme/ Takoz atma zamanı Yöntemine uygun olarak yakıt kullanımını hesaplamak için Denklem 3.3 kullanılmalıdır:

$$FN = TN - RN$$

Denklem 3.3

FN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (flight N) ilişkin olarak, Takoz çekme/ Takoz atma zamanı yöntemi ile tespit edilen kullanılan yakıt miktarı (ton cinsinden).

TN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (başka bir ifadeyle; flight N) ilişkin olarak takoz çekme zamanında uçak depolarında mevcut olan yakıt miktarı (ton cinsinden).

RN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (başka bir ifadeyle; flight N) ilişkin olarak takoz atma zamanında uçak depolarında mevcut olan yakıt miktarı (ton cinsinden).

Yakıt İkmali Yöntemi

Yakıt ikmali yöntemi, aşağıdaki ölçüme dayanır. Her uçuş öncesinde gerçekleştirilen yakıt ikmali miktarı yakıt ikmalinden önce bir veya birden fazla uçuşun gerçekleştiği durumlarda (örneğin, yakıt tanklama uygulamalarında olduğu gibi), yakıt tüketiminin farklı uçuşlara dağıtılması için düzeltme işlemleri yapılması gerekmektedir.

Bu tür durumlarda, aynı yakıt ikmaliyle gerçekleştirilen birden fazla uçuşa düşen yakıt miktarının tahsisi, her bir uçuşun blok süresine (block hour) orantılı olarak yapılmalıdır.

Bir sonraki uçuş yakıt ikmali yapmadığı sürece yakıt ikmali yapılan uçuşlar için, uçak işleticisi, Yakıt İkmali Yöntemine uygun olarak yakıt kullanımını hesaplamak için Denklem 3.4 formülü kullanılmalıdır:

$$FN = UN$$

Denklem 3.4

FN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa (başka bir deyişle, flight N) ilişkin olarak, yakıt ikmali kullanılarak tespit edildiği üzere kullanılan yakıt miktarı (ton cinsinden).

UN: Değerlendirmeye tabi tutulan uçuşa ilişkin olarak hacim cinsinden ölçülen ve bir yoğunluk değeri ile çarpılan yakıt ikmali miktarı (ton cinsinden).

Yakıt ikmali yapılmayan uçuş(lar)a (başka bir ifadeyle; flight N+1, flight N+n,) ilişkin olarak; uçak işleticisi, yakıt kullanımını, önceki yakıt ikmalinden (başka bir ifadeyle; flight N) blok süre/uçuş süresi ile orantılı olarak ayırmak için aşağıdaki formülü kullanmalıdır:

Blok Süre/Uçuş Süresi İle Yakıt Tahsisi Yöntemi

Block-saat yöntemiyle yakıt tahsisi, uçak tipine göre ortalama yakıt tüketim oranının, her bir uçuşun blok süresiyle çarpılması esasına dayanır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için, işletmecinin uluslararası uçuşlarda kullandığı her bir uçak tipi için aşağıdaki verileri toplaması gerekmektedir:

- Toplam yakıt ikmali miktarı,
- Toplam blok süresi (block hours).

Ortalama yakıt tüketim oranı, toplam yakıt ikmali miktarının toplam blok süresine bölünmesiyle hesaplanır. İşletmeci, her bir raporlama yılının sonunda, kullandığı her uçak tipi için bu ortalama oranı hesaplamalıdır.

Bu oranlar geriye dönük veriler kullanılarak hesaplanmaz ve yalnızca ilgili raporlama yılı için geçerlidir. Örneğin, 2022 yılına ilişkin ortalama yakıt tüketim oranını belirlemek için, işletmeci yalnızca 2022 yılında toplanan yakıt ikmali ve blok süresi verilerini kullanmalıdır.

Eğer işletmeci, uluslararası uçuşlar için yapılan yakıt ikmallerini iç hat uçuşlarından açık biçimde ayırt edebiliyorsa, ortalama yakıt tüketim oranı yalnızca uluslararası uçuşlara ait yakıt ikmali ve blok süresi verilerine dayalı olarak hesaplanmalıdır.

Bu metod için ortalama yakılan yakıt miktarı hesaplanarak tahmini bir miktar alınır ve hesaplama o miktar üzerinden yapılır. Tarifeli uçuşlar için uçuş rotası ve süresi ortalama aynı olduğu için bu çerçevede planlama yapılır genelde. Fakat rüzgar durumu, operasyonel sebepler ve pistin yaklaşma anındaki durumları miktar üzerinde değişikliklere sebep olabilmektedir.

Yakıt Yoğunluğu

Yakıt ölçümlerinin hacim cinsinden yapıldığı durumlarda, işletmeci, operasyonel ve emniyetle ilgili mevcut prosedürlerine uygun olarak gerçek ve/veya standart yoğunluk değerlerini kullanmalıdır. Bu, örneğin, işletmecinin prosedürlerinin ağırlık açısından kritik uçuşlarda gerçek yoğunluğu, diğer uçuşlarda ise standart yoğunluğu kullanmasını gerektirdiği durumlarda, her iki yöntemin bir kombinasyonunu içerebilir.

Bununla birlikte, standart yoğunluk kullanıldığı tüm durumlarda, kullanılan değer litre başına 0,8 kilogram olmalıdır.

İşletmeciler, yakıt yoğunluğunu belirlemede kullanılan prosedürleri emisyon izleme planında ayrıntılı biçimde açıklamakla yükümlüdür. Ayrıca, ilgili belgeleri (örneğin operasyon el kitapları) referans olarak sunmaları gerekmektedir.

Emisyon Faktörü

CO₂ emisyonlarının hesaplanması yakıt tüketim miktarı belirlendikten sonra, karbon dioksit (CO₂) emisyonları, her bir kilogram Jet-A/A1 için 3,16 kilogram CO₂ emisyon faktörü kullanılarak hesaplanır. Bu emisyon faktörü, Jet-A ve Jet-A1 ile eşdeğer yakıtlar için de geçerlidir; örneğin TS-1 ve No 3 Jet Fuel gibi yakıtlar bu kapsama dahildir.

Jet-B ve Av Gas (Aviation Gasoline) için kullanılan emisyon faktörü ise, her bir kilogram yakıt için 3,10 kilogram CO₂ olarak belirlenmiştir.

CORSIA kapsamında kullanılan emisyon faktörleri, yakıtların ortalama moleküler ağırlıkları ile yanma ürünlerine dayalı olarak hesaplanmış olup, sonuçlar iki ondalık basamağa yuvarlanarak ifade edilmiştir.

Jet kerosen (Jet-A/A1) için emisyon faktörü, yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂) miktarının hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu hesaplama, yakıtın ve yanma ürünlerinin moleküler ağırlıkları kullanılarak yapılır (Denklem 3.5):

$$Emisyon\ faktörü = \frac{CO_2'nin\ moleküler\ ağırlığı\ (g/mol)}{Yakıtın\ ortalama\ moleküler\ ağırlığı\ (\frac{g}{mol})} = \frac{523,114}{167,311} = 3,1565 \quad \text{Denklem 3.5}$$

Bu değer, iki ondalık basamağa yuvarlandığında: 3,16 kg CO₂ / kg yakıt olarak kabul edilir. Yukarda belirtilen beş adet izleme yöntemi aşağıda ki resimde özet olarak gösterilmektedir.

CORSIA ile TIER sistemleri, birbirleriyle ilişkili ancak işlevsel olarak farklı iki yapıdır. Aşağıda bu iki kavramın neyi ifade ettiği, hangi amaçlarla kullanıldıkları ve aralarındaki temel farklar açıklanmıştır:

CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation): Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından 2016 yılında geliştirilen, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2020 sonrası seviyelerde sabitlenmesini amaçlayan küresel bir karbon dengeleme ve azaltım programıdır. Temel bileşenleri:

- Emisyonların izlenmesi (Monitoring)
- Raporlanması (Reporting)
- Doğrulanması (Verification – MRV)
- Karbon denkleştirme (offsetting)

TIER Sistemi (IPCC Tier Yaklaşımı):

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) tarafından geliştirilen ve sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan kademeli metodolojik sistemdir. Tier 1 (temel), Tier 2

(orta) ve Tier 3 (ileri düzey) olmak üzere veri kalitesi ve hesaplama doğruluğu bakımından sınıflandırılır. Her sektör (enerji, ulaşım, sanayi, tarım vb.) için farklı düzeyde uygulanabilir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. CORSIA ve TIER arasında yöntemlerin kıyaslaması

Kriter	CORSIA	TIER
Amacı	Uluslararası havacılık emisyonlarını dengelemek ve azaltmak	Emisyonları hesaplamak için metodoloji belirlemek
Kurumsal Kaynak	ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)	IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
Kapsam	Sadece uluslararası ticari uçuşlar	Enerji, tarım, sanayi, atık, ulaştırma gibi tüm sektörler
Uygulama Zorunluluğu	ICAO'ya taraf ülkeler için zorunlu (aşamalı katılım sistemiyle)	Zorunlu değil; ülkeler teknik kapasitelerine göre uygun Tier düzeyi seçer
Emisyon Azaltımı	Gerçek emisyon azaltımı yapmaz, dengeleme (offset) üzerine kuruludur	Azaltım hedeflemez; yalnızca hesaplama yapar
Veri Temelli Yaklaşım	MRV (Monitoring-Reporting-Verification) sistemiyle veri toplar	Tier 1: ortalama veriler; Tier 2/3: detaylı, özgül ve saha verileri
Uygulamadaki Yöntemler	Tier yöntemlerini emisyon hesaplama sürecinde kullanır	Emisyon hesaplamaları için bağımsız bir sistemdir

CORSIA, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından 2016 yılında geliştirilen, uluslararası ticari uçuşlardan kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonlarının 2020 sonrası seviyelerde sabitlenmesini amaçlayan küresel bir karbon dengeleme ve azaltım programıdır. Bu sistem, havacılık sektöründe karbon-nötr büyümeyi desteklemeyi hedeflerken, emisyonların izlenmesi (Monitoring), raporlanması (Reporting), doğrulanması (Verification) ve karbon denkleştirme (Offsetting) olmak üzere dört temel bileşene dayanmaktadır. CORSIA kapsamında, havayolu şirketleri yıllık yakıt kullanımlarına bağlı olarak emisyonlarını belirli yöntemlerle hesaplamakta ve bu hesaplamaları doğrularak, karbon denkleştirme piyasalarına entegre olmakla yükümlü kılınmaktadır.

Bu hesaplamaların dayandığı temel yöntemlerden biri ise TIER sistemidir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilen bu sistem, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan kademeli bir metodolojiyi ifade eder. TIER sistemi, veri kalitesi ve hesaplama doğruluğuna bağlı olarak üç düzeyde uygulanmaktadır: Tier 1 (temel seviye), Tier 2 (orta seviye) ve Tier 3 (ileri seviye). Tier 1, standart emisyon faktörlerine dayanırken, Tier 2 ve Tier 3 düzeyleri daha ayrıntılı, sektör veya ülkeye özgü verilere ve ölçümlere dayalı hesaplamalar sunar. Enerji, ulaştırma, sanayi, tarım gibi birçok sektöre uygulanabilen bu sistem, emisyon envanteri oluşturma sürecinde ülkelerin teknik kapasitesine göre uygun metodolojik düzeyin seçilmesine olanak tanır.

Her ne kadar TIER sistemi, CORSIA'nın doğrudan bir parçası olmasa da, CORSIA kapsamında gerçekleştirilen emisyon hesaplamalarının temelini oluşturan bilimsel yaklaşım olarak işlev görmektedir. Bu bağlamda, TIER sistemi emisyonların nasıl hesaplanacağını belirleyen bir yöntem seti sunarken; CORSIA, bu hesaplamalar doğrultusunda emisyonların nasıl yönetileceğini ve telafi edileceğini belirleyen bir politika ve piyasa mekanizmasıdır. Başka bir ifadeyle, TIER = hesaplama yöntemi, CORSIA = uygulama ve dengeleme politikası şeklinde özetlenebilir. Bu iki yapı arasındaki ilişki, havacılık sektörünün hem bilimsel temelli ölçüm sistemlerini hem de çevresel sorumluluk odaklı politika uygulamalarını birlikte yürütmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 3.1'de belirtildiği üzere, bir uçuş öncesi ve sonrası süreçte yakıt tüketiminin hesaplanmasına yönelik farklı yöntemler görselleştirilmiştir. Uçuş öncesinde takoz koyma anındaki yakıt seviyesi 8,05 ton olup, ardından 42,00 tonluk bir yakıt ikmal gerçekleştirilmiş ve toplam yakıt seviyesi 50,00 tona ulaşmıştır. Uçuşun başlamasından önceki son ölçümde, takoz alma anında yakıt seviyesi 49,98 ton olarak kaydedilmiştir.

Uçuş sonrası süreçte ise takoz koyma anında 9,98 ton, ikmal sonrası 19,97 ton ve son olarak takoz alma anında 19,96 tonluk yakıt seviyeleri gözlemlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, beş farklı yöntemle yakıt tüketimi hesaplanmıştır:

- A Yöntemi: Tüketilen yakıt = $C - Y + X$ formülü ile 40,03 ton,
- B Yöntemi: Tüketilen yakıt = $A - W + B$ formülü ile 40,07 ton,
- Block-Off / Block-On yöntemi: $D - W$ formülü ile 40,00 ton,
- Yakıt İkmaline göre: Sadece ikmal miktarı baz alınarak 42,00 ton,

Blok Saatine Göre Tahsis: Blok süresi (480 dakika) ile ortalama tüketim oranı (0.083 ton/dk) çarpılarak 39,84 ton olarak hesaplanmıştır.

Bu yöntemler, operasyonel planlamada yakıt tüketiminin farklı kaynaklardan nasıl hesaplanabileceğini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Böylece her yöntemin potansiyel sapma ve doğruluk düzeyi analiz edilebilmektedir.

UÇUŞTAN ÖNCE				UÇUŞTAN SONRA		
A	 ~~Takoz Koyma~~	00:00 8.05 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~	+	W	 ~~Takoz Koyma~~	09:00 9.98 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~
			YÖNTEM A			
			~~Tüketilen yakıt = C – Y + X~~ 50.00 - 19.97 + 10.00 = 40.03 ton			
			YÖNTEM B			
			~~Tüketilen yakıt = A – W + B~~ 8.05 – 9.98 + 42 = 40.07 ton			
			BLOCK-OFF / BLOCK-ON			
			~~Tüketilen yakıt = D - W~~ 49.98 – 9.98 = 40.00 ton			
			YAKIT İKMALİ			
			~~Tüketilen yakıt = B~~ 42.00 ton			
			BLOK SAATİNE GÖRE TAHSİS			
			~~Blok süresi × ortalama yakıt tüketim oranı~~ 480 dakika × 0.083 ton/dakika = 39.84 ton			
B	 ~~Yakıt ikmali~~	00:40 42.00 ton ~~yakıt ikmali~~		X	 ~~Yakıt ikmali~~	09:40 10.00 ton ~~yakıt ikmali~~
C	 ~~İkmal sonrası~~	00:40 50.00 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~		Y	 ~~İkmal sonrası~~	09:40 19.97 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~
D	 ~~Takoz Alma~~	01:00 49.98 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~		Z	 ~~Takoz Alma~~	10:00 19.96 ton ~~yakıt deposu seviyesi~~

Şekil. 3.1. CORSIA metodlarının şematik gösterimi



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tier Metodu Bulguları

Jet yakıtı kullanılan uçaklar için önerilen hesaplama yöntemi Tier2'dir ve bu yöntem, bu çalışmada da kullanılmaktadır. Tier2 yönteminde emisyon hesaplamaları, LTO emisyonları (914 metre altı) ve seyir emisyonları (914 metre üstü) olarak iki ayrı kategoriye ayrılır. Bu yöntemle hesaplama yapabilmek için, uçak tipi ve LTO sayıları gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. İç hat ve dış hat uçuşları için hesaplamalar ayrı ayrı yapılır. Bu çalışmada ise yalnızca iç hat ve aktarmasız uçuşlar dikkate alınmıştır. Tier2 yöntemi için kullanılan denklemler, Denklem 4.1 (IPCC, 2006); 4.2 (EMEP/EEA, 2019); 4.3 (EMEP/EEA, 2019); 4.4 (EMEP/EEA, 2019) ve 4.5 (EMEP/EEA, 2019) olarak belirtilmiştir (Maurice ve ark., 2006).

$$E = A \times EF$$

Denklem 4.1

E: Emisyon miktarı.

A: Aktivite istatistiği.

EF: Emisyon faktörü

Denklem 4.1 emisyon miktarı hesaplamalarında kullanılan genel bir denklemdir. Bu denklemdaki emisyon faktörü, kirletici kaynağından atmosfere salınan birim aktivitedeki kirletici miktarını belirtmek için kullanılır ve kirletici kütlesinin birim aktiviteye bölümü ile ifade edilir. Örneğin; kg SO₂ / ton üretim gibi (Zeydan 2008).

$$\text{LTO Emisyonu} = \text{LTO Sayısı} \times \text{LTO için EF}$$

Denklem 4.2

$$\text{LTO Yakıt Tüketimi} = \text{LTO Sayısı} \times \text{LTO başına Tüketilen Yakıt}$$

Denklem 4.3

$$\text{Seyir Emisyonu} = (\text{Toplam Yakıt Tüketimi} - \text{LTO Yakıt Tüketimi}) \times \text{Seyir için EF}$$

Denklem 4.4

$$\text{Toplam Emisyon} = \text{LTO Emisyonu} + \text{Seyir Emisyonu}$$

Denklem 4.5

Denklemlerde kullanılan emisyon faktörleri, IPCC kılavuzuna göre Avrupa Çevre Ajansının yayınladığı Emisyon Envanter Kitapçığından alınmıştır. EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme – Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı / European Environment Agency – Avrupa Çevre Ajansı) Emisyon Envanter Rehberi, Avrupa Birliği üyesi ve aday ülkeler

için çeşitli direktiflere uygun olarak hazırlanmış, emisyon hesaplamalarında kullanılan rehber dokümandır.

4.1.1. LTO Sırasında Emisyon Miktarlarının Hesaplanması

Uçak iniş-kalkış (LTO) döngülerine bağlı emisyonların yıllık bazda hesaplanabilmesi için, her bir LTO döngüsü sırasında oluşan emisyon faktörleri (EF) ile günlük iniş-kalkış sayılarının çarpımına dayalı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yöntem, kısa süreli operasyonel verilerin yıllık toplam emisyon miktarına dönüştürülmesini sağlamak ve emisyonların ton cinsinden ifade edilmesine olanak tanımaktadır. Söz konusu hesaplamaya ilişkin formülasyon aşağıda denklem 4.6'da sunulmuştur.

$$E = EF(kg \text{ LTO}) \times A(LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \quad \text{Denklem 4.6}$$

Aktarmasız iç hat seferlerinde kullanılan uçak tipleri ve yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonların LTO'daki emisyon faktörleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir (Euro Control, 2023). B737 uçak tipi İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanından, Adana Havalimanına günde 1 sefer yapmıştır. Buna göre LTO (Landing & Takeoff) sayısı 1'dir. Emisyon hesaplarında aktivite değeri olarak LTO sayıları alınmıştır. Uçak tiplerinin ve kirleticilerin LTO emisyon faktörleri 2018 yılında yayınlanan ve 2023 yılında güncellenen EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) / EEA (European Environment Agency) Emisyon Envanteri Rehber Kitabından alınmıştır. Bu rehber kitaba göre aktarmasız iç hat seferlerinde kullanılan uçak tipleri ve yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonların LTO'daki emisyon faktörleri aşağıda belirtildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Uçak tipine göre emisyon faktörü (kg/ton) (Euro Control, 2018)

Uçak Tipi	Yolcu Kapasitesi	CO ₂	NO _x	CO	HC	H ₂ O	PM _{2.5}	Tüketilen Yakıt (kg/LTO)
A318	132	2750,7	10,8	5,5	0,1	1074,1	0,1	873,3
A319	156	2169,8	7,5	9,5	2,0	847,2	0,1	688,8
A320	180	2750,7	10,8	5,5	0,1	1074,1	0,1	873,3
A321	236	2750,7	10,8	5,5	0,1	1074,1	0,1	873,3
A330	440	5934,6	27,6	13,0	1,0	2317,3	0,1	1884
B737	149	2454,2	9,1	8,0	0,9	958,4	0,1	779,2
B738	189	2775,5	12,3	7,1	0,7	1083,8	0,1	881,1
B777	491	7588,0	63,3	17,7	2,0	2962,9	0,1	2409

LTO sırasında tüketilen yakıtın miktarı:

$$E_{yakıt} = 881,1 \left(\frac{kg}{LTO} \right) \times 1 \left(\frac{LTO}{gün} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{yakıt} = 322 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarı:

$$E_{CO_2} = 2776 (kg \text{ LTO}) \times 1 (LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO_2} = 1014 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan NO_x emisyonu miktarı:

$$E_{NO_x} = 12,3 (kg \text{ LTO}) \times 1 (LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{NO_x} = 4,49 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan CO emisyonu miktarı:

$$E_{CO} = 7,1 (kg \text{ LTO}) \times 1 (LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO} = 2,59 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan HC emisyonu miktarı:

$$E_{HC} = 0,7 (kg \text{ LTO}) \times 1 (LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{HC} = 0,25 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan H₂O emisyonu miktarı:

$$E_{H_2O} = 1084 (kg \text{ LTO}) \times 1 (LTO \text{ gün}) \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{H_2O} = 396 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan PM_{2.5} emisyonu miktarı:

$$E_{PM_{2.5}} = 0,1 \text{ (kg LTO)} \times 1 \text{ (LTO gün)} \times \frac{1 \text{ yıl}}{365 \text{ gün}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{H_2O} = 0,04 \text{ ton/yıl}$$

Aynı örnek üzerinden Airbus 320 uçak tipi için ele alındığında;

$$E_{yakıt} = 873,3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{LTO}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{LTO}}{\text{gün}} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{yakıt} = 319 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarı:

$$E_{CO_2} = 2751 \left(\frac{\text{kg}}{\text{LTO}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{LTO}}{\text{gün}} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO_2} = 1004 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan NO_x emisyonu miktarı:

$$E_{NO_x} = 10,8 \left(\frac{\text{kg}}{\text{LTO}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{LTO}}{\text{gün}} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{NO_x} = 3,94 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan CO emisyonu miktarı:

$$E_{CO} = 5,5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{LTO}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{LTO}}{\text{gün}} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO} = 2,00 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan HC emisyonu miktarı:

$$E_{HC} = 0,1 \left(\frac{kg}{LTO} \right) \times 1 \left(\frac{LTO}{gün} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{HC} = 0,03 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan H₂O emisyonu miktarı:

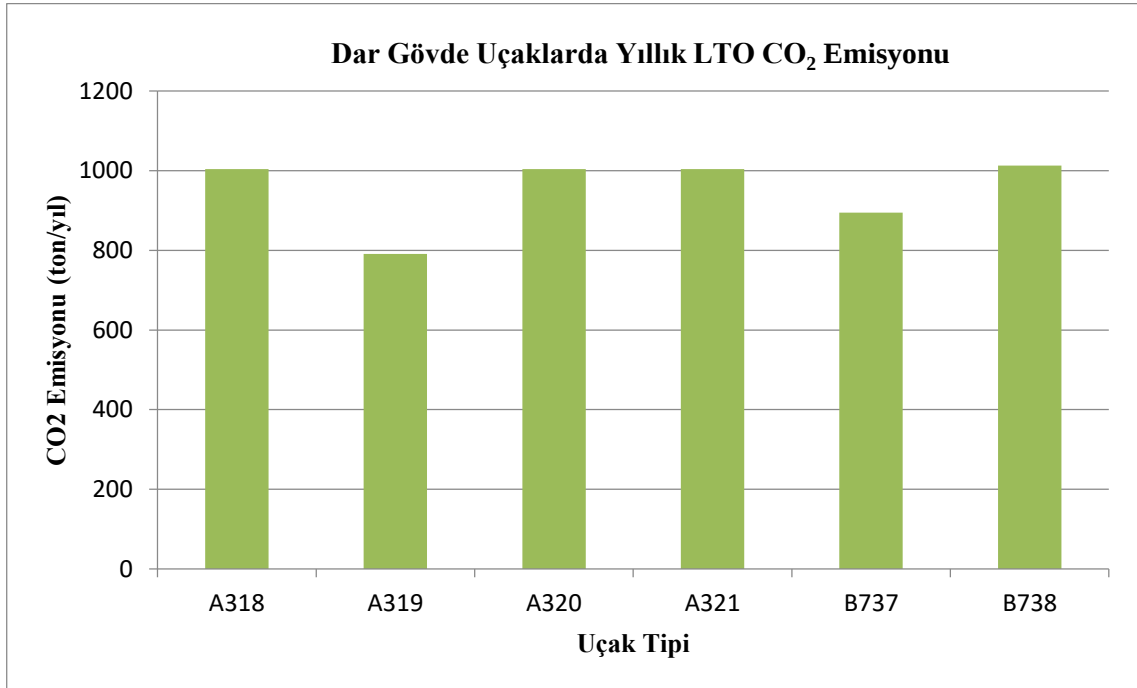
$$E_{H_2O} = 1074 \left(\frac{kg}{LTO} \right) \times 1 \left(\frac{LTO}{gün} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{H_2O} = 392 \text{ ton/yıl}$$

LTO sırasında tüketilen yakıttan kaynaklanan PM_{2,5} emisyonu miktarı:

$$E_{PM_{2,5}} = 0,1 \left(\frac{kg}{LTO} \right) \times 1 \left(\frac{LTO}{gün} \right) \times \frac{365 \text{ gün}}{1 \text{ yıl}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{H_2O} = 0,04 \text{ ton/yıl}$$

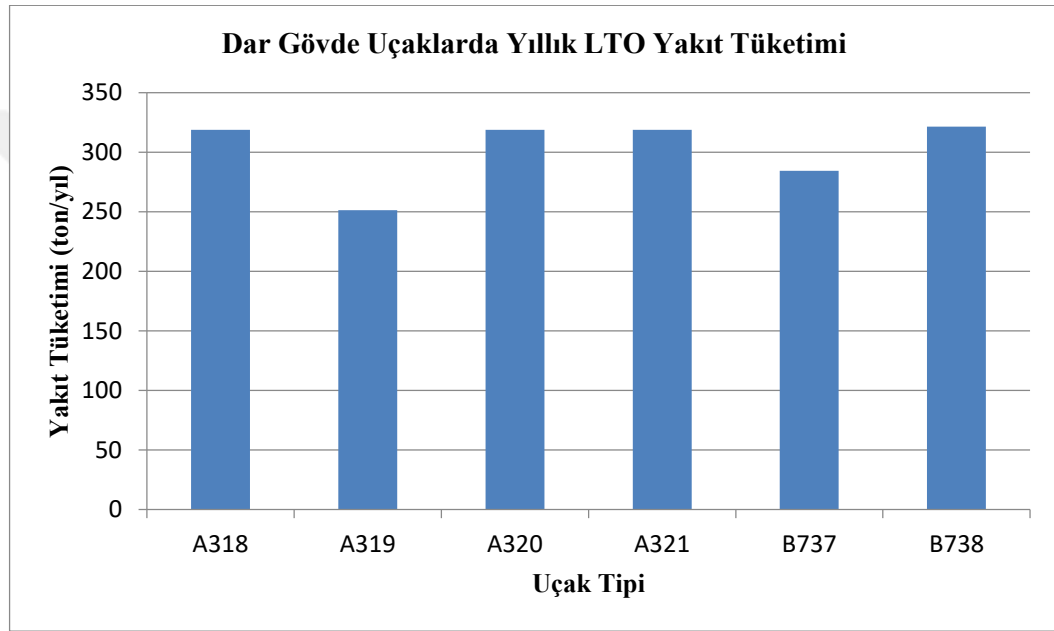


Şekil 4.1. İç Hatlarda Kullanılan Uçak Tiplerinde Yıllık CO₂ Emisyonu (LTO) Başına

Tüm uçaklarda 1 ton yakıt tüketimi karşılığında yaklaşık 3,15 ton CO₂ emisyonu oluşuyor. Bu, standart karbon emisyon katsayısıdır (yaklaşık 3,15 kg CO₂/kg yakıt) ve yakıtın karbon içeriğine dayalı sabit bir çarpandır.

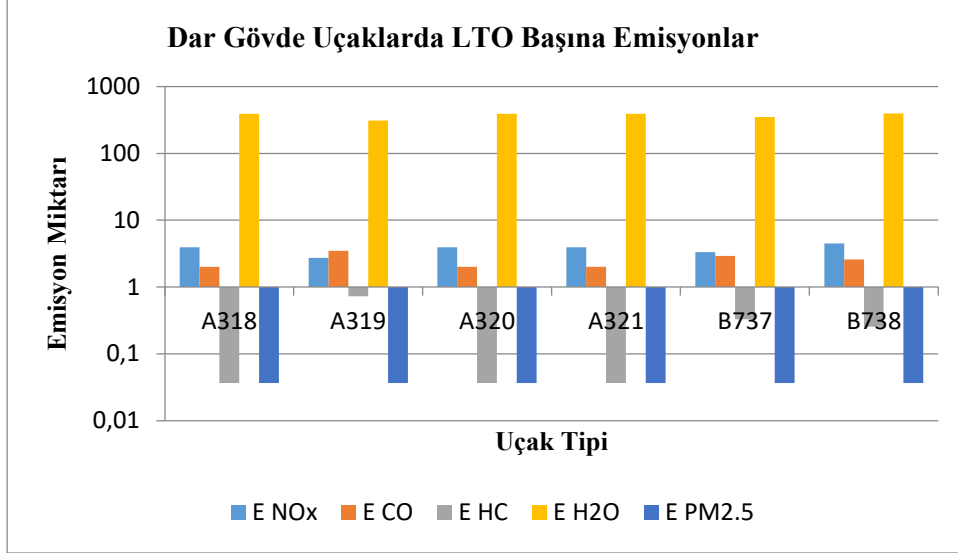
A319, 251,41 ton/yıl yakıt tüketimiyle ve 791 ton/yıl CO₂ emisyonuyla en düşük değerlere sahip dar gövde uçaktır. Bu nedenle kısa mesafeli ve daha düşük yoğunluklu hatlarda çevresel açıdan avantajlıdır (şekil 4.1).

B738, 321,60 ton/yıl yakıt tüketimi ve 1013 ton/yıl CO₂ emisyonuyla en yüksek değerlere sahip uçaktır. A320 ve A321 ise onu hemen takip etmektedir. Bu uçaklar daha fazla yolcu taşıdığı için emisyonun da daha yüksek olması doğaldır.



Şekil 4.2. İç Hatlarda Kullanılan Uçak Tiplerinde Yıllık Yakıt Sarfıyatı (LTO) Başına

A321, 236 koltuk kapasitesiyle aynı yakıtla daha fazla yolcu taşıdığı için hem yakıt/yolcu (1,35 ton) hem de CO₂/yolcu (4,25 ton) oranında en verimli uçaktır. Daha uzun gövdeli ama dar gövde sınıfında olan bu uçak, çevresel açıdan en avantajlı görünüyor. A318, en düşük yolcu kapasitesine (132) sahip olduğu için kişi başına düşen emisyon ve yakıt değerleri çok daha yüksektir. CO₂/yolcu oranı 7,61 ton ile en yüksek değerdir. Bu da kısa menzilli ve düşük dolulukla çalıştırıldığında çevresel verimliliğinin oldukça düşük olduğunu gösterir (şekil 4.2).



Şekil 4.3. Dar Gövde Uçaklarda LTO Başına Yıllık Emisyon Miktarları

Dar gövde uçaklar arasında en yüksek NO_x emisyonu 4,4895 ton/yıl ile B738 modelinde gerçekleşmiştir. Bu değeri sırasıyla A318, A320 ve A321 modelleri 3,942 ton/yıl ile takip etmektedir. B737 modelinde NO_x emisyonu 3,3215 ton/yıl, A319 modelinde ise 2,7375 ton/yıl olarak kaydedilmiştir.

En yüksek CO emisyonu 3,4675 ton/yıl ile A319 modelinde gözlemlenmiştir. Bunu 2,92 ton/yıl ile B737, 2,5915 ton/yıl ile B738 takip etmektedir. A318, A320 ve A321 modelleri eşit olarak 2,0075 ton/yıl CO emisyonuna sahiptir.

HC emisyonları içinde en yüksek değer 0,73 ton/yıl ile A319 modeline aittir. Bunu 0,3285 ton/yıl ile B737 ve 0,2555 ton/yıl ile B738 takip etmektedir. A318, A320 ve A321 modellerinde HC emisyon değeri eşit şekilde 0,0365 ton/yıl olarak ölçülmüştür.

En yüksek H₂O emisyon değeri 395,587 ton/yıl ile B738 modeline aittir. Bunu sırasıyla A321, A320 ve A318 modelleri 392,046 ton/yıl ile takip etmektedir. B737 modeli 349,816 ton/yıl, A319 modeli ise 309,228 ton/yıl H₂O emisyonu üretmektedir.

Tüm dar gövde uçak modellerinde PM_{2.5} emisyon değeri eşit olup 0,0365 ton/yıl olarak kaydedilmiştir(şekil 4.3).

4.1.2. 100 km de Tüketilen Yakıt Miktarının Hesaplanması

Öncelikle işlemi yapılacak uçak tipinin maksimum yakıt kapasitesi ve bu kapasite ile gittiği maksimum menzilden 100 km’de ne kadar yakıt tükettiği bulundu. Bu işlem için her uçak tipinin kendi internet adresinden litre (lt) olarak maksimum yakıt kapasitesi ve km olarak maksimum menzil bilgileri alınmıştır. Yapılan işlemde uçak yakıtı olarak bilinen kerosenin yoğunluğu 0.8 kg/l alınmıştır (URL-11, 2016).

Airbus ailesinin ortalama saatlik yakıt tüketim verileri ile beraber maksimum tank kapasitesi ve maksimum menzil verileri aşağıda Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Airbus, resmi web sitesinde ve

teknik belgelerinde genellikle uçaklarının performans özellikleri, yakıt verimliliği çözümleri ve operasyonel iyileştirmeleri hakkında bilgiler sunar. Örneğin, Airbus'ın yakıt verimliliği çözümleri sayfasında, uçakların yakıt tüketimini izleme ve yönetme konusundaki yazılım çözümleri hakkında bilgiler bulunmaktadır.

Ancak, spesifik saatlik yakıt tüketimi gibi detaylı veriler genellikle Airbus tarafından halka açık olarak paylaşılmaz. Bu tür bilgiler, genellikle havayolu şirketlerinin operasyonel verilerinde, uçuş simülasyonlarında bulunabilir.

Çizelge 4.2. Airbus uçaklarının yakıt ve menzil verileri. (Kühn. M, 2023)

Uçak Modeli	Saatlik Yakıt Tüketimi (kg/saat)	Maksimum Yakıt Kapasitesi (litre)	Maksimum Menzil (km)
A318	2.742	23.860	5.750
A319	2.445	29.660	6.950
A320	2.430–2.532	24.210	6.300
A321	2.582–2.885	30.030	7.400

Boeing uçaklarının yakıt tüketimi, maksimum yakıt kapasitesi ve menzil verileri, genellikle uçak üreticisinin resmi teknik dökümanlarından veya sektörel raporlardan elde edilen verilere dayanmaktadır. Bu tür bilgiler, Boeing'in resmi web sitesinde ve uçuş simülasyonları gibi kaynaklarda yer alabilir, ancak doğrudan yayınlanmış veriler çoğu zaman daha özel raporlarda bulunur. Örneğin, Boeing 737 ve Boeing 777 ailelerinin saatlik yakıt tüketimi, maksimum yakıt kapasitesi ve menzil bilgileri, endüstri genelindeki raporlardan ve akademik çalışmalardan derlenmiş olup, daha önce paylaşılan Çizelge den alınan verilere dayanmaktadır (Çizelge 4.3). Bu veriler, uçakların operasyonel verimliliği, yolcu taşıma kapasitesi ve uzun menzil hedefleri gibi faktörlerle birlikte analiz edilmiştir.

Çizelge 4.3. Boeing uçaklarının yakıt ve menzil bilgileri (Kühn. M, 2023)

Uçak Modeli	Saatlik Yakıt Tüketimi (kg/saat)	Maksimum Yakıt Kapasitesi (litre)	Maksimum Menzil (km)
B737-700	2.300	26.020	6.370
B737-800	2.500	26.020	5.665
B737 MAX 8	2.540	20.865	6.570

Örneğin; B737 tipi bir uçak maksimum 26020 litre kapasite ile maksimum 5665 km gidebilmektedir. Bu uçak tipinin yıllık olarak 100 km'de tüketebileceği ton olarak yakıt kapasitesi:

$$K\ddot{u}tle = Yoğ\ddot{u}nluk (kg/lt) \times Hacim(lt) \times \frac{1 ton}{1000 kg} \quad \text{Denklem 4.7}$$

B737 uçak tipinin ton kütle biriminden maksimum yakıt tüketimi:

$$K\ddot{u}tle_{B737} = 0,8 \left(\frac{kg}{lt} \right) \times 26020(lt) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$K\ddot{u}tle_{B737} = 20,8 ton/yıl$$

B737 uçak tipinin günde 100 km sefer yapacak şekilde tükettiği yıllık yakıt miktarı
(Yakıt_{B737}):

$$Yakıt_{B737} = 20,8 (ton/g\ddot{u}n) \times \frac{100(km)}{5665(km)} \times \frac{365 g\ddot{u}n}{1 ton}$$

$$Yakıt_{B737} = 134 ton/yıl$$

Aynı rnek A320 tipi uçak için ele alındığında;

$$K\ddot{u}tle_{A320} = 0,8 \left(\frac{kg}{lt} \right) \times 24210(lt) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$K\ddot{u}tle_{A320} = 19,36 ton/yıl$$

A320 uçak tipinin günde 100 km sefer yapacak şekilde tükettiği yıllık yakıt miktarı
(Yakıt_{A320}):

$$Yakıt_{A320} = 19,36 \left(\frac{ton}{g\ddot{u}n} \right) \times \frac{100(km)}{6300(km)} \times \frac{365 g\ddot{u}n}{1 ton}$$

$$Yakıt_{A320} = 112,16 ton/yıl$$

4.1.3. Seyir Halindeki Emisyon Miktarlarının Hesaplanması

Toplam tüketilen yakıt miktarı (TTY) Denklem 4.8 kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$TTY = Yakıt \times Sefer Uzunluğu \times LTO$$

Denklem 4.8

burada:

Y_{B737}: 100 km’de tüketilen yakıt miktarı (ton)

Sefer Uzunluğu: Sabiha Gökçen Havalimanı'ndan Çukurova Havalimanına olan mesafe (SAW→ADA) 670 km

Denklem 4.9 kullanılarak her uçak tipinin seyir halinde tükettiği yakıt miktarı bulunmuştur.

$$\text{Seyir halinde tükettiği yakıt} = \text{TTY} - E_{LTO} \quad \text{Denklem 4.9}$$

Eşitlik 4.10 kullanılarak uçakların seyir halinde tükettiği yakıttaki emisyon miktarı ve kirleticilerin emisyon miktarı bulunmuştur.

$$E_{\text{Seyir}} = EF_{\text{Seyir}}(\text{kg/ton}) \times \text{Seyir halinde tüketilen yakıt (ton)} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \quad \text{Denklem 4.10}$$

Seyir halindeki emisyon faktörleri de 2013 yılında yayınlanan ve 2023 yılında güncellenen EMEP/EEA Emisyon Envanteri Rehber Kitabından alınmıştır. Seyir hali emisyon faktörleri her bir uçak tipi için ayrı verilmemiştir. Çizelge 4.4'te seyir için kullanılan emisyon faktörleri yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Ortalama filo için seyir halinde kullanılan emisyon faktörleri (EMEP Guide Book, 2023)

Kirletici	CO ₂	N ₂ O	CO	NO _X	NM _{VOC}	SO ₂	PM _{2.5}
EF (kg/ton)	3150	0.1	2	10.3	0.1	1	0.2

İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanından, Çukurova Havalimanına giden B737 uçak tipi için seyir halinde tüketilen yakıt:

$$\text{Toplam tüketilen yakıt miktarı SAW} \rightarrow \text{ADA} = \frac{134 (\text{ton/yıl})}{100 (\text{km})} \times 670 (\text{km}) \times 1$$

$$\text{Toplam tüketilen yakıt miktarı SAW} \rightarrow \text{ADA} = 898 \text{ ton/yıl}$$

$$\text{Seyirde tüketilen yakıt} = (898 \text{ ton/yıl}) - (322 \text{ ton / yıl})$$

$$\text{Seyirde tüketilen yakıt} = 576 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı:

$$E_{\text{CO}_2} = 3150 (\text{kg/ton}) \times 576 (\text{ton/yıl}) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{\text{CO}_2} = 1817 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan N₂O emisyon miktarı:

$$E_{N_2O} = 0,1(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{N_2O} = 0,058 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan CO emisyon miktarı:

$$E_{CO} = 2(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{CO} = 1,15 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan NO_x emisyon miktarı:

$$E_{NO_x} = 10,3(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{NO_x} = 5,94 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan NMVOC emisyon miktarı:

$$E_{NMVOC} = 0,1(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{NMVOC} = 0,058 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan SO₂ emisyon miktarı:

$$E_{SO_2} = 1(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{SO_2} = 0,577 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan PM_{2,5} emisyon miktarı:

$$E_{PM_{2,5}} = 0,2(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{PM_{2,5}} = 0,12 ton/yıl$$

İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanından, Çukurova Havalimanına giden A320 uçak tipi için seyir halinde tüketilen yakıt:

$$\text{Toplam tüketilen yakıt miktarı SAW} \rightarrow \text{ADA} = \frac{112,16 (\text{ton/yıl})}{100 (\text{km})} \times 670 (\text{km}) \times 1$$

$$\text{Toplam tüketilen yakıt miktarı SAW} \rightarrow \text{ADA} = 752 \text{ ton/yıl}$$

$$\text{Seyirde tüketilen yakıt} = (752 \text{ ton/yıl}) - (319 \text{ ton / yıl})$$

$$\text{Seyirde tüketilen yakıt} = 433 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı:

$$E_{CO_2} = 3150 \frac{\text{kg}}{\text{ton yakıt}} \times 433 \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}} \right) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO_2} = 1364 \text{ ton /yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan N₂O emisyon miktarı:

$$E_{N_2O} = 0,1 (\text{kg/ton}) \times 433 (\text{ton/yıl}) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{N_2O} = 0,043 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan CO emisyon miktarı:

$$E_{CO} = 2 (\text{kg/ton}) \times 433 (\text{ton/yıl}) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{CO} = 0,86 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan NO_x emisyon miktarı:

$$E_{NO_x} = 10,3 (\text{kg/ton}) \times 433 (\text{ton/yıl}) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{NO_x} = 4,46 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan NMVOC emisyon miktarı:

$$E_{NMVOC} = 0,1 (\text{kg/ton}) \times 433 (\text{ton/yıl}) \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$E_{NMVOC} = 0,043 \text{ ton/yıl}$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan SO₂ emisyon miktarı:

$$E_{SO_2} = 1(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{SO_2} = 0,43 ton/yıl$$

Seyirde tüketilen yakıttan kaynaklanan PM_{2,5} emisyon miktarı:

$$E_{PM_{2,5}} = 0,2(kg/ton) \times 576(ton/yıl) \times \frac{1 ton}{1000 kg}$$

$$E_{PM_{2,5}} = 0,087 ton/yıl$$

İç hatlarda ticari amaçla kullanılan bütün dar gövdeli uçaklar için hesaplamalar ayrıntılı şekilde Çizelge 4.5’de paylaşılmıştır.

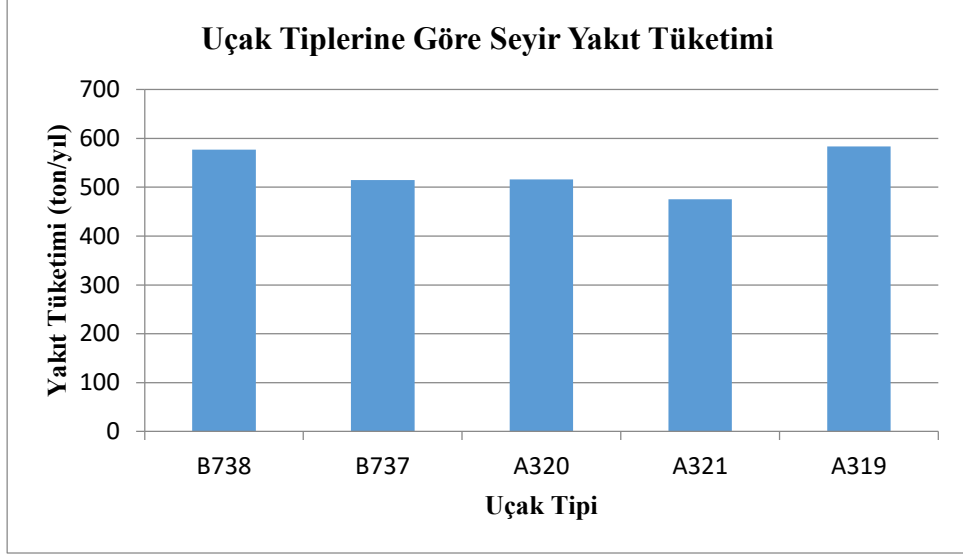
Çizelge 4.5. Uçak Tiplerine Tier 2 Metoduyla LTO İçin Hesaplanan Emisyon Parametreleri

Uçak tipi	E yakıt (ton/yıl)	E CO ₂	ENox	ECO	EHC	E H ₂ O	EPM _{2,5}
A318	318,75	1004	3,942	2,00	0,036	392,04	0,03
A319	251,41	791	2,73	3,46	0,73	309,22	0,03
A320	318,75	1004	3,94	2,00	0,03	392,04	0,03
A321	318,75	1004	3,94	2,00	0,03	392,04	0,03
A330	687,66	2166	10,07	4,74	0,36	845,81	0,03
B737	284,40	895	3,321	2,92	0,32	349,81	0,03
B738	321,60	1013	4,48	2,59	0,25	395,58	0,03
B777	879,28	2769	23,10	6,46	0,73	1081,45	0,03

A319 modeli 583,50 ton/yıl ile en yüksek seyir yakıt tüketimine sahip uçaktır. A321, 475,17 ton/yıl ile en düşük yakıt tüketimine sahip uçak tipidir. A321’in daha büyük ve daha uzun menzilli olmasına rağmen bu verimlilik, yeni nesil motorlara ve aerodinamik tasarımlara bağlı olabilir.

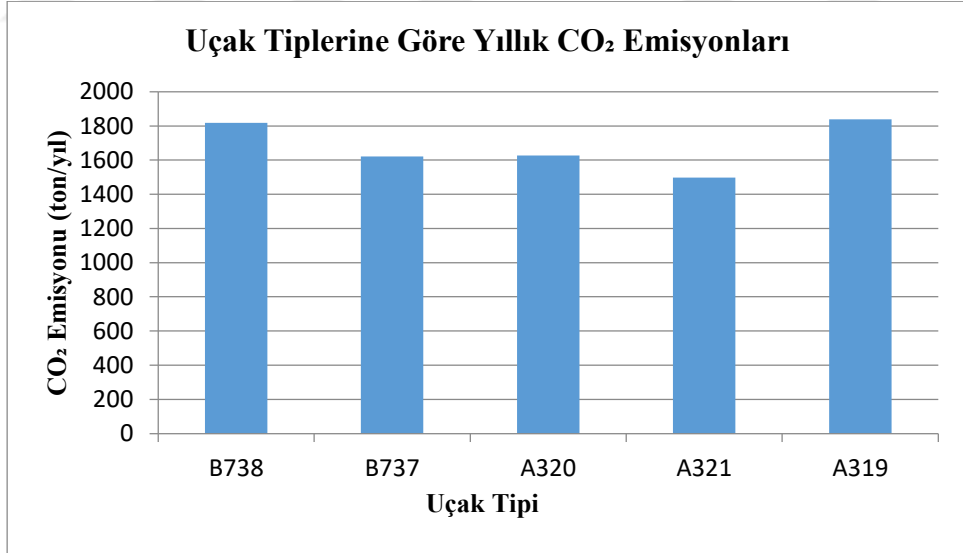
Boeing 737 ailesi (B738 ve B737), sırasıyla 576,99 ve 514,73 ton/yıl tüketmektedir. Özellikle B738’in A319’a benzer şekilde yüksek tüketimi dikkat çekmektedir (şekil 4.4).

Airbus 320 ailesi (A319, A320, A321) ise çok daha geniş bir performans aralığı göstermektedir. A319 ile A321 arasında yaklaşık 100 ton/yıl fark vardır.



Şekil 4 4. Uçak Tiplerine Göre Seyirde Yakıt Tüketimi

Şekil 4.5'te, farklı uçak tiplerine ait yıllık CO₂ emisyonları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. En yüksek CO₂ emisyonu, 1838,04 ton/yıl ile A319 modeline aittir. Bunu 1817,54 ton/yıl ile B738 takip etmektedir. A320 ve B737 modelleri sırasıyla 1625,92 ve 1621,42 ton/yıl CO₂ salımı ile benzer değerlere sahiptir. En düşük CO₂ emisyonu ise 1496,80 ton/yıl ile A321 modelinde gözlemlenmektedir.

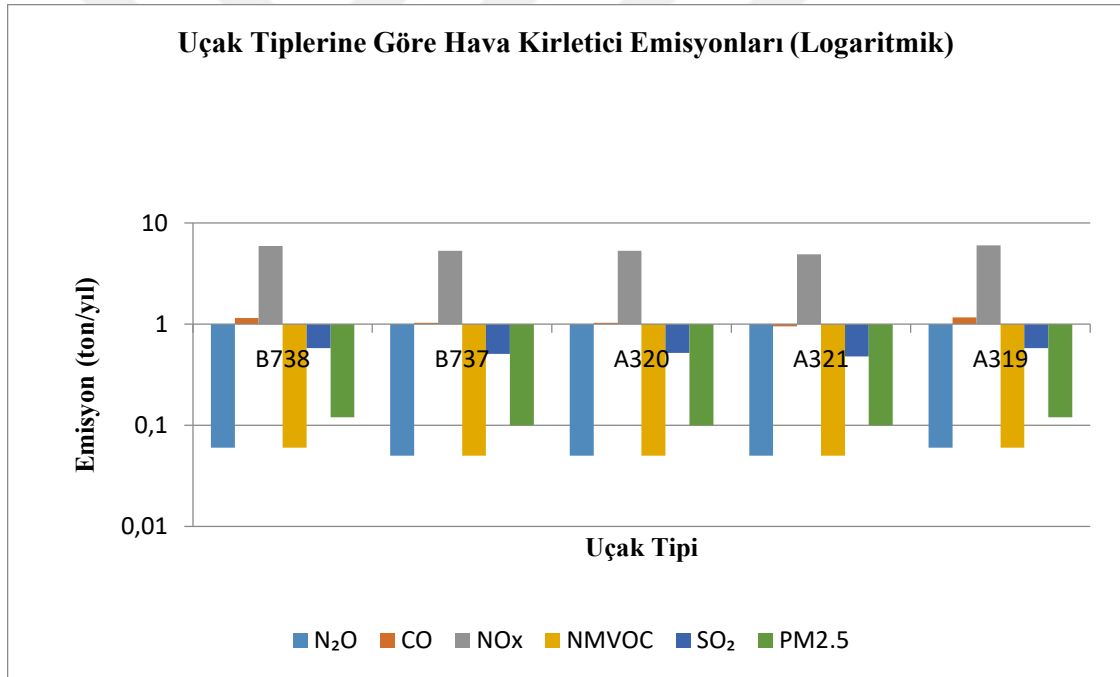


Şekil 4.5. Uçak Tiplerine Göre Yıllık CO₂ Emisyonları

İstanbul Sabiha Gökçen – Adana Şakirpaşa uçuş hattı özelinde gerçekleştirilen çalışmada (şekil 4.6), Uçak tipi bazında incelenen hava kirletici emisyon verileri, altı farklı kirletici türüne (N₂O, CO, NO_x, NMVOC, SO₂ ve PM_{2.5}) ilişkin olarak karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktadır. Logaritmik ölçekte oluşturulan grafik, kirleticilerin birbirine kıyasla geniş bir değer aralığında dağıldığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, NO_x emisyonları tüm uçak

tiplerinde açık ara en yüksek seviyede gerçekleşmekte olup, 4,89–6,01 ton/yıl aralığında ölçülmüştür. En yüksek NO_x emisyonu 6,01 ton/yıl ile A319 modelinde kaydedilmiş; bunu 5,94 ton/yıl ile B738 takip etmiştir. Bu durum, azot oksitlerin uçuş esnasındaki motor içi yanma sıcaklığı ve basıncı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Karbon monoksit (CO) emisyonları, 0,95–1,17 ton/yıl aralığında değişmekte olup, A319 bu kirleticide de en yüksek değeri (1,17 ton/yıl) sergilemiştir. En düşük CO emisyonu ise A321 modeline aittir. Bu model ayrıca birçok kirletici türünde düşük seviyeler göstermiştir. Kükürtdioksit (SO₂) emisyonları açısından değerlendirildiğinde, A319 ve B738 modelleri 0,58 ton/yıl ile en yüksek seviyeye ulaşırken, A321 bu kirleticinin de en düşük salımını (0,48 ton/yıl) gerçekleştirmiştir. Azot protoksit (N₂O) ve uçucu organik bileşikler (NMVOC) emisyonları ise tüm uçak tiplerinde oldukça düşük seviyelerde ve birbirine yakın değerlerde gözlemlenmiştir (0,05–0,06 ton/yıl). Bu iki parametrede B738 ve A319 modelleri 0,06 ton/yıl ile öne çıkarken, diğer uçaklar 0,05 ton/yıl değerindedir.



Şekil 4. 6. Uçak Tiplerine Göre Seyir Safhasında Açığa Çıkan Emisyonlar

Son olarak, PM_{2.5} (ince partikül madde) emisyonları da incelenmiştir. A319 ve B738 modelleri 0,12 ton/yıl ile en yüksek PM_{2.5} emisyonunu sergilerken, diğer uçak modellerinde bu değer 0,10 ton/yıl düzeyindedir. Bu partiküller hem insan sağlığı hem de atmosferik radyatif denge üzerinde önemli etkiler oluşturduğundan, söz konusu uçak tipleri dikkatle değerlendirilmelidir.

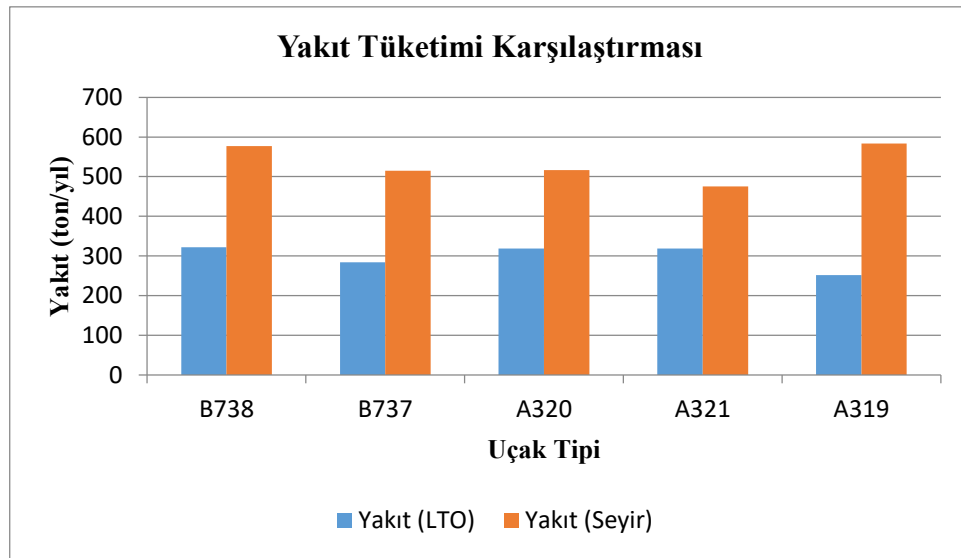
Genel olarak, A319 ve B738 modelleri neredeyse tüm kirleticilerde yüksek emisyon değerlerine sahipken, A321 modeli daha düşük emisyon profili ile öne çıkmaktadır. Bu durum,

çevresel performans açısından filo yenileme ve operasyonel verimlilik değerlendirmelerinde dikkate alınması gereken önemli bir göstergedir.

Çizelge 4.6. Uçak Tiplerine Seyirde Açığa Çıkan Emisyon Parametreleri

	Seyirde tüketilen yakıt (ton/yıl)	ECO ₂ seyir	EN ₂ O Seyir	ECO	ENO _x	ENMVOC	ESO ₂	EPM _{2,5}
B738	576,99	1817,54	0,06	1,15	5,94	0,06	0,58	0,12
B737	514,73	1621,42	0,05	1,03	5,30	0,05	0,51	0,10
A320	516,16	1625,92	0,05	1,03	5,32	0,05	0,52	0,10
A321	475,17	1496,80	0,05	0,95	4,89	0,05	0,48	0,10
A319	583,50	1838,04	0,06	1,17	6,01	0,06	0,58	0,12

İstanbul Sabiha Gökçen – Adana Şakirpaşa rotasında seyir safhasına ilişkin yakıt tüketimi incelendiğinde, uçak tipleri arasında dikkate değer farklar olduğu görülmektedir (çizelge 4.6). Özellikle dar gövde segmentinde yer alan Airbus ve Boeing modelleri arasında yakıt verimliliği açısından belirgin farklar gözlemlenmektedir. En yüksek yakıt tüketimi, 583.50 kg ile Airbus A319 modeline aittir. Onu sırasıyla Boeing 738 (576.99 kg) ve Airbus A320 (516.16 kg) takip etmektedir. En düşük yakıt tüketimi ise Airbus A321 modelinde kaydedilmiş olup 475.17 kg’dır. Bu sonuçlar, A321’in daha yeni ve aerodinamik olarak optimize edilmiş tasarımı sayesinde daha düşük yakıt sarfiyatına sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan A319’un nispeten küçük gövdesine rağmen yüksek yakıt tüketimi sergilemesi, motor tipi, kalkış ağırlığı ve operasyonel profil gibi parametrelerin yakıt verimliliği üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Airbus ve Boeing dar gövde modelleri arasında yakıt tüketimi açısından rekabetçi bir yapı bulunmakla birlikte, bireysel model farkları dikkate alınmalıdır.



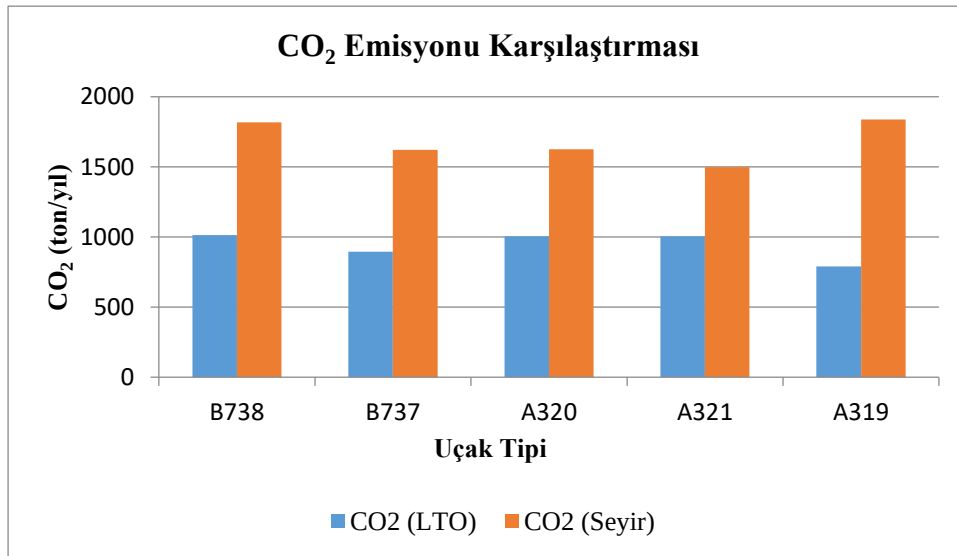
Şekil 4.7. LTO ve Seyir Aşamalarında Uçak Tiplerine göre Yakıt Tüketimi Kıyaslaması

Uçak tiplerine göre LTO ve seyir fazlarına ait yıllık yakıt tüketimi değerleri karşılaştırıldığında, seyir evresinin tüm uçak modelleri için belirgin şekilde daha yüksek yakıt tüketimine neden olduğu gözlemlenmektedir. B738 modelinde seyir fazında yıllık yakıt tüketimi 576,99 ton olarak hesaplanmışken, aynı modelin LTO fazındaki tüketimi 321,60 ton olarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde, B737 modelinde bu değerler sırasıyla 514,73 ton ve 284,41 ton; A320 modelinde 516,16 ton ve 318,75 ton olarak rapor edilmiştir. Bu eğilim, A321 ve A319 modellerinde de aynı şekilde gözlemlenmekte olup, seyir sırasında tüketilen yakıt miktarı LTO fazının yaklaşık 1,5 ila 2 katı düzeyindedir (şekil 4.7).

Söz konusu karşılaştırma, havayolu operasyonlarında seyir fazının enerji tüketimi açısından daha baskın bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Yakıt tüketim değerlerinin seyir fazında bu denli yüksek olması, uçuşun en uzun süresinin bu evrede gerçekleşmesi ve motorların sabit yüksek güçle çalışması ile ilişkilidir. A319 modelinde LTO yakıt tüketimi 251,41 ton/yıl iken, seyir fazındaki tüketim 583,50 ton/yıl ile en yüksek değer olarak öne çıkmaktadır. Bu uçak, hem LTO hem de seyir fazlarında yüksek yakıt tüketimi ile dikkat çekmektedir.

Bu veriler, uçuş fazlarına göre enerji tüketiminin ayrıştırılarak değerlendirilmesinin, hem çevresel etkilerin analizi hem de operasyonel verimlilik çalışmalarında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca filo planlaması, karbon ayak izi hesaplamaları ve sürdürülebilir havacılık stratejileri açısından bu tür ayrıştırılmış analizlerin dikkate alınması gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu durum, Tier 2 metodunun ortalama ve genelleştirilmiş değerler kullanmasından dolayı, uygulama bazlı (özellik uçuş ve operasyon verilerine dayalı) hesaplamalara kıyasla daha düşük değerler verebileceğini göstermektedir. Genişletilmiş analizler, yerel koşulları ve operasyonel gerçekliği daha iyi yansıttığından, çevresel değerlendirmelerde daha gerçekçi sonuçlar sunar

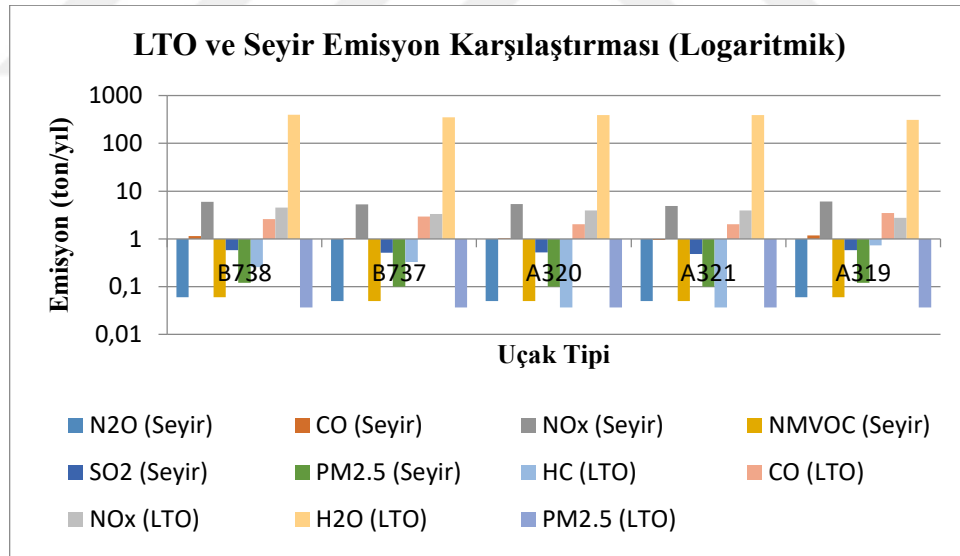


Şekil 4.8. LTO ve Seyir safhalarında CO₂ Emisyon Kıyaslaması

Uçak tiplerine göre yıllık CO₂ emisyonları incelendiğinde, seyir fazında oluşan emisyonların LTO (iniş-kalkış) fazına kıyasla oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. B738 modelinde LTO kaynaklı CO₂ emisyonu 1013 ton/yıl olarak rapor edilirken, seyir fazında bu değer 1817,54 ton/yıl'a ulaşmaktadır. Benzer şekilde, B737 modelinde LTO fazında 895 ton/yıl olan CO₂ salımı, seyir fazında 1621,42 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. A320 ve A321 modellerinde de benzer bir eğilim izlenmekte olup, A320 için LTO fazında 1004 ton/yıl olan emisyon değeri, seyir sırasında 1625,92 ton/yıl'a yükselmektedir. A319 modelinde ise CO₂ emisyonları LTO fazında 791 ton/yıl, seyir fazında ise 1838,04 ton/yıl olarak gerçekleşmiş ve en yüksek değeri oluşturmuştur (Şekil 4.8).

Bu veriler, CO₂ emisyonlarının büyük çoğunluğunun uçuşun seyir aşamasında ortaya çıktığını göstermektedir. Seyir fazı, uçuş süresinin en uzun bölümünü oluşturduğundan, motorların sürekli ve yüksek güçte çalışması sonucunda karbon salımı doğal olarak artmaktadır. Özellikle A319 modelinde seyir kaynaklı CO₂ emisyonunun, LTO fazına göre yaklaşık 2,3 kat fazla olması, bu modelin çevresel etkiler bakımından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Söz konusu karşılaştırma, uçak emisyonlarının yalnızca toplam değerlerle değil, uçuş fazlarına göre ayrıştırılarak analiz edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu ayrım, havayolu şirketlerinin karbon ayak izlerini yönetmelerine, çevresel etki değerlendirmelerini daha hassas yapmalarına ve sürdürülebilir uçuş stratejileri geliştirmelerine olanak sağlayacak niteliktedir.



Şekil 4.9. LTO ve Seyir Safhasında Emisyonların Kıyaslanması

Uçak tiplerine ait emisyon profilleri LTO (iniş-kalkış) ve seyir fazları dikkate alınarak karşılaştırıldığında, genel olarak seyir fazının birçok emisyon türünde daha yüksek değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Özellikle NO_x emisyonları, tüm uçak tiplerinde seyir fazında LTO fazına göre daha yüksek gerçekleşmiştir. Örneğin, B738 modelinde seyir fazında NO_x emisyonu 5,94 ton/yıl iken, LTO fazında bu değer 4,49 ton/yıl olarak ölçülmüştür. Benzer bir eğilim B737, A320 ve A319 modellerinde de gözlenmektedir. CO emisyonları açısından ise Çizelge daha dengeli olup, LTO

fazında bazı modellerde (örneğin B737 ve A319) seyir fazına göre daha yüksek değerler kaydedilmiştir.

HC (NMVOC) emisyonları, A319 modeli dışında tüm uçaklarda LTO fazında oldukça düşük düzeyde gerçekleşmiştir; buna karşın seyir fazında bu emisyonlar sabit ve düşük seviyelerde seyretmektedir. SO₂ ve PM_{2.5} gibi kükürtlü bileşikler ve partikül maddeler ise her iki fazda da düşük ancak benzer büyüklükteki değerlerle gözlemlenmiştir. Bununla birlikte su buharı (H₂O) emisyonları yalnızca LTO fazında değerlendirilmiş olup, seyir fazında ilgili veri bulunmamaktadır.

Bu karşılaştırma, uçuş fazlarının emisyon karakteristiklerinin birbirinden oldukça farklı olduğunu ve çevresel etki analizlerinde bu ayrımın dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Emisyon kontrol stratejileri geliştirilirken, uçak tipi ve uçuş fazına göre farklılaştırılmış önceliklerin belirlenmesi gerekliliği bu analizle somutlaşmaktadır. Özellikle seyir fazında yüksek düzeyde NO_x oluşumu, iklimsel etkiler ve troposferik ozon oluşumu açısından dikkate değer bir çevresel sonuç doğurmaktadır (şekil 4.9).

4.2. CORSIA CERT Metodu Bulguları

CORSIA hesaplaması, havayolu işletmelerinin yıllık uluslararası uçuşlarında tükettikleri yakıt miktarının belirlenmesiyle başlar. Bu yakıt miktarı, sabit bir emisyon faktörü (örneğin Jet A1 için yaklaşık 3.16 kg CO₂/kg yakıt) ile çarpılarak toplam CO₂ emisyonu hesaplanır. Hesaplama ICAO direktifine göre, yalnızca CORSIA kapsamındaki uluslararası uçuşlar için geçerlidir. CORSIA metodları önceki bölümlerde detaylı ele alınmıştır. Bu kısımda CERT (CO₂ Estimation and Reporting Tool) kullanımıyla yapılan çalışma için bilgi verilmiştir.

Havayolu işletmelerinin CORSIA kapsamındaki karbon emisyonlarını hesaplamalarına ve yıllık olarak raporlamalarına yardımcı olmak amacıyla tasarlanmış bir araçtır. Bu Excel dosyası genellikle ICAO'nun resmi web sitesinden temin edilebilir ve CERT (CO₂ Estimation and Reporting Tool) adıyla bilinir. Aşağıda bu Çizelgenin temel işleyiş mantığı havayolu işletmelerinin yıllık emisyonlarını CORSIA kurallarına uygun şekilde hesaplayıp raporlamalarına olanak sağlayan yarı otomatik bir hesaplama aracıdır. Çizelgenin temel mantığı, kullanıcının uçuş bilgilerini girdikten sonra bu verilere dayanarak yakıt tüketimini ve buna karşılık gelen CO₂ emisyonlarını tahmin etmeye dayanır. İlk olarak kullanıcı, kalkış ve varış noktalarının ICAO kodlarını, uçak tipini, uçuş sayısını ve varsa taşınan yük ya da yolcu miktarını ilgili sayfalara girer. Bu bilgiler doğrultusunda sistem, uçuşlar arasındaki mesafeyi otomatik olarak hesaplar. Mesafe hesaplaması genellikle iki havalimanı arasındaki büyük çember (Great Circle Distance) esas alınarak yapılır ve gerekiyorsa taksi süresi, rota sapmaları gibi unsurlar için düzeltme faktörleri de uygulanabilir.

Uçuş mesafesi ve uçak tipi bilgilerinin birleşimiyle, ICAO'nun sertifikalı veri tabanından alınan ortalama yakıt tüketim değerleri kullanılarak her bir uçuş için yakıt tüketimi tahmini yapılır. Bu tahmini tüketim, sabit bir emisyon faktörüyle (örneğin Jet A1 yakıtı için 3.16 kg CO₂/kg yakıt) çarpılarak uçuş başına CO₂ emisyonu elde edilir. Çizelge , tüm uçuşların emisyonlarını toplayarak

yıllık toplam emisyon miktarını verir. Ayrıca CORSIA kapsamındaki ve kapsam dışı uçuşları otomatik olarak ayırabilir; böylece sadece raporlamaya tabi emisyonların belirlenmesi sağlanır. Sonuç bölümünde, CORSIA kurallarına uygun şekilde yapılandırılmış bir rapor sunulur ve bu çıktı, doğrulayıcı kuruluşlara gönderilmek üzere kullanılabilir. CERT Çizelgesi, kullanıcı hatalarını minimize eden yapısıyla hem tahmini hem de ölçülen yakıt verileriyle çalışabilecek esneklikte tasarlanmıştır. Sisteme giriş aşamaları şekillerde belirtilmiştir (şekil 4.10 - 4.11 - 4.12).

© ICAO 2024

 **CORSIA** | CO₂ Estimation & Reporting Tool (CERT) Version 2024

Main page | Background information

Step: **1** Choose below the purpose of the use of the ICAO CORSIA CERT 2024 (click on the appropriate checkbox):

- Assessment of (1) whether the operator is within the applicability scope of the Annex 16, Volume IV, Part II, Chapter 2 requirements towards the submission of the Emissions Monitoring Plan and (2) the operator's eligibility to use the ICAO CORSIA CERT as a monitoring method in 2025. Click on -> ☐
- Estimation of 2024 Emissions and/or Generation of an Emissions Report. Click on -> ☒

Next

Background information on the ICAO CORSIA CERT

The ICAO CORSIA CO₂ Estimation and Reporting Tool (CERT) can be used by an aeroplane operator to support the monitoring and reporting of their CO₂ emissions, in accordance with the requirements from ICAO Annex 16, Volume IV, Part II, Chapter 2, 2.2, 2.5.1 and Appendix 3.

Şekil 4.10. CORSIA CERT Hesaplama Adımları

© ICAO 2024

 **CORSIA** | CO₂ Estimation & Reporting Tool (CERT) Version 2024

CO₂ Estimation and Reporting for 2024 | Introduction

Back **Home** **Next**

Step: **1** In accordance with the Aeroplane Operator's Emissions Monitoring Plan (EMP), please answer the following questions;

- Is the Aeroplane Operator eligible and using the ICAO CORSIA CERT as primary monitoring method?
If yes, are you using;
Great Circle Distance input ? ☐
Block Time input ? ☐
- Is the Aeroplane Operator using Fuel Use Monitoring Methods as a primary monitoring method and using the ICAO CORSIA CERT for data gap filling?
If yes, are you using;
Great Circle Distance input ? ☒
Block Time input ? ☐
- Are you using the ICAO CORSIA CERT to generate an Emissions Report for 2024? ☐

Next

Şekil 4.11. CORSIA CERT Hesaplama Adımları



CO₂ Emissions Estimation & Data Gap Filling

Back
Home
Next

Step:

A Collect flight information (aircraft type, aerodromes of origin and destination) for all flights during the relevant time period.

B Enter the information for all flights by double clicking on the green cells below. Data should be entered using decimals separated by ".".

Note: For a given aerodrome pair flown by a particular aircraft type, all flights can be entered as a single entry by entering total number of flights during the relevant time period.

Note: Data can also be copied and pasted across input cells as needed

Note: Data can also be imported from a csv file, structured to match the contents under the INPUT section below, by clicking on →

C After entering input, compute CO₂ emissions. Click on →

D After computing CO₂ emissions, continue to fill the necessary information for the Emissions Report. Click on →

Import Input File (.csv)
Estimate CO₂ Emissions
Populate ER with CO₂ Information

INPUT								OUTPUT							
Date (Opt.)	Flight ID (Opt.)	ICAO Aircraft Type Designator	Origin Aerodrome	Destination Aerodrome	Total Number of Flights	Total Block Time for all flights (in min.)	Total Fuel Use for all flights (in tonnes)	Type of Fuel	Data Gap Ref. (Opt.)	Data Gap	Aerodrome Pair Great Circle Distance (in km)	Fuel (in tonnes)	CO ₂ Emissions (in tonnes of CO ₂)	Flight(s) subject to Scope of Applicability of CORSIA	Warnings
		B738	LTFJ	LTAF	1					Yes	676	3	9	No (Domestic)	

Şekil 4.12. CORSIA CERT Hesaplama Adımları

Aşağıda ki örnekte hem Airbus hem de Boeing için Tier yöntemiyle kıyaslanabilir olsun diye İstanbul Sabha Gökçen Havalimanından Adana Şakirpaşa Uluslararası Havalimanına günlük bir sefer bazında hesaplamalar sisteme girilmiş ve Çizelge (4.7 – 4.8) sonuçları paylaşılmıştır.

Çizelge 4.7. CORSIA – CERT Boeing Uçak Modeli İçin Hesaplama Sonuçları

GİRİLEN VERİLER					CORSIA CERT HESAPLAMASI			
Uçak Tipi	Kalkış Meydanı	Varış Meydanı	Uçuş süresi (dk)	Mesafe	Yakıt (ton/güm)	CO ₂ Emisyonu (ton/gün)	yakıt (ton/yıl)	CO ₂ Emisyonu (ton/yıl)
B738	LTFJ	LTAF	60	676	2,91	9,20	1.062	3356,54
B739	LTFJ	LTAF	60	676	3,29	10,38	1.199	3789,60
B37M	LTFJ	LTAF	60	676	2,33	7,35	849	2681,92
B39M	LTFJ	LTAF	60	676	2,66	8,42	973	3073,58
B773	LTFJ	LTAF	60	676	9,58	30,26	3.495	11044,25

Çizelge 4.8. CORSIA – CERT Airbus Uçak Modeli İçin Hesaplama Sonuçları

GİRİLEN VERİLER					CORSIA CERT HESAPLAMASI			
Uçak Tipi	Kalkış Meydanı	Varış Meydanı	Uçuş süresi (dk)	Mesafe	Yakıt (ton/güm)	CO ₂ Emisyonu (ton/gün)	yakıt (ton/yıl)	CO ₂ Emisyonu (ton/yıl)
A318	LTFJ	LTAf	60	676	2,95	9,33	1077,28	3404,19
A319	LTFJ	LTAf	60	676	2,99	9,46	1093,04	3454,01
A320	LTFJ	LTAf	60	676	3,17	10,02	1157,90	3658,97
A321	LTFJ	LTAf	60	676	3,68	11,62	1342,08	4240,99
A20N	LTFJ	LTAf	60	676	2,65	8,36	965,74	3051,74
A21N	LTFJ	LTAf	60	676	2,89	9,12	1053,73	3329,80
A333	LTFJ	LTAf	60	676	7,41	23,42	2704,61	8546,56

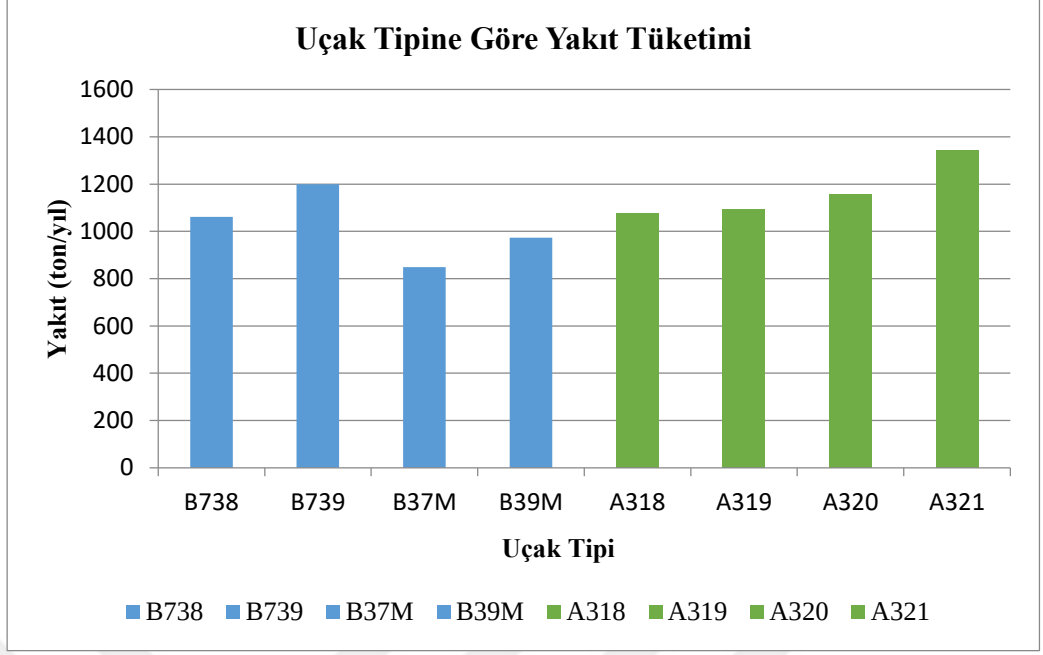
Türkiye’de 2000’li yıllardan itibaren hızla büyüyen havacılık sektörü, hem iç hat hem de dış hat yolculuklarında ciddi bir artış göstermiştir. Özellikle İstanbul Havalimanı gibi büyük ölçekli projelerle yolcu ve kargo taşımacılığındaki kapasitenin artırılması, emisyon salınımlarını da aynı oranda artırmıştır. Türkiye’de havacılık kaynaklı emisyonlar, ülkenin genel sera gazı salınımları içinde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Bu emisyonlar, başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere, azot oksitler (NO_x), su buharı ve partikül maddeleri de içermektedir.

Türkiye, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü’nün (ICAO) CORSIA (Karbon Ofsetleme ve Azaltma Planı) programına katılım sağlayarak, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan karbon emisyonlarını denetleme ve azaltma sürecine katkıda bulunmaktadır. Ancak, CORSIA’nın etkin bir şekilde uygulanması için Türkiye’nin hem hukuki hem de teknik altyapısını geliştirmesi gerekmektedir. Özellikle CORSIA’nın zorunlu uygulama dönemi olan 2027 yılına kadar Türkiye’nin, emisyon ölçüm, raporlama ve doğrulama süreçlerini (MRV – Monitoring, Reporting, Verification) uluslararası standartlara uygun hale getirmesi gerekmektedir.

Türkiye, havacılık emisyonlarının hesaplanmasında IPCC’nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) sunduğu TIER metodolojilerini kullanmaktadır. Bu yöntemlerden TIER 1, temel bir yaklaşım sunarken, TIER 3 gibi daha ileri düzey yöntemler detaylı veri analizine dayanmaktadır. Türkiye’de emisyonların detaylı bir şekilde hesaplanabilmesi ve azaltılabilir noktaların tespit edilebilmesi için TIER 3 yönteminin benimsenmesi gereklidir. Bu yöntem, uçuş mesafeleri, yakıt türü ve motor verimliliği gibi daha fazla parametreyi dikkate alarak daha kesin sonuçlar sunmaktadır.

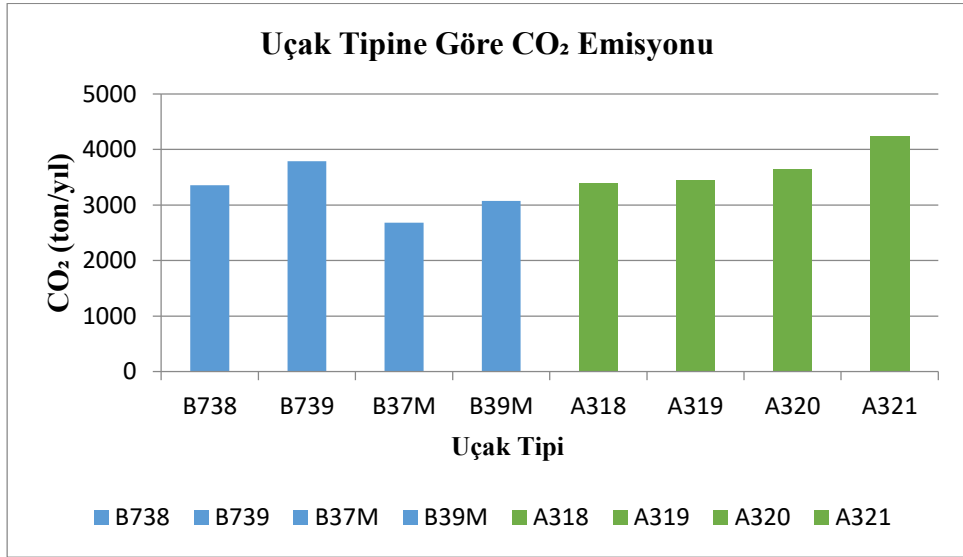
Türkiye’nin havacılık sektörü için biyoyakıtlar ve sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) konusundaki çalışmaları henüz başlangıç aşamasındadır. Bu tür yakıtların kullanımı, emisyonların azaltılması için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Ancak Türkiye, bu alanda teknolojik kapasite geliştirme ve ekonomik fizibilite analizleri konusunda daha fazla yatırım yapmalıdır.

Türkiye’de iç hat uçuşlarından kaynaklanan havacılık emisyonları, ulusal sera gazı envanteri içerisinde önemli bir paya sahiptir. Bu durum, havacılık sektörünün ekonomik gelişime ve bölgesel bağlantılara katkısının yanında, çevresel etkilerinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Yapılan araştırmalar, bu konuda farklı boyutlarda önemli bulguları gözünü sermiştir.



Şekil 4.13. CORSIA – CERT Metoduyla Yıllık Yakıt Tüketimi

Bu grafiklerde, İstanbul Sabiha Gökçen (LTFJ) ile Adana Şakirpaşa (LTAF) havalimanları arasında gerçekleştirilen kısa mesafeli iç hat uçuşları temel alınarak, dar gövdeli Airbus ve Boeing uçak modellerinin yıllık yakıt tüketimi ve karbon emisyonu (CO₂) performansları karşılaştırmalı olarak görselleştirilmiştir. Uçak tiplerine göre yapılan değerlendirmede, yakıt tüketimi bakımından en yüksek değer Airbus A321 modeline ait olduğu görülmektedir. Bu uçak, yılda yaklaşık 1342 ton yakıt tüketimi ile listenin başında yer almakta ve onu sırasıyla A320 (1157,90 ton/yıl) ve B739 (1199 ton/yıl) takip etmektedir (şekil 4.13).



Şekil 4.14. CORSIA – CERT Metoduyla Yıllık CO₂ Emisyonu

Boeing uçakları arasında en düşük yakıt tüketimi, B37M modelinde gözlenmiştir. Bu modelin yaklaşık 849 ton/yıl yakıt tüketmesi, Boeing filosu içerisinde daha verimli bir operasyon profiline sahip olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, Airbus grubundaki A318 ve A319 modelleri ise B738 ve B39M ile benzer tüketim seviyelerine sahiptir. Bu durum, farklı üreticilere ait uçaklar arasında benzer operasyonel verimlilik düzeylerinin yakalanabildiğini göstermektedir.

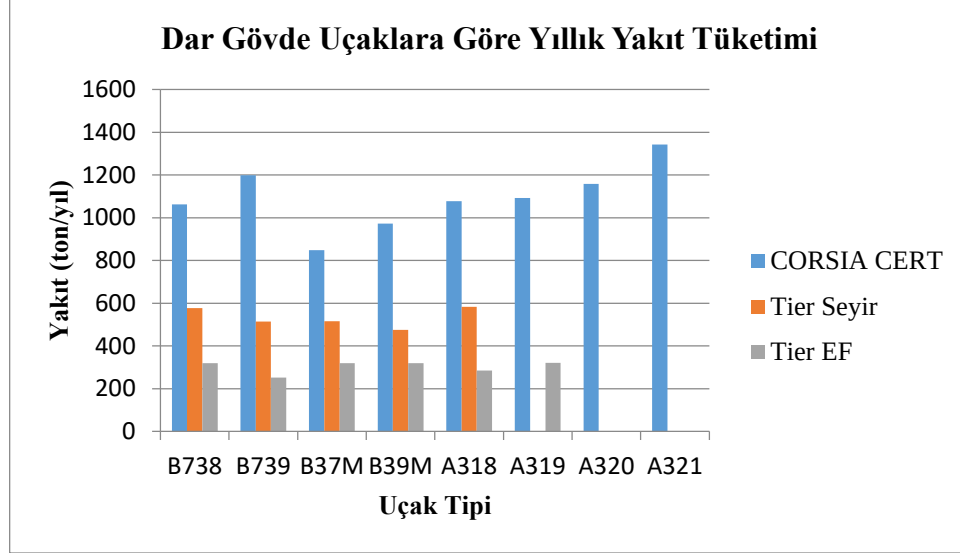
Genel olarak, Airbus modelleri arasında daha geniş gövdeli ve yüksek kapasiteli uçakların daha fazla yakıt tükettiği, buna karşılık Boeing'in bazı modellerinde (özellikle MAX serisinde) daha düşük yakıt tüketimi ile çevresel performansın ön plana çıktığı söylenebilir. Bu grafik, uçak seçiminin çevresel sürdürülebilirlik stratejilerinde nasıl kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.

CO₂ emisyonları bakımından yapılan değerlendirme, uçak tipleri arasında yıllık operasyonlar sonucu oluşan karbon ayak izinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Grafikte yer alan verilere göre, en yüksek CO₂ emisyonu Airbus A321 tipi uçakta görülmektedir; bu model yılda yaklaşık 4240,99 ton karbondioksit emisyonu oluşturmaktadır. Bu yüksek değer, A321'in yakıt tüketimindeki lider konumuyla doğrudan ilişkilidir ve uçağın taşıma kapasitesi ile menzil verimliliği dikkate alındığında beklenen bir sonuçtur.

A321'i takip eden modeller arasında Airbus A320 (3658,97 ton/yıl) ve Boeing B739 (3789,60 ton/yıl) öne çıkmaktadır. Bu uçakların benzer sınıflarda yer almaları ve karşılaştırılabilir yolcu kapasiteleri, emisyon seviyelerinin birbirine yakın olmasına neden olmuştur. Öte yandan, en düşük CO₂ emisyon değeri B37M tipi uçağa aittir. Yaklaşık 2681,92 ton/yıl CO₂ salımı ile B37M, Boeing filosu içinde çevresel performansı en iyi modellerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Airbus ve Boeing uçakları arasındaki genel karşılaştırma, Airbus modellerinin daha yüksek CO₂ salımı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle A320 ve A321 gibi modellerin daha büyük motorlara ve taşıma kapasitesine sahip olmasından kaynaklanabilir. Ancak, bu veriler yalnızca CO₂ emisyonuna dayalı bir çevresel değerlendirme sunduğundan, emisyon başına yolcu-kilometre gibi performans ölçütleriyle desteklenmesi, daha bütüncül bir çevresel analiz için önemlidir (şekil 4.14).

Sonuç olarak, bu grafik, uçak tipinin doğrudan karbon emisyonları üzerinde belirleyici olduğunu ve filo optimizasyonunda düşük emisyonlu uçakların tercih edilmesinin sürdürülebilir havacılık hedefleri açısından kritik rol oynadığını göstermektedir.



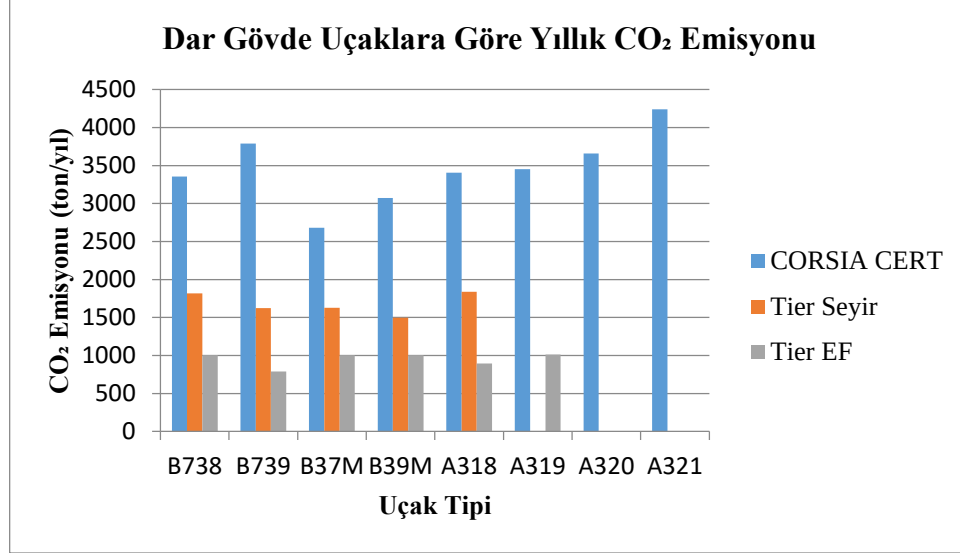
Şekil 4.15. CORSIA ve TIER Modelleri Arasında Yıllık Yakıt Tüketimi Kıyaslaması

Dar gövde uçaklara ilişkin yıllık yakıt tüketim verileri, hem CORSIA CERT metodolojisine hem de Tier metoduna dayalı olarak değerlendirilmiştir (şekil 4.15). Bu karşılaştırma, farklı hesaplama yaklaşımlarının operasyonel verimlilik üzerindeki etkilerini ortaya koymak açısından önem arz etmektedir.

CORSIA CERT sonuçlarına göre en yüksek yakıt tüketimi Airbus A321 modelinde gözlemlenmiştir. Bu uçak yıllık yaklaşık 1342 ton yakıt tüketimiyle listenin başında yer almakta ve onu sırasıyla A320 (1157,9 ton), B739 (1199 ton) ve A319 (1093,04 ton) takip etmektedir. Bu değerler, uçağın gövde uzunluğu, motor tipi ve taşıma kapasitesine bağlı olarak artmaktadır. CORSIA verilerine göre Boeing 737 MAX serisi (B37M ve B39M) ise, sırasıyla 849 ton ve 973 ton yıllık yakıt tüketimi ile daha düşük değerlere sahiptir; bu durum, yeni nesil motorların sağladığı verimlilik avantajını yansıtmaktadır.

Tier metoduna göre hesaplanan seyir emisyonlarında ise yakıt tüketimi daha düşüktür. Örneğin, A321'in seyir bazlı yıllık yakıt tüketimi 475,17 ton olarak hesaplanmıştır. Bu fark, CORSIA metodunun tüm uçuş profiline (kalkış, seyir, iniş) entegre bir hesaplama sunmasından kaynaklanmaktadır. Tier EF (emisyon faktörü) metodunda ise yakıt tüketim değerleri belirli sabit faktörler üzerinden tahmin edilmiştir ve A318, A320, A321 için bu değerler yaklaşık 318,75 ton/yıl olarak sabitlenmiştir. Bu durum, Tier metodlarının gerçek uçuş verilerine göre daha genel ve muhafazakâr tahminlerde bulunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, her üç metodun sunduğu veriler, uçak tipinin operasyonel verimliliği üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yeni nesil uçak modelleri (örneğin B37M), hem yakıt tüketimi hem de çevresel etki açısından daha avantajlıdır. Bu bağlamda, havayolu filolarında filo modernizasyonu, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yakıt ekonomisi açısından önemli kazanımlar sağlayacaktır.



Şekil 4.16. CORSIA ve TIER Modelleri Arasında Yıllık CO₂ Emisyonu Kıyaslaması

Dar gövde uçaklara ait yıllık CO₂ emisyonları, CORSIA CERT, Tier Seyir ve Tier Emisyon Faktörü (EF) yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Bu üç farklı hesaplama yaklaşımı, uçakların çevresel etkilerini farklı boyutlarıyla ortaya koymakta ve karşılaştırmalı analiz için kapsamlı bir temel sunmaktadır.

CORSIA CERT verilerine göre, en yüksek CO₂ emisyonu Airbus A321 modeline aittir. A321'in yıllık CO₂ salımı 4240,99 ton olarak hesaplanmıştır. Bu değeri sırasıyla A320 (3658,97 ton), B739 (3789,60 ton) ve A319 (3454,01 ton) takip etmektedir. Bu sonuçlar, uçağın taşıma kapasitesi ve uçuş süresince harcadığı yakıt miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Yeni nesil Boeing modelleri olan B37M (2681,92 ton) ve B39M (3073,58 ton), daha düşük CO₂ salımlarıyla dikkat çekmektedir; bu durum, bu uçaklarda kullanılan yüksek bypass oranlı motorların çevresel verimliliğini desteklemektedir (şekil 4.16).

Tier Seyir metoduna göre hesaplanan CO₂ emisyonları daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Örneğin, A321'in seyir bazlı CO₂ salımı yalnızca 1496,80 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Aynı uçak için CORSIA metodunda elde edilen değere kıyasla bu oldukça düşüktür. Bu fark, Tier metodunun yalnızca seyir fazındaki emisyonları dikkate almasıyla açıklanabilir; CORSIA ise tüm uçuş evrelerini (kalkış, tırmanış, seyir, iniş) kapsayan bir metodoloji sunar. Tier Emisyon Faktörü yaklaşımında ise CO₂ emisyonları çoğunlukla sabit faktörlerle belirlenmiştir. A320, A321 ve A318 için CO₂ emisyonu 1004 ton/yıl olarak verilmiştir. Bu metodun sabit yakıt tüketim varsayımlarına ve CO₂ oluşum katsayılarına dayanması, daha genel ama düşük varyanslı sonuçlar üretmesine neden olmaktadır. Bu da, özellikle gerçek zamanlı filo yönetimi ve politika geliştirme açısından daha sınırlı bir hassasiyetle sonuçlanabilir.

Genel olarak, CO₂ emisyonlarına ilişkin tüm metotlar, uçağın tipi, motor teknolojisi ve operasyonel profilinin karbon salımı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle yeni nesil uçakların (örneğin B37M) eski modellere kıyasla belirgin oranda daha düşük CO₂ salımı yaptığı

görülmektedir. Bu analiz, sürdürülebilir havacılık stratejilerinin geliştirilmesinde filo modernizasyonunun ve uçak tipi seçiminin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.





5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Toplam CO₂ emisyonları açısından değerlendirildiğinde, CORSIA CERT metodolojisi, Tier yöntemlerine kıyasla sistematik olarak daha yüksek emisyon değerleri sunmaktadır. Bu farkın temelinde, hesaplama yöntemlerinin kapsamı ve veri kaynakları yatmaktadır. CORSIA metodolojisi, gerçek operasyonel verilerle oluşturulmuş ve tüm uçuş fazlarını kalkış, tırmanış, seyir, alçalma ve iniş içerecek şekilde tasarlanmıştır. Buna karşılık Tier metodolojileri, ICAO tarafından tanımlanmış yaklaşımlarla özellikle LTO (Landing and Take-Off) çevrimi ile seyir fazına ilişkin emisyonları ayrı ayrı değerlendirsede, genellikle standartlaştırılmış emisyon faktörlerine ve varsayılan uçuş profillerine dayanır. Bu durum, Tier yaklaşımının daha sabit kalıplara dayalı sonuçlar üretmesine neden olurken; CORSIA, uçak tipi, rota ve operasyonel koşullara duyarlı bir değerlendirme sunar.

Örneğin, Airbus A321 tipi uçak için CORSIA metoduna göre hesaplanan yıllık CO₂ emisyonu 4240,99 ton iken, Tier Seyir+LTO değerlendirmesiyle bu değer 1496,80 ton; Tier Emisyon Faktörü yöntemiyle ise 1004 ton olarak tahmin edilmiştir. Benzer şekilde A320 modelinde sırasıyla 3658,97 ton, 1625,92 ton ve 1004 ton değerleri rapor edilmiştir. Bu bulgular, CORSIA'nın gerçek uçuş operasyonlarını daha bütüncül temsil ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, CORSIA CERT yöntemi, çevresel politika geliştirme, uluslararası karbon raporlaması ve filo optimizasyonu gibi uygulamalarda daha detaylı ve gerçeğe yakın sonuçlar sunmaktadır. Buna karşın, Tier metotları, sistematik karşılaştırmalar, motor türü bazlı emisyon analizi ve düzenleyici gerekliliklere uyum açısından pratik ve yaygın kullanılan bir araç olmayı sürdürmektedir. Ancak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için karar vericilerin, CORSIA verilerini Tier metoduyla beraber esas alarak daha gerçekçi bir emisyon değerlendirmesi yapmaları önerilmektedir. Bunun sebebi Tier metodu yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları dışında diğer emisyon parametrelerini de değerlendirmesidir.

Bu farklılıklara rağmen çalışmanın güvenilirliğini ve geçerliliğini artırmak adına her iki metodun birlikte yorumlandığı karşılaştırmalı analizler büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda şu önerilerde bulunulabilir:

- (i) CORSIA verileri, filo planlaması ve karbon salımı azaltımı gibi uygulamalarda birincil kaynak olarak kullanılmalıdır; zira operasyonel gerçekliği daha yüksek bir metodoloji sunmaktadır.
- (ii) Tier yöntemi ise düzenleyici çerçevede, ilk aşama tarama analizlerinde veya motor tipi ve emisyon faktörü temelli kıyaslamalarda pratik ve hızlı bir araç olarak değerlendirilebilir.
- (iii) Her iki metodun verileri logaritmik ve karşılaştırmalı grafiklerle desteklenmeli, farklı uçak tiplerine göre çevresel performansın görsel olarak kıyaslanabilirliği artırılmalıdır.

- (iv) Özellikle filo modernizasyonu ve emisyon azaltım stratejilerinde, düşük yakıt tüketimi ve CO₂ salımı ile öne çıkan uçak modellerine (örneğin B38M, A320N) öncelik verilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, CORSIA CERT ve Tier yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, havacılık emisyonlarının hem politika düzeyinde hem de teknik düzeyde daha doğru ve kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir havacılık stratejileri ve uluslararası iklim yükümlülükleri açısından bilimsel temelli karar alma süreçlerine katkı sunacaktır.

1. Uluslararası Düzenlemelere Uyum

Türkiye'nin CORSIA ve Paris Anlaşması kapsamındaki yükümlülüklerini yerine getirebilmesi için, havacılık sektörüne yönelik ulusal düzenlemelerin uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından geliştirilen CORSIA gibi mekanizmalara aktif katılım sağlaması ve bu standartlara uyum, sektörün küresel rekabetçiliğini de arttırabilir. Bunun için şu adımlar önerilmektedir.

- MRV Sistemlerinin Geliştirilmesi: Emisyonların izlenmesi ve raporlanması için dijital bir altyapı kurulmalı, bu sistem ICAO standartlarına uygun hale getirilmelidir.
- Hukuki Çerçeve: CORSIA'ya yönelik bağlayıcı bir yasal düzenleme çıkarılarak, uygulamada şeffaflık ve hesap verebilirlik sağlanmalıdır.

2. Emisyon Azaltma Stratejileri

Havacılık sektöründe emisyon azaltımı için Türkiye'nin aşağıdaki stratejileri uygulaması gerekmektedir:

- Yakıt Verimliliğinin Artırılması: Hava yolu şirketleri, yeni nesil uçaklara yatırım yapmalı ve filolarındaki eski modelleri daha verimli olanlarla değiştirmelidir.
- Uçuş Optimizasyonu: Hava trafik kontrol sistemleri geliştirilerek uçuş rotaları ve iniş-kalkış süreçleri optimize edilmelidir.
- Alternatif Yakıt Kullanımı: Türkiye, biyoyakıt ve SAF kullanımını teşvik eden bir politika izlemelidir. Bunun için, bu tür yakıtların üretim ve kullanım maliyetlerini düşürecek teşvik mekanizmaları oluşturulabilir.

3. Teknolojik Yatırımlar

Türkiye, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmak için yenilikçi teknolojilere yatırım yapmalıdır:

- Elektrikli ve Hibrit Uçaklar: Hibrit ve elektrikli uçak teknolojilerinin araştırılması ve geliştirilmesi için üniversiteler ve özel sektör iş birliği artırılmalıdır.
- Karbon Yakalama Teknolojileri: Havalimanlarında karbon yakalama ve depolama (CCS) sistemleri kurulabilir.
- Yapay Zeka ve Otomasyon: Uçuş operasyonlarında verimliliği artırmak için yapay zeka tabanlı sistemlerin kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

4. *Sürdürülebilir Havalimanı Uygulamaları:*

Havalimanlarının karbon nötr hale getirilmesi için enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı artırılmalıdır. Örneğin, güneş panelleri veya rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları havalimanlarında daha fazla kullanılabilir. Havalimanlarında elektrikli yer hizmetleri ekipmanları yaygınlaştırılmalı ve geçiş hızlandırılmalıdır. Bu, hem yerel hava kalitesini iyileştirecek hem de karbon ayak izini azaltacaktır.

5. *Karbon Fiyatlandırma ve Vergilendirme:*

Karbon salımını azaltmak için karbon fiyatlandırma sistemleri veya emisyon ticaret mekanizmaları hayata geçirilmelidir. Bu politikalar, sektörün daha temiz teknolojilere yönelmesini sağlayabilir.

6. *Eğitim ve Bilinçlendirme:*

Havacılık sektörü paydaşları ve çalışanlar karbon azaltım stratejileri konusunda eğitilmeli ve bu bilincin sektör genelinde yaygınlaşması sağlanmalıdır. Yolculara dijital ortamda carbon offsetting (karbon dengeleme/nötrleme) seçenekleri sunularak, bireysel emisyon azaltımı teşvik edilebilir.

7. *Alternatif Ulaşım Yöntemleri:*

Kısa mesafeli ulaşımında demiryolu gibi alternatiflerin tercih edilmesi desteklenmeli, yolcuların bu seçeneklere yönelmesi için bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmelidir.

8. *Uluslararası İş Birlikleri*

Türkiye, havacılık kaynaklı emisyonların azaltılması için diğer ülkelerle ve uluslararası kuruluşlarla iş birliği yapmalıdır. Özellikle Avrupa Birliği ile Yeşil Mutabakat (European Green Deal) kapsamında ortak projeler geliştirilmesi faydalı olacaktır.

5.1. Operasyonel Önlemler

Bir uçağın operasyonel döngüsü boyunca yakıt tüketiminin azaltılması, havacılık endüstrisi açısından hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik bağlamında stratejik öneme sahiptir. Hava yolu işletmeleri için yakıt ve personel giderleri, toplam işletme maliyetlerinin en büyük kalemlerini

oluşturmaktadır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'nin (IATA) 2022 yılı verilerine göre, yakıt giderleri tek başına toplam operasyonel maliyetlerin yaklaşık %30–38'ini oluşturarak sektördeki en büyük maliyet kalemi olarak öne çıkmaktadır (IATA, 2022). Bunu personel maliyetleri izlemekte, dolayısıyla yakıt tüketiminin azaltılması sadece çevresel değil aynı zamanda ciddi bir ekonomik avantaj da sunmaktadır.

Bu bağlamda, operasyonel süreçlerde emisyonların düşürülmesine yönelik uygulanabilecek stratejiler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Motor Çalıştırma (Engine Start-Up)

Motorun çalıştırılması sırasında yakıt tüketimi ve emisyon üretimi başlar. Özellikle motorlar tam yükte çalışmadığı için bu süreç, enerji açısından verimli değildir.

- Elektrikli Yer Destek Ekipmanları (e-GSE): Motor çalıştırmadan önce yer destek ekipmanları ile uçağın elektrik ihtiyacını karşılayarak yakıt tüketimini azaltabilir.
- Hızlı ve Verimli Çalıştırma Prosedürleri: Motorun gereksiz yere çalıştırıldığı süreyi en aza indiren otomasyon sistemleri kullanılabilir.
- Tek Motor Çalıştırma: İki veya daha fazla motorlu uçaklarda, sadece bir motorun çalıştırılması ile taksi aşamasına başlanabilir. Diğer motorlar, kalkıştan hemen önce devreye alınabilir. Bu metod dez avantaj olarak olası bir durumda diğer motorun çalışmaması veya arıza yapması durumunda operasyonel aksaklıklara sebebiyet verebilir. KLM firmasının güncel olarak denediği çalışmalardan birisi pushback (hareket aracı) ile uçağı piste yakın bir yere kadar götürüp motor çalıştırmayı orda yapmaktadırlar. Bu çalışma hali hazırda pilot çalışma olup dezavantaj olarak tek motor çalıştırmayla aynı riskleri içermektedir (URL-12, 2023).

KLM bu çalışmaya taxibot adını vermektedir. Bu çalışmayı biraz daha detaylandırmak gerekirse;

Taxibot çalışması, Schiphol Havalimanı'nda, ilk olarak KLM yolcu uçağı (B737) başarıyla kapıdan Polderbaan pistine çekildi ve oradan kalkış yaptı. Taxibot sayesinde, uçağın motorları Polderbaan'a kadar kapalı kaldı. Bu da, uçağın piste taksi yaparken daha az CO₂ ve diğer emisyon yayması anlamına geliyor.

İlk bakışta, Taxibot standart bir çekici aracına benziyor. Diğer çekici araçlardan farkı ise, Taxibot'un uçak taksi yaparken çekici sürücüsü yerine pilot tarafından kontrol edilmesidir. Taxibot sürücüsü yalnızca bağlantıyı yapar, kapıdan geri itme işlemini gerçekleştirir ve Taxibot'u pistten geri alıp kapıya geri getirir. Taxibot bağlantısını keser ve pilot, uçuş için uçağın motorlarını pistte çalıştırır. Şu anda Taxibot, bir motorla çalışıyor (kısmen elektrikli, kısmen fosil yakıtlı). Gelecekteki

hedef ise, elektrikle çalışan bir Taxibot ile uçakları pistteki park yerine taksi yaparak taşımaktır (şekil 5.1 - 5.2).

KLM, önümüzdeki yıllarda Schiphol'da Taxibot ile taksi yapmayı genişletmeyi hedefliyor. Bunu başarmak için altyapı, süreçler ve teknoloji konusunda büyük ve köklü değişiklikler yapılması gerekiyor. Ayrıca, denemelerle Taxibot'un günlük operasyonlara nasıl entegre edilebileceği belirlenmeli ve tüm pilotların Taxibot'u kullanabilmesi için eğitim alması sağlanmalıdır.



Şekil 5.1. Taxibot ile taksi yoluna getirilen KLM uçağı



Şekil 5.2. Taxibot ile taksi yapan KLM uçağı

2. Taksı (Taxiing)

Taksı sırasında düşük hızda ilerleme nedeniyle motorlar düşük verimle çalışır ve gereksiz emisyon üretir.

- Elektrikli Taksı Sistemleri (e-Taxi): Uçak tekerleklerine entegre elektrik motorları kullanılarak, motorlar çalıştırılmadan uçağın pist başına gitmesi sağlanabilir.
- Tek Motor Taksı: Çok motorlu uçaklarda, yalnızca bir motor kullanılarak taksı yapılabilir.
- Taksı Rotalarının Optimizasyonu: Hava trafik kontrol sistemleri, en kısa taksı rotalarını sağlayarak emisyonları azaltabilir.
- Yerel Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Taksı sırasında destek ekipmanlarının yenilenebilir enerji ile çalışması sağlanabilir.

3. Kalkış (Takeoff)

Kalkış, motorların en yüksek güçte çalıştığı ve en fazla emisyon ürettiği aşamadır.

- Optimum Kalkış Gücü Kullanımı: Kalkış için gerektiğinden fazla motor gücü kullanmaktan kaçınılmalıdır. Bu, hava durumu, uçak ağırlığı ve pist uzunluğuna göre optimize edilebilir.
- Hafif Yapılar ve Malzemeler: Uçak ağırlığını azaltmak için kompozit malzemeler gibi hafif yapıların kullanılması emisyonları düşürebilir.
- Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları (SAF): Kalkış sırasında yüksek emisyon üreten fosil yakıtların yerine, SAF kullanımı karbon salınımını büyük ölçüde azaltabilir.

4. Tırmanış (Climb)

Motorlar kalkıştan hemen sonra yüksek gücünü korur ve tırmanış sürecinde yakıt tüketimi hala yüksektir.

- Optimize Tırmanış Profilleri: Hava trafik kontrolü ve uçuş planlaması, tırmanış rotasını ve hızını optimize ederek yakıt tüketimini en aza indirebilir.
- Yüksek Verimli Motorlar: Modern uçak motorları, daha yüksek yakıt verimliliği sağlayarak emisyonları azaltır.
- Rota Esnekliği: Uçuş sırasında hava durumuna bağlı olarak, daha az yakıt tüketen alternatif rotalar kullanılabilir.

5. *Düz Uçuş (Cruise)*

Uçuşun bu aşaması, genellikle en uzun süren bölümdür ve toplam emisyonların büyük bir kısmı burada üretilir.

- Optimize Edilmiş Seyir İrtifası: Daha yüksek irtifalarda uçmak, motorların daha verimli çalışmasını sağlar ve yakıt tüketimini azaltır.
- Hassas Yakıt Yönetimi: Yakıt yüklemesinin optimize edilmesi, uçuşta taşınan gereksiz ağırlığı ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltabilir.
- Uçuş Yönetim Sistemleri (FMS): Otonom sistemler ve yazılımlar, yakıt tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için motor gücü ve hız gibi parametreleri optimize edebilir.
- Sürdürülebilir Yakıt Kullanımı: SAF veya karbon nötr yakıtların düz uçuş boyunca kullanımı, karbon salınımını %80'e kadar azaltabilir.

6. *Alçalış (Descent)*

Alçalış sırasında motor gücü genellikle azaltılır, ancak hava direnci ve sürtünme nedeniyle hala emisyon üretilir.

- Sürekli Alçalış Operasyonu (Continuous Descent Operations - CDO): Geleneksel alçalış yöntemlerinden farklı olarak, motor gücünü en aza indiren sürekli bir iniş profili kullanılabilir.
- Frenlemeyi Azaltma: Hız kontrolü için hava frenlerinin kullanımını en aza indiren sistemler emisyonları azaltabilir.
- Hız Optimizasyonu: Hava trafik kontrolü, alçalma sırasında gereksiz yavaşlama veya hızlanmaları önleyerek yakıt tasarrufu sağlayabilir.

7. *İniş ve Motor Kapatma (Landing and Engine Shutdown)*

İniş sırasında frenleme ve motor çalışması emisyon üretir. Uçak park yerine ulaşana kadar bu durum devam eder.

- Sürekli İniş Operasyonu: Minimum motor gücü kullanarak ve daha az hız değişikliğiyle inişi tamamlamak.
- Elektrikli Taksi Sistemleri: İniş sonrası taksi sürecinde motorlar kapatılarak elektrikli sistemler devreye alınabilir.
- Hızlı Motor Kapatma: Uçak park yerine ulaştığında, motorların gereksiz yere çalışmasını önleyecek prosedürler geliştirilmelidir.

Bu önlemler, uçuş operasyonlarının her aşamasında uygulanarak hem yakıt tüketimini azaltabilir hem de havacılık sektörünün çevresel etkisini önemli ölçüde hafifletebilir. Bu tür yeniliklerin geniş çaplı uygulanması, küresel havacılık emisyonlarının azaltılmasında etkili bir rol oynayacaktır.

Türkiye'nin havacılık sektöründeki büyümesi ve havacılık kaynaklı emisyonlarını azaltma süreci, beraberinde çevresel sorumlulukları da getirmektedir. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, emisyonların azaltılmasına yönelik etkili politikaların geliştirilmesi ve uygulanması kritik bir öneme sahiptir. CORSIA gibi uluslararası düzenlemelere uyumun yanı sıra, teknolojik yeniliklerin ve sürdürülebilir yakıtların kullanımı Türkiye'nin bu süreçteki başarı şansını artıracaktır. Ayrıca, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik stratejiler, sadece çevresel faydalar sağlayarak daha sürdürülebilir bir konuma getirmekle kalmayıp, aynı zamanda Türkiye'nin uluslararası arenada rekabet gücünü de artıracaktır.

Havacılık sektörünün karbon ayak izi üzerindeki etkisini azaltmak için teknolojik ve operasyonel stratejilerin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle filo yenileme, tek motorlu taksit, rota optimizasyonu ve sharklet gibi yapısal iyileştirme uygulamalarının karbon salımlarını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Nitekim THY'nin yalnızca 2008–2018 yılları arasında uyguladığı yakıt tasarrufu önlemleriyle yaklaşık 1,57 milyon ton CO₂ salımının önüne geçtiği tespit edilmiştir. Bu tür sonuçlar, sürdürülebilir havacılık politikalarının operasyonel düzeyde de ölçülebilir faydalar sağladığını göstermektedir (Dursun, Z. ve ark, 2024).

Literatürde CORSIA, küresel havacılık sektörünün iklim değişikliğiyle mücadelesine katkı sunabilecek önemli bir düzenleyici çerçeve olarak değerlendirilmektedir. Uygulamada karşılaşılan zorluklara rağmen, sistemin izleme, raporlama ve dengeleme (MRV) disiplinini sektöre kazandırması büyük önem taşımaktadır. Gelecekte benzer çalışmaların daha bütüncül ve karşılaştırmalı şekilde yapılabilmesi için, emisyon hesaplamalarında CORSIA ve Tier metodolojilerinin birlikte kullanılması, yolcu-kilometre başına düşen emisyonların karşılaştırmalı olarak sunulması ve filo ortalamaları üzerinden analizler yapılması önerilmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) teşviki, emisyon ticaret sistemlerinin kurulması ve ulusal düzeyde bağlayıcı karbon yönetimi politikalarının geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu yaklaşımlar, Türkiye'nin havacılık kaynaklı sera gazı salımlarının azaltılmasında hem ulusal hem de uluslararası düzeyde stratejik katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, operasyonel optimizasyon önlemleri sadece iklim değişikliğiyle mücadelede değil, aynı zamanda hava yolu işletmelerinin rekabet gücünün korunmasında da kritik bir araçtır. Bu önlemlerin sistematik biçimde uygulanması, Türkiye'nin ve dünya genelindeki hava yolu taşımacılığının hem çevresel performansını hem de finansal sürdürülebilirliğini iyileştirecektir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M.-A., Chew, B. C., & Hamid, S.-R. (2016). Benchmarking Key Success Factors for the Future Green Airline Industry. *Social and Behavioral Sciences*, 224, 246–253
- Airbus Group, (2017). Global Market Forecast: Growing Horizons 2017–2036. <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>. Accessed March 17, 2018.
- Airbus NAVBLUE. (2020). *Descent Profile Optimizer (DPO) – Technical Description and Use Cases*. NAVBLUE SAS. <https://navblue.aero>
- Airbus. (2024). A320 Family Specifications and Performance Data. <https://www.airbus.com>
- Airbus. (2024). A320 Family: Fuel Efficiency, Sustainability and Passenger Experience. <https://www.airbus.com>
- Airport Cooperative Research Program (ACRP). (2015). *Methodology to Improve AEDT Quantification of Aircraft Taxi/Idle Emissions (Project 02-45 Final Report)*. Transportation Research Board. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/22142>
- Altuntaş Ö ve Karakoç H (2011). Türkiye’deki Bazı Hava Alanlarında İç Hat Uçuşları için Uçak Seçiminde Çevresel Etkilerin Göz Önünde Bulundurulmasının İncelenmesi. *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 5(1): 11-18.
- Anke Lükewille 15 Mart 2018 tarihli 2018/1 <https://www.eea.europa.eu/tr/articles/odak-noktasinda-havacilik-ve-denizcilik-emisyonlari>
- Argonne National Laboratory. (2021). *GREET Model 2021 Documentation: Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*. Argonne, IL: U.S. Department of Energy. <https://greet.es.anl.gov>
- Andersson, K., & Sun, X. (2021). Estimating emissions during aircraft ground operations using OpenAP. *Aerospace*, 8(3), 87. <https://doi.org/10.3390/aerospace8030087>
- Ashok, A., Barrett, S. R. H., Waitz, I. A., & Arunachalam, S. (2024). Modeling the air quality impact of aircraft emissions: Is area or volume the appropriate source characterization in AERMOD? *Air Quality, Atmosphere & Health*. <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01321-w>
- Ashok, A., Waitz, I. A., & Yim, S. H. L. (2013). “Quantifying the Air Quality Co-benefits of Aviation Emissions Reductions.” *Atmospheric Environment*, 67, 272–282.
- Barrett, S. R. H., Britter, R. E., & Waitz, I. A. (2010). “Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions.” *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7736–7741. <https://doi.org/10.1021/es101325r>
- Bertrand, X., Durand, M., & Thomas, P. (2019). Fuel savings and emission reductions using big data in aviation: A case study with Air France. *Journal of Air Transport Management*, 79, 101678.

- Boeing, (2014). Current Market Outlook 2017-2036 (Boeing Commercial Airplanes). Available at: <http://www.boeing.com/boeing/commercial/cmo>.
- Boeing. (2023). Boeing 737 Technical Characteristics. <https://www.boeing.com/commercial/737ng/>
- Boeing. (2023-2024). Boeing 737 Family Technical Specifications. <https://www.boeing.com/commercial/737ng/>
- Boeing. (2024). 737 Family: Efficiency, Versatility and Market Leadership. <https://www.boeing.com/commercial/737>
- Boeing. (2024). Boeing 737 MAX Technical Characteristics. <https://www.boeing.com/commercial/737max/>
- Boeing. (2024). Boeing 737 MAX Technical Characteristics. <https://www.boeing.com/commercial/737max/>
- Bows-Larkin, A., & Anderson, K. (2016). Aviation and climate change: The continuing challenge of emissions growth. *Carbon Management*, 7(1–2), 83–91. [The Aeronautical Journal](https://doi.org/10.1017/S000192400000395X), Volume 114, Issue 1158, August 2010, pp. 459 – 468 DOI: <https://doi.org/10.1017/S000192400000395X>
- Briggs, G. A. (2012). Dispersion Estimation of Airport Emissions Using EDMS and AERMOD. *Journal of Air Transport Management*, 19, 54–62.
- Brocard, T., Lecomte, F., & Garcia, R. (2020). Climb phase optimization using operational data: Evaluating environmental and economic benefits. *Aerospace Science and Technology*, 98, 105666.
- Button, K., & Taylor, S. (2000). "International Air Transportation and Economic Development." *Journal of Air Transport Management*, 6(4), 209–222.
- Carter, W. P. L., Nguyen, M., & Cocker, D. R. (2019). Evaluation of ozone formation and air toxics from alternative aviation fuels using GREET. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(6), 704–718. <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1598757>
- Chen, X., & Zhang, J. (2018). Evaluation of ICAO IMPACT model for CORSIA emission projections. *Journal of Air Transport Management*, 71, 107-115.
- Chevrot, A., & Basora, L. (2023). *Uncertainty assessment of fuel consumption based on open data*. *Journal of Open Aviation Science*, 5(1), 1–17. <https://doi.org/10.59490/joas.v5i1.7233>
- Conway, C., & Timms, P. (2010). "Urban Development and Airports: Amsterdam Schiphol as a European Gateway." *Urban Studies*, 47(14), 3085–3106. <https://doi.org/10.1177/0042098009360222>
- Çağatan, K. (2011). "İstanbul Atatürk Havalimanı İçin Uçak Emisyonlarının Belirlenmesi ve Çevresel Etkileri", İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s.
- de Neufville, R., & Odoni, A. (2013). *Airport Systems: Planning, Design and Management* (2nd ed.). McGraw-Hill.

- Dursun, Z., Sağbaş, A., ve Kaya, H. G., (2024). Karbon Ayak İzi ve Karbon Emisyonunun Sektörel Değerlendirmesi: Havacılık Sektöründe Bir Uygulama *Journal of Engineering and Basic Sciences* 2025, 03, 1506662, Early Access 12.11.2024 (doi: <https://doi.org/10.54709/joebs.1506662>) e-ISSN: 3023-6460.
- Efthymiou, M., & Papatheodorou, A. (2019). “EU and non-EU carriers' compliance with the EU ETS and CORSIA.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 220–233.
- Efthymiou, M., & Papatheodorou, A. (2019). EU ETS and CORSIA: A critical comparison of two market-based environmental policies. *Journal of Air Transport Management*, 76, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.01.008>
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies.
- Ekici, S., Şöhret, Y. (2018). Environmental Impact and Cost Assessment of Commercial Flight Induced Exhaust Emissions At Isparta Süleyman Demirel Airport *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(2), 597 – 604, 2020 e-ISSN: 1308-6693
- Elgowainy, A., Han, J., Cai, H., Wang, M., & Dunn, J. (2018). Regional differences in the life-cycle greenhouse gas emissions of biojet fuels. *Applied Energy*, 225, 647–658. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.049>
- EMEP/EEA, (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*, European Environment Agency Yayını, Kopenhag, 2019.
- Eurocontrol. (2019). *Advanced Emissions Model (AEM) – User Guide and Methodology*. Brussels, Belgium: EUROCONTROL Experimental Centre. <https://www.eurocontrol.int/publication/advanced-emissions-model-aem-user-guide>
- Eurocontrol. (2019). *AEM (Advanced Emissions Model) User Manual, Version 2.5*. Eurocontrol Experimental Centre. <https://www.eurocontrol.int>
- Eurocontrol. (2020). *Advanced Emissions Model (AEM): User Guide*. Eurocontrol.
- Eurocontrol. (2021). *Sustainability in European Air Traffic Management: The Role of AEM in FABEC Initiatives*. Brussels: Eurocontrol.
- European Commission. (2017). *BioGrace GHG Calculation Tool – Methodology and User Guide*. Version 4.1. BioGrace Project, Directorate-General for Energy. <https://www.biograce.net>
- European Environment Agency (EEA). (2020). *AERO-MS Model Use in Air Transport Emissions Reporting – Technical Background Paper*. EEA Technical Report No. 10/2020. <https://www.eea.europa.eu>
- Eyers, C. J., Norman, P., Middel, J., & Plohr, M. (2005). *AERO2k Global Aviation Emissions Inventory for 2002 – Final Report*. QINETIQ/04/01113. QINETIQ Ltd. for DEFRA. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AERO2k_Final_Report.pdf
- FAA (2021). *Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Technical Manual*. Federal Aviation Administration.

- Federal Aviation Administration (FAA). (2009). Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) User's Manual. U.S. Department of Transportation.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2016). *SAGE (System for Assessing Aviation's Global Emissions) Technical Report*. FAA Environmental and Energy Research Division.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2020). *AEDT (Aviation Environmental Design Tool) Version 3a Technical Manual*. Office of Environment and Energy. <https://aedt.faa.gov>
- FlightGlobal. (2023). Airbus A321: Aircraft profile, variants, and performance. <https://www.flightglobal.com>
- Friedrich, R., & Reis, S. (2004). *EEA Emission Inventory Guidebook*. European Environment Agency.
- GAIA Project Report. (2022). *Green Approach Integration in Aviation – Final Deliverables*. Horizon 2020, European Commission.
- Gössling, S., & Higham, J. (2020). "The low-hanging fruit: Carbon offsetting for aviation." *Journal of Air Transport Management*, 89, 101864.
- Gössling, S., & Higham, J. (2020). The low-carbon imperative: Destination management under urgent climate change. *Journal of Travel Research*, 59(4), 477–490. <https://doi.org/10.1177/0047287519854214>
- Gössling, S., & Upham, P. (2009). *Climate Change and Aviation: Issues, Challenges and Solutions*. Earthscan, London.
- Güller, M., & Güller, D. (2003). *From Airport to Airport City*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Houghton, J.T., Callander, B.A. And Varney, S.K. (1992). *Climate change 1992. The supplementary report to the IPCC scientific assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 pp.
- Houghton, J.T., Jenkins, G.J. And Ephraums, J.J. (1990). *Climate change. The IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 364 pp.
- [https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/2023istatistikler\(2\).pdf](https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/2023istatistikler(2).pdf)
- IATA (2022). *Airline Industry Economic Performance Report*. International Air Transport Association.
- IATA. (2023). *Sustainable Aviation Fuels Fact Sheet*. International Air Transport Association.
- ICAO (2016). *Forecast and Analysis Support Tool (FAST) Documentation*.
- ICAO (2020). *CORSIA Methodology for Calculating Actual Fuel Use and CO₂ Emissions*. International Civil Aviation Organization.
- ICAO (2022). *Environmental Report: Aviation Emissions and Tools*.
- ICAO (2023). *Environmental Report: Aviation and Climate Change*.
- ICAO (2023). *Long-term Global Aspirational Goal (LTAG) Report*. International Civil Aviation Organization.
- ICAO, (2014) *Guidance on Environmental Assessment of Proposed Air Traffic Management*

Operational Changes Approved by the Secretary General and published under his authority
First Edition — 2014

- ICAO, (2017). Annex 16 Vol III 1st Edition, July 2017 Environmental Protection Volume III - Aeroplane Co₂ Emissions ICAO Environmental Report, 2013. Aviation And Climate Change
- ICAO. (2017). Aircraft Engine Emissions. ICAO Environment: <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/aircraftengine-emissions.aspx>, (Erişim Tarihi: 28.03.2017).
- ICAO. (2019). *Integrated Modelling of Aircraft Performance and Emissions for CaT (IMPACT) – User Manual*. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2020). *ICAO Environmental Report 2020 – Aviation and the Environment: Forecast and Analysis Support Tool (FAST)*. Montreal: International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2022). Environmental Report: Aircraft Engine Emissions. International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2022). *ICAO Environmental Report 2022 – Chapter: Long-Term Global Aspirational Goal (LTAG) Modelling Results*. Montreal: International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2022). *ICAO Environmental Report 2022*. International Civil Aviation Organization.
- International Air Transport Association (IATA). (2019). *Fuel Efficiency Metrics and Best Practices Guide for Airlines*. Montreal–Geneva: IATA Environmental Department. <https://www.iata.org>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2020). *IMPACT Model: Environmental Tools Suite Documentation*. ICAO Environmental Protection Office. <https://www.icao.int/environmental-protection>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2021). *Forecast and Analysis Support Tool (FAST): Long-Term Environmental Trends in Aviation*. ICAO Environmental Report 2021, Chapter 4. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep.aspx>
- IPCC, (2022) IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf Erişim Tarihi: 24.01.2024
- IPCC. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/>
- İklim Değişikliği Başkanlığı, (2023). <https://iklim.gov.tr/havacilik-sektoru-icin-havacilik-faaliyetlerinden-kaynakli-sera-gazi-emisyonlari-calistayi-duzenlendi-haber-12> 25 Mayıs 2022

- Karagül, H., & Demirtaş, Ö. (2021). “Türkiye’de Havacılık Emisyonlarının IPCC Tier Yaklaşımları ile Hesaplanması.” *İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Dergisi*, 5(1), 34–47.
- Karamchandi, P., Krish Vijayaraghavan, Shu–Yun Chen, Rochelle Balmori–Bronson ve . Knipping, Eladio, M. (2010) Development and application of a parallelized version of the advanced modeling system for transport, emissions, reactions and deposition of atmospheric matter (AMSTERDAM): 1. Model performance evaluation and impacts of plume–in–grid treatment. *Atmospheric Pollution Research* 1 (2010) 260–270
- Kasarda, J. D., & Lindsay, G. (2011). *Aerotropolis: The Way We'll Live Next*. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Kaygusuz, K. (2006). “Energy policy and climate change in Turkey” *Energy Conver Manage* 44;1671– 1688, 2003. [6]. U. Kesgin, “Aircraft emissions at Turkish airports”, *Energy*, 31, 372-38.
- Khadilkar, H., & Balakrishnan, H. (2020). Environmental impact assessment of aviation operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102401.
- Kharina, A., Rutherford, D., & Zeinali, M. (2016). *Cost assessment of near- and mid-term technologies to improve new aircraft fuel efficiency*. International Council on Clean Transportation (ICCT). <https://theicct.org/publication/aircraft-efficiency-cost-assessment>
- Kim, B., Fleming, G. G., & Lee, J. J. (2004). “Air Quality Impacts of Aviation.” *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(3), 232–241.
- Koudis, G. S., Schäfer, A. W., & Majumdar, A. (2022). Mapping aviation CO₂ emissions in European airspace using OpenAP. *Journal of Environmental Management*, 309, 114650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114650>
- Köhler, J., Müller, D., & Schäfer, A. (2015). Integration of AEM emissions data into regional air quality models for European metropolitan areas. *Atmospheric Environment*, 123, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.040>
- Kumaş, K., İnan, O., Akyüz, A. ve Güngör, A. (2019). “ Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi”, *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 7-2, 291-297. journal homepage: <http://apjes.com/>
- Kühn, M, (2023). Fuel Consumption of the 50 Most Used Passenger Aircraft Faculty of Engineering and Computer Science Department of Automotive and Aeronautical Engineering
- Lee And Others, D. S. (2020). *Atmospheric Environment* 244, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., ... & Sausen, R. (2009). “Aviation and global climate change in the 21st century.” *Atmospheric Environment*, 43(22–23), 3520–3537.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., ... & Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to climate change for 2000 to 2018. *Atmospheric*

- Environment*, 244, 117834.
- Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., et al. (2020). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 244, 117834.
- Lillo, M., Goerlandt, F., & Montewka, J. (2021). Comparing open-source and proprietary aircraft performance models for environmental assessment. *Sustainability*, 13(14), 7844. <https://doi.org/10.3390/su13147844>
- Maurice L Q, Hockstad L, Höhne N, Hupe J, Lee D S and Rypdal K (2006). Mobile Combustion. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (Ed.), 3rd, ISBN 4-88788-032- 4, IGES, Japan, 78 pp.
- Misra, A., Yeh, S., & Sperling, D. (2020). Lifecycle GHG emissions of bio-jet fuels in the United States: GREET model applications. *Energy Policy*, 144, 111593. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111593>
- Mrazova, M. (2014). Sustainable development – the key for green aviation. *Incas Bulletin*, 6 (1), 109-122.
- Müller, D., Schäfer, A., & Köhler, J. (2020). Sensitivity and uncertainty analysis of the Advanced Emissions Model for aviation emission estimations. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101922. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101922>
- NASA. (2017). Climate Change <https://www.nasa.gov>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). *Enhanced AEDT modeling of aircraft arrival and departure profiles: Volumes 1 and 2*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25324>
- Natural Resources Canada. (2019). *GHGenius 4.03 – A Model for Lifecycle Assessment of Transportation Fuels in Canada*. Office of Energy Research and Development. <https://www.nrcan.gc.ca>
- Nguyen, T., & Chen, Y. (2023). Hybrid deep learning models for aircraft emissions prediction using OpenAP. *Environmental Modelling & Software*, 163, 105600. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105600>
- Noel, G. D., Allaire, P. E., Jacobson, M. Z., & Waitz, I. A. (2009). *Uncertainty analysis of the Aviation Environmental Design Tool (AEDT)*. In Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM 2009), Napa, CA.
- Oktal, H. ve Küçükönel H. (2007). Dünyada Bölgesel Hava Taşımacılığı Ve Türkiye’de Uygulanabilirliği. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2): 383-394.
- OpenAirlines. (2021). *SkyBreathe Fuel Efficiency Solution – Technical White Paper*. Toulouse: OpenAirlines.
- OpenAirlines. (2022). *MyFuelCoach: The fuel coach for pilots*. OpenAirlines. <https://www.openairlines.com/for-pilots/> Erişim Tarihi: 05.06.2025
- OpenAirlines. (2022). *SkyBreathe® Fuel Efficiency Platform: Product Overview and Case Studies*.

- Toulouse, France. <https://www.openairlines.com> Erişim Tarihi: 05.06.2025
- Özdemir, G. (2013). An Appraisal of Setting Environmental Strategy for Airports and A Case Study of Their Contribution to Global Warming From Turkey, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D.Thesis,179s, 2013.
- Özgünoğlu K. ve Uygur, N. (2017). “Kahramanmaraş Havalimanı İçin Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonların Belirlenmesi”, KSU. Journal of Engineering Sciences, 20(3). 2017.
- Pardo, A., & Alibert, B. (2018). *Operational fuel efficiency: The SkyBreathe® approach*.
- Pegasus Hava Yolları, (2023). <https://www.flypgs.com/basin-bultenleri/pegasustan-surdurulebilirlik-kapsaminda-yeni-uygulama-emisyon-dengeleme> Ziyaret tarihi: 27.02.2024
- Pham V V, Tang J, Alam S, Lokan C and Abbass H A (2010). Aviation emission inventory development and analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(12): 1738-1753.
- Ramirez, F., & Lopez, J. (2019). Application of IMPACT model to assess aviation emissions in Latin America. *Environmental Science and Policy*, 92, 33-40.
- Reynolds, T. G., Dray, L., & Schafer, A. (2007). Aviation carbon emissions and technological change: A parametric analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1982(1), 1–8. <https://doi.org/10.3141/1982-01>
- Rissman, J., Arunachalam, S., Bendor, T. and West, J. J. (2013). “Equity and health impacts of aircraft emissions at the Hartsfield- Jackson Atlanta International Airport” *Landscape and Urban Planning*, 120, 234-247.
- Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Köhler, J., & Barker, T. (2017). Evaluating the impact of air traffic management scenarios on aviation emissions using AEM. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.005>
- Schäfer, A., Heywood, J., Jacoby, H., and Waitz I., (2009). *Transportation in A Climate Constrained World*, the MIT Press. Chapter 3, 5, and 6.
- Scheelhaase, J. Maertens, S. (2020). How to improve the global ‘Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation’ (CORSIA) December 2020 *Transportation Research Procedia* 51(51) DOI:10.1016/j.trpro.2020.11.013 LicenseCC BY-NC-ND 4.0
- Scheelhaase, J. (2020). “CORSIA: How ICAO’s new scheme will affect the airline industry’s CO₂ emissions and climate impact.” *Journal of Air Transport Management*, 87, 101852.
- Schmidt, F. (2012). Deutsche Welle :Uçakların geride bıraktığı izler. <http://www.dw.com/tr/u%C3%A7aklar%C4%B1ngeride>
- Schürmann, G., Schafer, K. Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E. and Rappengluck, B. (2007). “The Impact of NO_x, CO and VOC Emissions on the Air Quality of Zurich Airport”. *Atmospheric Environment*. 41, 103-118.
- Seymour, K ve ark., 2020 Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192092030715X?via%3Dihub>

- SHGM (2021). *Yeşil Havalimanı Projesi*. T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü.
<https://www.shgm.gov.tr>
- SHGM (2022). *CORSIA Uygulama Rehberi*. T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları.
- SHGM (2022). *Uluslararası Uçuşlar için Emisyon Raporlama Rehberi*. T.C. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü.
- SHGM (2023). *Sürdürülebilir Havacılık Yakıtlarına İlişkin Teknik Rapor*. Ankara.
- SHGM, (2022). *Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu 2022*
- SHGM, (2023). *Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İstatistikler, 2023*
- Simaiakis, I., & Balakrishnan, H. (2010). Impact of congestion on taxi times, emissions, and fuel burn at major airports. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2184(1), 22–30. <https://doi.org/10.3141/2184-03>
- Song, S. and Shon, Z. (2012). “Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea”, *Atmospheric Environment*, 61, 148-158, 2012
- Stratton, R. W., Wong, H. M., & Hileman, J. I. (2011). Life cycle greenhouse gas emissions from alternative jet fuels. *Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction (PARTNER) Report No. 28*.
- Sustainable Aviation. (2021). *Decarbonisation Roadmap*. <https://www.sustainableaviation.co.uk/>
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (2022). *Havacılıkta Emisyon İzleme ve Raporlama Sistemi*.
- TSKB Çevreciyiz, (2023). <http://www.cevreciyiz.com/makale-detay/1755/ucuslarin-yarattigi-karbon-emisyonunu-yapay-zek-azaltacak> / Ziyaret tarihi:15.05.2024
- UNFCCC. (2023). *National Inventory Reports under the Convention*. United Nations Framework Convention on Climate Change. Retrieved from <https://unfccc.int>
- United States Government Accountability Office [GAO]. (2009). *Aviation and Climate Change*. Washington, Amerika Birleşik Devletleri. <https://www.gao.gov/new.items/d09554.pdf> (Erişim Tarihi: 18 Ocak 2024).
- URL -11, http://www.embraercommercialaviation.com/AircraftPDF/E190_Weights.pdf Erişim Tarihi: 13.01.2024
- URL-1, <http://www.nkfu.com/havacilik-tarihi-ve-gelisimi/> Ziyaret tarihi: 27.02.2024
- URL-10, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html> Erişim Tarihi: 10.01.2024
- URL-12, <https://news.klm.com/first-klm-passenger-flight-with-taxibot/> Erişim Tarihi: 10.12.2024
- URL-2, https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf Erişim Tarihi: 10.01.2024
- URL-3, <http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/Kyoto.aspx?sflang=tr> Erişim Tarihi: 10.01.2024
- URL-4, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html> Erişim Tarihi : 10.01.2024
- URL-5, http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf Erişim Tarihi: 10.01.2024
- URL-6, http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_1_Overview Erişim

Tarihi: 10.01.2024

URL-7, 2020 <https://www.kokpitteyiz.com/airbus-a319/> Erişim Tarihi: 10.05.2025

URL-8, 2020 <https://samedyenererdem.wordpress.com/airbus/> Erişim Tarihi: 10.05.2025

URL-9, <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/state-pairs.aspx> Erişim Tarihi: 04.12.2024

Ünal, İ., Türkoğlu, F. And Doğan, B. (2014). “Nevşehir Kapadokya Havalimanı’nın Emisyon ve Gürültü Açısından Değerlendirilmesi”, Mühendis ve Makine, 55, 654, 24-29. 2014.

Van Wijk, M., & Van der Hoek, M. (2007). "Public–Private Partnerships in Airport Development: The Case of Amsterdam Schiphol Airport." *Transport Policy*, 14(2), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.11.002>

Wang, M. (2019). *GREET Model 2019 Documentation*. Argonne National Laboratory

Wang, M., Burnham, A., & Mintz, M. (2021). Development and application of the GREET model for sustainable aviation fuels. *Argonne National Laboratory Report Series*, ANL/ESD-21/6.

Winther M and Rypdal K (2014) Aviation. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013 (Updated August 2014), Nielsen O K (Ed.), 12/2013, ISBN 978-92- 9213-403-7, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 1-50.

Wolfgang, Grimme. (2023). The Introduction of Sustainable Aviation Fuels—A Discussion of Challenges, Options and Alternatives. *Aerospace*, doi: 10.3390/aerospace10030218

Yıldız, R., & Karakoç, D. (2018). “Uluslararası Havalimanlarının Şehir Ekonomisine Etkileri: Amsterdam Schiphol Örneği.” *Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi*, 11(1), 47–56.

Yılmaz, I. (2017). “Emissions from passenger aircrafts at Kayseri Airport, Turkey”, *Journal of Air Transport Management*, Volume 58, 176- 182.

Zeydan Ö, (2008). Zonguldak Bölgesinde Sera Gazı Emisyon Miktarlarını Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 130s.

ÖZGEÇMİŞ

Orhan ALTÜRK, Lisans eğitimini 2013-2014 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Maden ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamış, ardından aynı üniversitede 2016-2017 döneminde Yüksek Lisans derecesini almıştır. İkinci Lisans eğitimini ise 2022 yılında Anadolu Üniversitesi Havacılık Yönetimi Bölümü'nde tamamlamıştır.

Yayınlar

- i. Uyanık, S. ve Altürk, O. (2016), “The Impact of Paris Agreement on Turkish Coal Power Project Developments”. 16th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, October 5-7, İstanbul.
- ii. Uyanık, S. ve Sucu, M. Y. ve Altürk, O. (2017), “Efficiency of Power Plants with Carbon Capture and Storage”. International Congress of Health and Environment, October 23-25, Adana.
- iii. Küçük Ölçekli Basamak Patlatmalarında Eklem Sistemlerinin Parça Boyut Dağılımı Üzerindeki Etkileri (Erzberg- Avusturya Madeni) – Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
- iv. Türkiye ve Avrupa Birliği Devletlerinde Enerji ve İklim Politikalarının Analizi – Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı