



T.C.

Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
Havacılık Yönetimi Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**COVID-19 SALGINININ TİCARİ UÇUŞLAR ÜZERİNDEKİ
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ: DİYARBAKIR
HAVALİMANI ÖRNEĞİ**

Birsu Ece EKMEKÇİ
23333001

Danışman
Doç. Dr. Mehmet Kadri Akyüz

Diyarbakır 2025

T.C.
Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
Havacılık Yönetimi Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**COVID-19 SALGINININ TİCARİ UÇUŞLAR ÜZERİNDEKİ
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ: DİYARBAKIR
HAVALİMANI ÖRNEĞİ**

Birsu Ece EKMEKÇİ
23333001

Danışman
Doç. Dr. Mehmet Kadri Akyüz

Diyarbakır 2025

TAAHHÜTNAME
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum **“Covid-19 Salgınının Ticari Uçuşlar Üzerindeki Çevresel Etkilerinin İncelenmesi: Diyarbakır Havalimanı Örneği”** adlı tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve tez yazım kılavuzuna uygun olarak hazırladığımı taahhüt eder, tezimin kağıt ve elektronik kopyalarının Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım. Lisansüstü Eğitim-Öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

04/06/2025

Birsu Ece EKMEKÇİ

ÖN SÖZ

Öncelikle, araştırman süresince gerekli verilerin temin edilmesinde sağladıkları destekten dolayı Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) Genel Müdürlüğü'ne, ayrıca yerel düzeyde iş birliği ve kolaylaştırıcı yaklaşımlarıyla sürece katkı sunan Diyarbakır Havalimanı Müdürlüğü'ne içten teşekkürlerimi iletirim.

Bu sürecin her aşamasında desteklerini esirgemeyen, akademik rehberliğiyle çalışmama yön veren değerli danışmanım Doç. Dr. Mehmet Kadri AKYÜZ'e sonsuz teşekkür ederim. Onun bilgi birikimi, sabrı ve yönlendirici katkıları olmasaydı bu çalışma bu olgunluk düzeyine ulaşamazdı.

Tez süreci boyunca her koşulda yanımda olan aileme minnettarım. Varlığıyla her zaman bana güç ve ilham veren annem Remziye EKMEKÇİ'ye, desteğini ve sevgisini her daim hissettiren babam Mehmet Uğur EKMEKÇİ'ye, hayatımın en kıymetli parçalarından biri olan canım kardeşim Hasan Efe EKMEKÇİ'ye yürekten teşekkür ederim. Onların sevgisi ve güveni, bu akademik yolculuğun en sağlam temeli olmuştur.

Aynı zamanda, bu süreci benimle paylaşan, samimiyetiyle her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli arkadaşım Dilan DELİDOLU'ya da en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Zaman zaman zorlayıcı olan bu akademik süreci anlamlı ve katlanabilir kılan dostluğuyla çok kıymetli bir destekçi olmuştur.

Bu tez, yalnızca bireysel bir çabanın ürünü değil, aynı zamanda beni koşulsuzca destekleyen, motive eden ve inanan bir çevrenin varlığıyla mümkün olmuştur. Her birine gönülden teşekkür ederim.

Birsu Ece EKMEKÇİ

Diyarbakır 2025

ÖZET

İnsan faaliyetleri, özellikle fosil yakıt kullanımı sonucu atmosfere salınan kirletici emisyonlar; insan sağlığı, hava kalitesi ve iklim değişikliği üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Bu çalışmanın amacı, uçak kaynaklı sera gazlarının (GHG) çevresel etkilerini belirlemek ve Covid-19 pandemisinin bu kirleticiler üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Bu kapsamda, 2018–2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanı'nda faaliyet gösteren tüm ticari uçaklar dikkate alınarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Uçakların iniş-kalkış (LTO) döngüsü sırasında atmosfere salınan hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) emisyonları belirlenmiş ve pandeminin başlangıç yılı olan 2020 ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, bu sera gazlarının Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), Spesifik Çevresel Etkileri (SEI) ve Spesifik Çevresel Maliyetler (SEC) üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Her ne kadar 2020 yılında uçak kaynaklı sera gazı emisyonlarında önemli bir azalma meydana gelmiş olsa da, yolcu başına düşen emisyon miktarında artış gözlemlenmiştir. Toplam GWP ve SEI değerleri 2020 yılında diğer yıllara kıyasla %70 oranında azalırken, yolcu başına düşen GWP ve SEI değerlerinde %10'un üzerinde artışlar tespit edilmiştir. GWP üzerindeki en yüksek katkı %57,48 ile NO_x emisyonuna aitken, SEI içerisindeki en büyük pay %81,79 oranıyla CO₂ emisyonuna aittir. Ayrıca, uçakların taksi süresinde sağlanacak %10'luk bir azalma, GWP ve SEI üzerinde %2'nin üzerinde bir azalma sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler

Uçak Emisyonları, Çevresel Etki, Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), İniş-Kalkış (LTO) Döngüsü, Sera Gazları, COVID-19 Pandemisi

ABSTRACT

Human activities, particularly the use of fossil fuels, have led to the release of pollutant emissions into the atmosphere, posing serious threats to human health, air quality, and climate change. The aim of this study is to determine the environmental impacts of aircraft-induced greenhouse gases (GHGs) and to evaluate the effects of the COVID-19 pandemic on these pollutants. In this context, various analyses were conducted by taking into account all commercial aircraft operating at Diyarbakır Airport between 2018 and 2023. Total emissions of hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and carbon dioxide (CO₂) released into the atmosphere during the landing and take-off (LTO) cycle of aircraft were quantified and compared with the year 2020, when the pandemic began. Additionally, the impacts of these greenhouse gases on Global Warming Potential (GWP), Specific Environmental Impact (SEI), and Specific Environmental Costs (SEC) were assessed. Although a significant decrease in aircraft-related GHG emissions was observed in 2020, the amount of emissions per passenger increased. While total GWP and SEI values decreased by approximately 70% in 2020 compared to other years, GWP and SEI values per passenger showed increases exceeding 10%. The highest contribution to GWP was attributed to NO_x emissions at 57.48%, while CO₂ emissions accounted for the largest share of SEI at 81.79%. Furthermore, a 10% reduction in aircraft taxi time was found to result in more than a 2% decrease in both GWP and SEI values.

Keywords

Aircraft Emissions, Environmental Impact, Global Warming Potential (GWP), Landing and Take-Off (LTO) Cycle, Greenhouse Gases, COVID-19 Pandemic

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖN SÖZ	I
ÖZET	II
ABSTRACT	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
KISALTMALAR	X
GİRİŞ	1
TEZİN KAPSAMI VE AMACI	2
TEZİN YAPISI VE BÖLÜMLERİ	3
TEZİN KISITLARI	4
BİRİNCİ BÖLÜM	5
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ KAVRAMI	5
İKİNCİ BÖLÜM	9
HAVACILIK FAALİYETLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ	9
2.1. Küresel Isınma Potansiyeli ve Sera Gazları	10
2.2. hava Aracı Operasyonlarının İklim Değişikliğindeki Rolü.....	12
2.3. Havalimanlarının İklim Değişikliğindeki Rolü.....	13
2.4. ICAO İklim Değişikliği Faaliyetleri	14
2.5. AB Havacılık Kaynaklı Emisyon Azaltma Faaliyetleri	15
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	17

HAVACILIKTA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİYLE MÜCADELE	17
3.1. Uçak Teknolojilerinin Geliştirilmesi.....	18
3.2. Hava Trafik Yönetimi ve Operasyonları	20
3.3. Sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF)	21
3.4. Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması (CORSIA).....	22
3.4.1. CORSIA'nın Uygulanmasında MRV Sisteminin Rolü.....	24
3.4.2. CORSIA'ya Uygun Yakıtlar	25
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	26
LİTERATÜR TARAMASI	26
4.1. Havaaracı Operasyonları Kaynaklı Çevresel Etkiler	26
4.2. COVID-19 Pandemisinin Havacılığa Etkisi	31
BEŞİNCİ BÖLÜM	36
ÖRNEKLEM VE YÖNTEM	36
5.1. Çalışma Alanı.....	36
5.2. LTO Döngüsünde Hava Araçlarından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması.....	37
5.3. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ve Spesifik Çevresel Etkilerin (SEI) Hesaplanması	40
5.4. Çevresel Maliyet Hesaplamaları	42
ALTINCI BÖLÜM.....	44
BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER.....	44
6.1. Yakıt Tüketimi ve Sera Gazı Emisyonlarına Ait Bulgular	44
6.2. Küresel Isınma Potansiyeli, Spesifik Çevresel Etkiler ve Spesifik Çevresel (SEC) Maliyetlere Ait Bulgular	53
6.3. Uçak Tipine Göre Emisyon Oranları	59
6.4. Taksi Sürelerinin Çevresel Etkiler Üzerindeki Rolü.....	61

SONUÇLAR ve ÖNERİLER..... 63

KAYNAKÇA 66



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1.1. İnsan Kaynaklı Emisyonlarda Sektör Payları	7
Şekil 1.2. Yıllara Göre Atmosferdeki CO ₂ Derişimi	8
Şekil 2.1. 2050 Karbon Nötr Hedefinde ICAO Önlem Sepetinin Payı	15
Şekil 3.1. CORSIA MRV Akış Şeması	24
Şekil 5.1. 2018-2023 Diyarbakır Havalimanı Ticari Uçak ve Yolcu Sayısı.....	36
Şekil 5.2. LTO Döngüsü	39
Şekil 6.1. Toplam Yakıt Tüketimi ve 2020 Yılına Göre Değişimi	44
Şekil 6.2. Yolcu Başına Yakıt Tüketimi ve 2020 Yılına Göre Değişimi.....	45
Şekil 6.3. Toplam HC Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	46
Şekil 6.4. Yolcu Başına HC Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	46
Şekil 6.5. Toplam CO Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	47
Şekil 6.6. Yolcu Başına CO Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	48
Şekil 6.7. Toplam NO _x Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	48
Şekil 6.8. Yolcu Başına NO _x Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi.....	49
Şekil 6.9. Toplam CO ₂ Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi	50
Şekil 6.10. Yolcu Başına CO ₂ Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi.....	50
Şekil 6.11. LTO Döngüsünde HC Emisyonları	51
Şekil 6.12. LTO Döngüsünde CO Emisyonları	52
Şekil 6.13. LTO Döngüsünde NO _x Emisyonları	52
Şekil 6.14. LTO Döngüsünde CO ₂ Emisyonları	53
Şekil 6.15. Toplam GWP ve Yıllara Göre Değişimi	54
Şekil 6.16. Yolcu Başına GWP ve Yıllara Göre Değişimi	54
Şekil 6.17. Toplam SEI Yıllara ve Yıllara Göre Değişimi	55
Şekil 6.18. Yolcu Başına SEI ve Yıllara Göre Değişimi	55
Şekil 6.19. Toplam SEC ve Yıllara Göre Değişimi	56
Şekil 6.20. Yolcu Başına SEC ve Yıllara Göre Değişimi.....	57
Şekil 6.21. LTO Döngüsünde GWP Etkileri	58
Şekil 6.22. LTO Döngüsünde SEC Etkileri	59
Şekil 6.23. LTO Döngüsünde SEI Etkileri	59
Şekil 6.24. Taksi Sürelerine Bağlı ve Sera Gazı Emisyonları	62

Şekil 6.25. GWP ve SEI'nin Taksi Süresine Bağlı Olarak Değişimleri 62



TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 2.1. Kyoto Protokolü'nde Baz Alınan Sera Gazları.....	10
Tablo 5.1. Uçuşlara Ait Bilgiler	38
Tablo 5.2. LTO Döngüsünde Operasyon Modu, İtki Seviyesi ve Modun Süresi	39
Tablo 5.3. Sera Gazlarının GWP Değerleri.....	40
Tablo 5.4. Emisyonların Spesifik Çevresel Etki faktörü.....	41
Tablo 5.5. Spesifik Çevresel Maliyetler	43
Tablo 6.1. Sera Gazlarının GWP, SEI ve SEC İçindeki Payları	57
Tablo 6.2. Uçak Tipine Göre Emisyon Oranları	60

KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
ACA	Havaalanı Karbon Akreditasyonu
ACI	Uluslararası Havalimanları Konseyi
ATM	Hava Trafik Yönetimi
CAEP	Havacılık Çevre Koruma Komitesi
CAA	Sivil Havacılık Otoritesi
CCO	Sürekli Tırmanma Operasyonları
CDD	Tırmanma, Seyir ve Alçalma
CDO	Sürekli Alçalma Operasyonları
CH₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
COVID-19	Koronavirüs
CORSIA	Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması
DHMI	Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DLR	Alman Havacılık ve Uzay Merkezi
ECAC	Avrupa Sivil Havacılık Konferansı
AEED	Uçak Motoru Emisyon Veri Tabanı
EASA	Avrupa Birliği Havacılık Emniyeti Ajansı
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EUROCONTROL	Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı
YT	Yakıt Tüketimi
GHG	Sera Gazı
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
HC	Hidrokarbon
H₂O	Su Buharı

<i>HVAC</i>	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
<i>IATA</i>	Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği
<i>ICAO</i>	Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
<i>IPCC</i>	Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
<i>ISO</i>	Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı
<i>LCA</i>	Yaşam Döngü Değerlendirmesi
<i>LTO</i>	İniş ve Kalkış Döngüsü
<i>LAQ</i>	Yerel Hava Kalitesi
<i>NO_x</i>	Azot oksitler/Nitrojen oksitler
<i>O₃</i>	Ozon
<i>OECD</i>	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
<i>PM</i>	Partikül Madde
<i>Ppm</i>	Milyonda Bir Parça
<i>SAF</i>	Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
<i>SARP</i>	Standartlar ve Tavsiye Edilen Uygulamalar
<i>SEC</i>	Spesifik Çevresel Maliyet
<i>SEI</i>	Spesifik Çevresel Etki
<i>SES</i>	Tek Avrupa Hava Sahası
<i>SESAR</i>	Hava Trafik Yönetimi Araştırma Geliştirme
<i>SO_x</i>	Kükürt oksitler
<i>TÜİK</i>	Türkiye İstatistik Kurumu
<i>UNEP</i>	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
<i>UNFCCC</i>	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
<i>WHO</i>	Dünya Sağlık Örgütü
<i>WMO</i>	Dünya Meteoroloji Örgütü

GİRİŞ

Hızlı ve emniyetli ulaşım ihtiyacı, havacılık sektörünün büyümesinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. Teknolojik ilerlemeler sayesinde hava taşımacılığı daha geniş kitleler için erişilebilir ve ekonomik hale gelmiş, bu da uçuş faaliyetlerinde önemli bir artışa yol açmıştır (Kılıks and Kılıks, 2017). Ancak, uçak operasyonlarında fosil yakıtların kullanılması ve bu yakıtların yanması sonucunda atmosfere çeşitli kirletici emisyonlar salınması, önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. İklim değişikliği, ortalama sıcaklıkların artmasına, iklim sistemlerinde bozulmalara ve buna bağlı olarak doğal ekosistem, insan sağlığı ve ekonomik yapı üzerinde olumsuz etkilere yol açan küresel bir sorundur. Havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının, küresel emisyonların yaklaşık %2,5'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Lee ve diğ., 2021). Ancak, uçuş irtifasında oluşan kısa ömürlü ve CO₂ dışı emisyonların da etkisi dikkate alındığında, havacılığın küresel ısınmaya toplam katkısının %4 civarında olduğu tahmin edilmektedir (Klöwer ve diğ., 2021). Uçakların iniş-kalkış (LTO) evrelerinde oluşan gürültü ve emisyonlar, havalimanı çevresinde öne çıkan çevresel problemlerdendir. Kirletici emisyonlar özellikle yerel hava kalitesinde önemli bozulmalara yol açmaktadır (Kafalı ve Altuntaş, 2020).

Aralık 2019'da Çin'in Wuhan bölgesinde ortaya çıkan koronavirüs (COVID-19), kısa sürede tüm dünyaya yayılarak küresel bir sağlık krizine dönüşmüştür. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), 11 Mart 2020 tarihinde COVID-19'u resmen pandemi olarak ilan etmiştir (WHO, 2020). Virüsün yayılmasını kontrol altına almak amacıyla pek çok ülkede uygulamaya konulan önlemler arasında, seyahat kısıtlamaları en yaygın kullanılan stratejilerden biri olmuştur. Bu nedenle, pandemiden en fazla etkilenen sektörlerden biri havacılık olmuştur.. COVID-19 pandemisi, diğer birçok sektörde olduğu gibi, havacılık sektöründe de ciddi ekonomik kayıplar ve operasyonel durgunlukla sonuçlanmıştır (Sun ve diğ., 2021). Nitekim 2020 yılında dünya genelinde hava yolu ile taşınan yolcu sayısı, bir önceki yıla göre %60,2 oranında azalmış; sektör gelirleri ise %69 oranında düşmüştür (Akyüz, 2022). Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, aynı yıl içerisinde toplam uçuş sayısı %45,1; taşınan yolcu sayısı ise %60,8 oranında azalmıştır (DHMI, 2025b)

Tezin Kapsamı ve Amacı

Havacılık sektörü, küresel ulaşım ağının temel bileşenlerinden biri olmakla birlikte, fosil yakıtlara dayalı enerji kullanımı nedeniyle ciddi çevresel sorunlara da neden olmaktadır. Özellikle iniş-kalkış (LTO) döngüsü sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonları, yalnızca küresel iklim değişikliğini tetiklemekle kalmamakta, aynı zamanda havalimanı çevresindeki yerel hava kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Bu bağlamda, uçak kaynaklı emisyonların nicel olarak belirlenmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, sürdürülebilir havacılık politikalarının oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, COVID-19 pandemisinin havacılık sektörüne getirdiği operasyonel kısıtlamaların, uçaklardan kaynaklanan sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Bu amaç doğrultusunda, 2018–2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanı'na operasyon gerçekleştirilen tüm ticari uçuşlara ait iniş-kalkış verileri esas alınarak LTO döngüsünde atmosfere salınan hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) emisyonları hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında yalnızca toplam emisyon değerleri değil, aynı zamanda yolcu başına düşen özgül emisyonlar da analiz edilerek, pandemi öncesi ve sonrası dönemlerin karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca bu emisyonların küresel ısınma potansiyeli (GWP), spesifik çevresel etkileri (SEI) ve spesifik çevresel maliyetleri (SEC) hesaplanarak, çevresel-ekonomik etkileri ortaya konmuştur. Özellikle 2020 yılı, pandemi nedeniyle azalan uçuş faaliyetlerinin çevresel etkilerdeki değişimi gözlemlemek açısından referans yıl olarak ele alınmıştır. Bu çalışma, yalnızca havacılık kaynaklı çevresel emisyonların hesaplanmasıyla sınırlı olmayıp, aynı zamanda havacılık sektöründe çevre dostu uygulamaların geliştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunmayı da içermektedir. Uçakların taksi sürelerinin kısaltılması gibi operasyonel düzenlemelerin, emisyonları ve çevresel etkileri azaltma potansiyeli de analiz edilerek değerlendirilmiştir. Böylece çalışma, havacılık yönetimi alanında çevresel sürdürülebilirliğe yönelik somut politika geliştirme süreçlerine katkı sağlayacak bilimsel bir zemin oluşturmayı hedeflemektedir.

Tezin Yapısı ve Bölümleri

Bu tez çalışması, toplam yedi ana bölümden oluşmakta olup her bir bölüm, araştırmanın kuramsal çerçevesini, yöntemsel altyapısını ve bulgularını sistematik bir biçimde sunmak üzere yapılandırılmıştır. Tezin yapısı aşağıda özetlenmiştir:

Giriş Bölümü: Çalışmanın amacı, kapsamı ve önemi bu bölümde açıklanmakta; ayrıca araştırma sürecinde izlenen genel yaklaşım ve ele alınan temel sorunsal ifade edilmektedir.

Birinci Bölüm – İklim Değişikliği Kavramı: Bu bölümde, iklim değişikliği ve küresel ısınma kavramları açıklanmakta; sera gazlarının çevresel etkileri ve insan faaliyetlerinin bu süreçteki rolü bilimsel kaynaklara dayalı olarak ele alınmaktadır.

İkinci Bölüm – Havacılık Faaliyetlerinin Çevresel Etkileri: Havacılık sektörünün çevresel etkileri bu bölümde değerlendirilmiş; ICAO, Avrupa Birliği ve diğer uluslararası kuruluşların emisyon azaltımına yönelik politikaları incelenmiştir. LTO döngüsünün ve havalimanı operasyonlarının çevre üzerindeki etkilerine özel olarak odaklanılmıştır.

Üçüncü Bölüm – Havacılıkta İklim Değişikliğiyle Mücadele: Bu bölümde, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), uçak teknolojileri, operasyonel iyileştirmeler ve CORSIA gibi uluslararası mekanizmalar çerçevesinde havacılık sektörünün iklim değişikliğiyle mücadelesi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Dördüncü Bölüm – Literatür Taraması: Alanyazında yapılan çalışmalar incelenerek, uçak kaynaklı emisyonlar, COVID-19'un havacılık sektörüne etkisi ve çevresel etki değerlendirmeleri bağlamında yapılan akademik araştırmalara yer verilmiştir. Bu sayede çalışmanın özgün yönü ortaya konmuştur.

Beşinci Bölüm – Örneklem ve Yöntem: Diyarbakır Havalimanı örneği üzerinden 2018–2023 yılları arasında gerçekleştirilen ticari uçuşlara ilişkin veriler kullanılarak, LTO döngüsü bazlı emisyon hesaplamaları, GWP, SEI ve SEC analizleri yapılmıştır. Kullanılan veri kaynakları ve hesaplama yöntemleri bu bölümde detaylandırılmıştır.

Altıncı Bölüm – Bulgular ve Değerlendirme: Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen emisyon miktarları, yıllık değişim oranları, pandemi etkileri ve

uçak tipi/taksi suresi gibi değişkenlere gore emisyonların değişimi analiz edilmiştir. Grafikler ve tablolar eşliğinde bulgular açıklanmış, yorumlanmış ve karşılaştırmalı değerlendirmelere yer verilmiştir.

Sonuç ve Öneriler Bölümü: Tez sürecinde elde edilen bulgular ışığında ulaşılan temel sonuçlar sunulmakta; ayrıca sürdürülebilir havacılık politikaları, yerel uygulamalar ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Tezin Kısıtları

Bu çalışma, COVID-19 pandemisinin havacılık kaynaklı sera gazı emisyonlarına etkisini Diyarbakır Havalimanı örneği üzerinden değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak çalışma süresince bazı sınırlılıklar ve dışsal değişkenler, elde edilen sonuçların genelleştirilebilirliğini ve yorumlanabilirliğini belirli ölçüde kısıtlamıştır. Bu bağlamda çalışmanın başlıca kısıtları aşağıda özetlenmiştir:

- 1. Saha Sınırlılığı:** Tez çalışması yalnızca Diyarbakır Havalimanı'nda gerçekleştirilen ticari uçuşlarla sınırlandırılmıştır. Bu nedenle elde edilen bulgular, ulusal ya da uluslararası düzeydeki diğer havalimanlarına doğrudan genellenemez.
- 2. Uçuş Verisi Temelli Analiz:** Emisyon hesaplamaları, ICAO'nun Uçak Motoru Emisyon Veri Tabanı (AEED) verilerine ve standart LTO döngüsü sürelerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek uçuşlarda karşılaşılan operasyonel farklılıklar (örneğin motor yaşı, bakım durumu, yakıt tipi veya hava koşulları) hesaba katılamamıştır.
- 3. Sadece LTO Döngüsü Analizi:** Çalışmada yalnızca iniş-kalkış (LTO) döngüsü sırasındaki emisyonlar analiz edilmiştir. Uçuşun seyir (cruise) aşamasında ortaya çıkan uzun menzilli emisyonlar kapsam dışı bırakılmıştır.
- 4. Yolcu Sayısının Tahmini Kullanımı:** Yolcu başına düşen emisyon hesaplamalarında, uçuşlara ait gerçek doluluk oranı yerine havayolu genel ortalamaları ve resmi istatistiklerden elde edilen veriler kullanılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ KAVRAMI

Son yıllarda çevre kirliliği, küresel ölçekte karşılaşılan en kritik sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu kirliliğin temel nedeni, artan insan nüfusu ve buna bağlı olarak yükselen enerji ile tüketim talepleridir. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan (petrol, kömür, doğal gaz vb.) karşılanmakta, bunun sonucunda önemli miktarda sera gazları ve diğer kirletici gazlar atmosfere salınmaktadır. İnsan kaynaklı (antropojenik) sera gazı emisyonları, küresel ortalama sıcaklıkların artmasına yol açarak, iklim sisteminde istenmeyen değişikliklerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu durum, yalnızca ekosistemleri değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal yapıları da ciddi biçimde etkilemektedir (Çelik ve Birgili, 2010).

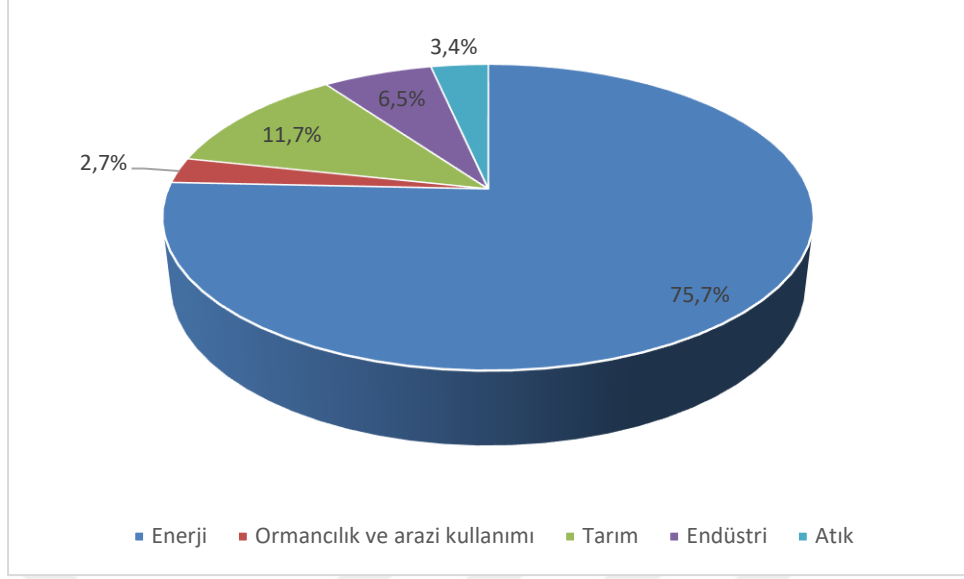
Küresel iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından 1988 yılında Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuştur. IPCC, ulusal ve uluslararası düzeyde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalarda kritik bir rol üstlenmektedir. Panelin temel amacı, insan faaliyetlerinden kaynaklanan iklim değişikliğinin potansiyel etkilerini ve risklerini değerlendirmek, ayrıca bu değişikliğin etkilerini hafifletmek ve adaptasyon seçeneklerini değerlendirmektir. (Turan, 2020).

Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik hukuken bağlayıcı bir uluslararası düzenleme olup, 12 Aralık 2015 tarihinde Fransa'nın Paris kentinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı kapsamında 196 taraf devlet tarafından kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Anlaşmanın temel amacı, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerin 2°C altında tutmak ve sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlamaktır. Bilim insanları, sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlamanın önemine özellikle dikkat çekmektedir. Bu yaklaşım, IPCC tarafından da bilimsel olarak desteklenmektedir. IPCC'nin bulgularına göre, 1.5°C eşiğinin aşılması, daha sık ve şiddetli kuraklıklar, aşırı sıcak hava dalgaları ve yoğun yağışlar gibi ciddi iklimsel etkilerin ortaya çıkma riskini artırmaktadır. Küresel ısınmayı 1.5°C ile sınırlamak amacıyla, sera gazı emisyonlarının en geç 2025 yılına

kadar zirveye ulaşması ve 2030 yılına kadar %43 oranında azaltılması gerekmektedir (UNFCCC, 2025).

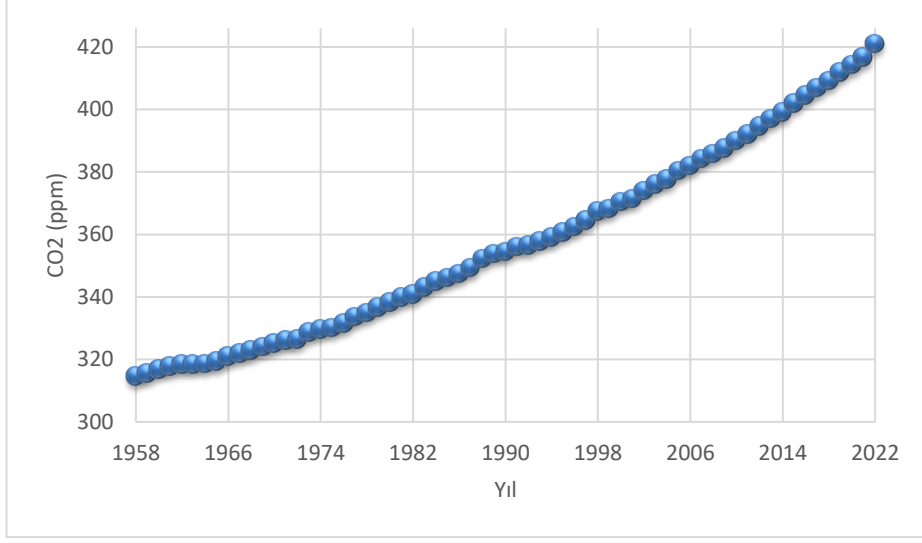
2018 tarihli İklim Değişikliği Paneli Küresel Isınma Özel Raporu, insan faaliyetleri sonucunda dünyanın sanayi öncesi döneme kıyasla 1°C ısındığını ve mevcut eğilim devam ederse küresel ısınmanın 2030 ile 2052 yılları arasında 1.5°C eşiğini aşacağını öngörmektedir. Raporda, iklim değişikliğinin etkileri olarak su kıtlığı, aşırı sıcaklıklar ve ekosistem tahribatı gibi sorunlara dikkat çekilmektedir. Sıcaklık artışının 1.5°C seviyesinde tutulabilmesi için sanayi, kentleşme, toprak kullanımı ve ulaşım gibi alanlarda hızlı ve kapsamlı dönüşümlerin gerekliliği vurgulanmaktadır (IPCC, 2020). Günümüzde, iklim değişikliğinin olumsuz etkileri küresel ölçekte hissedilmektedir. Artan sıcaklıklar, doğal dengeyi bozmakta ve bu bozulma sürdüğü takdirde, etkilerinin insanlık için yıkıcı sonuçlar doğurması kaçınılmaz hale gelmektedir. Bilimsel çalışmalar, 1.5°C eşiğinin bu yıkıcı etkilerin başlaması açısından kritik bir sınır olduğunu ortaya koymaktadır. Sıcaklık artışının 2°C seviyesine ulaşması ise, doğal ekosistem ve insan toplulukları üzerinde geri döndürülemez ve kalıcı zararların meydana gelmesine yol açacaktır (IPCC, 2018)

İklim değişikliği ve küresel ısınma terimleri çoğu zaman birbirinin yerine kullanılsa da, kavramsal olarak farklılık göstermektedir. NASA'nın tanımına göre, küresel ısınma gezegenin uzun dönemli sıcaklık artışını ifade ederken, iklim değişikliği bu ısınmanın yanı sıra deniz seviyesindeki yükselmeler, buzulların erimesi, düzensiz yağış rejimleri ve taşkınlar gibi daha geniş ölçekli çevresel değişimleri kapsamaktadır (NASA, 2024). İklim sisteminin gelecekteki eğilimleri üzerinde insan kaynaklı etkiler belirleyici bir rol oynamaktadır. Çeşitli sera gazları iklimi etkilese de, CO₂ başlıca sorumlu bileşen olarak öne çıkmaktadır (NASA, 2025). İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı Şekil 1.1'de sunulmakta olup, en büyük payın fosil yakıt tüketimine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 1.1. İnsan Kaynaklı Emisyonlarda Sektör Payları (WRI, 2024)

Son yıllarda hızlı nüfus artışı, ormansızlaşma ve fosil yakıt kullanımındaki artış metan (CH₄), karbondioksit (CO₂), ozon (O₃), su buharı (H₂O) ve azot oksitler (NO_x) olmak üzere sera gazlarının atmosferik derişiminde önemli bir artışa neden olmuştur. Bu artış, küresel ısınmanın temel nedeni olarak kabul edilmektedir (Keskin ve Kanat, 2018). Sera gazları, yeryüzünden yayılan ısıyı atmosferde tutarak sıcaklık artışına ve dolayısıyla küresel ısınmaya yol açmaktadır. Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, atmosferdeki CO₂ derişiminin sanayi devriminden bu yana ve özellikle son yüzyılda belirgin bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Şekil 1.2’de, 1958 yılından günümüze atmosferdeki CO₂ derişimindeki değişim sunulmaktadır. Günümüzde atmosferik CO₂ seviyeleri ortalama 420 ppm (milyonda bir parça) düzeyine ulaşmış durumdadır (NASA, 2025; Kurnaz, 2019).



Şekil 1.2. Yıllara Göre Atmosferdeki CO₂ Derişimi

İKİNCİ BÖLÜM

HAVACILIK FAALİYETLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Havacılığın çevresel etkileri iki kategoriye ayrılabilir: gürültü ve egzoz gazı emisyonları. Bu nedenle, nüfusun önemli bir bölümü gürültü kirliliği ve yerel hava kalitesinin bozulmasından etkilenmektedir (Abrantes ve diğ., 2024). Uçakların yer operasyonları ve iniş-kalkış (LTO) döngüsü, insan sağlığını etkilediği bilinen çeşitli gaz ve partikül kirleticilerin salımına yol açmaktadır. Yer seviyesindeki emisyonların büyük havalimanları çevresinde ve bölgesel ölçekte hava kalitesinin düşmesine neden olmakta ve bu durum insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Hava araçlarının LTO döngüsünde neden olduğu emisyonlar, büyük havalimanları çevresinde erken ölümlere de neden olmaktadır. Ulaşım kaynaklı emisyonlar yalnızca iklim değişikliğini tetiklemekle kalmayıp, aynı zamanda şehirlerdeki hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biridir. Bu kirlilik, hem insan sağlığına hem de doğal çevreye ciddi zararlar vermektedir. ICAO'ya bağlı Havacılık Çevre Koruma Komitesi (CAEP), düzenli aralıklarla havacılık faaliyetlerinin gelecekteki çevresel eğilimlerini değerlendiren analizler gerçekleştirir. Bu analizler aşağıdaki unsurları kapsar (ICAO, 2022a):

- Küresel iklimi etkileyen uçak motoru sera gazı (GHG) emisyonları,
- Uçak gürültüsü,
- Yerel hava kalitesini (LAQ) etkileyen uçak motor emisyonları.

ICAO'nun stratejik amaçlarından biri sivil havacılık faaliyetlerinin olumsuz çevresel etkilerini en aza indirmektir. ICAO, çevre koruma çalışmalarını bütüncül bir bakış açısıyla ele almakta ve bu kapsamda gürültü, yerel hava kalitesi, iklim değişikliği ve hava aracı emisyonlarına odaklanan çeşitli faaliyetler yürütmektedir. ICAO, uluslararası sivil havacılık faaliyetlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla politikalar oluşturmakta, standartlar ve tavsiye niteliğinde uygulamalar geliştirmektedir. Havacılık faaliyetlerinin tümünü kapsayan bu standartlar ve tavsiyeler, ICAO tarafından hazırlanan Ekler (Annex) aracılığıyla düzenlenmiştir. ICAO'nun toplam 19 eki bulunmakta olup, Ek 16 çevrenin korunmasına ayrılmıştır. Ek 16, dört ciltten oluşmaktadır: Birinci cilt uçak gürültüsüne

ilişkin düzenlemeleri içerirken, diğer ciltler uçak motor emisyonlarını sınırlayan standartları kapsamaktadır. Ek 16'nın ciltleri aşağıdaki gibidir (ICAO, 2025a):

- ✓ Ek 16- Çevrenin Korunması- Cilt I- Uçak Gürültüsü
- ✓ Ek 16- Çevrenin Korunması- Cilt II- Uçak Motor Emisyonları
- ✓ Ek 16- Çevrenin Korunması- Cilt III- Uçak CO₂ Emisyonları
- ✓ Ek 16- Çevrenin Korunması- Cilt IV- Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması (CORSIA)

2.1. Küresel Isınma Potansiyeli ve Sera Gazları

IPCC'ye göre, iklim değişikliğinin başlıca nedeni insan faaliyetleridir. Yapılan çalışmalar, insan kaynaklı etkilerin iklim değişikliğine katkısının yaklaşık %90 olduğunu göstermektedir (Armstrong ve diğ., 2018). Bu etkinin temel kaynağı ise, Sanayi Devrimi sonrasında hızla artan enerji talebinin büyük ölçüde fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmasıdır. Kyoto Protokolü'nde esas alınan sera gazları Tablo 2.1'de detaylandırılmıştır. GWP, belirli bir sera gazının küresel ısınmaya katkısını referans gaz olan CO₂'ye kıyasla nicel olarak ifade eden bir metriktir. Sera gazlarının iklim değişikliği üzerindeki etkileri, küresel çapta kabul gören ortak bir ölçüt olan kilogram karbondioksit eşdeğeri (kg CO_{2e}) cinsinden hesaplanmaktadır. GWP değerleri sayesinde sera gazlarının iklim üzerindeki etkileri karşılaştırılabilir hale getirilmektedir. Bu noktada, neden CO₂ eşdeğerinin tercih edildiği sorusu önem kazanmaktadır. Atmosferde başlıca sera gazları arasında karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), su buharı (H₂O), ozon (O₃), azot oksit (NO_x) ve florlu gazlar yer almaktadır (Gielen ve Kram, 1998).

Tablo 2.1. Kyoto Protokolü'nde Baz Alınan Sera Gazları

İsim	Sembol
Karbondioksit	CO ₂
Metan	CH ₄
Nitroksit	NO _x
Hidrofloro karbonlar	HFCs

Perfloro karbonlar	PFCs
Sülfür Heksaflorit	SF6

Küresel Isınma Potansiyeli'nin (GWP) karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden raporlanmasının temel gerekçesi, CO₂'nin hem küresel sera gazı emisyonlarındaki baskın payı hem de atmosferdeki uzun süreli kalıcılığıdır. Karbondioksitin atmosferik ömrü 100 ila 1000 yıl arasında değişmekte olup, bu özellik CO₂'yi iklim sistemleri üzerinde uzun vadeli ve kümülatif etkiler yaratan bir unsur haline getirmektedir. Buna karşılık, NO_x ve CH₄ gibi diğer sera gazlarının atmosferik ömürleri göreceli olarak çok daha kısadır. Bu farklılık, CO₂'nin salınımını azaltmaya yönelik politikaların önceliklendirilmesinin bilimsel dayanağını oluşturmaktadır (Dessens ve diğ., 2014). Günümüzde atmosferde bulunan sera gazlarının %82'si CO₂, %10'u CH₄, %5'i N₂O ve %3'ü florlu gazlardan oluşmaktadır. Florlu gazlar, düşük atmosferik konsantrasyonlarına rağmen, yüksek GWP değerleri nedeniyle iklim değişikliği bağlamında orantısız bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, söz konusu gazların üretimi, kullanımı ve bertarafı sıkı düzenlemelere tabi tutulmaktadır (EPA, 2017).

Havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları iki ana kategori altında değerlendirmek gerekmektedir. İlk kategori, hava aracı operasyonları sırasında uçak motorlarında jet yakıtlarının yanması sonucu oluşan emisyonlardır. İkinci kategori ise hava ulaşımına erişimi mümkün kılan havalimanlarında enerji kullanımı ve diğer faaliyetlerden kaynaklanan emisyonlardır. Özellikle hava aracı operasyonlarında jet yakıtlarının yanması sonucu atmosfere salınan sera gazları, atmosferin ışıyım dengesini bozarak iklim sistemlerini etkilemektedir. Doğal sera etkisi yeryüzündeki yaşam için gerekli olmakla birlikte, insan faaliyetleri sonucu artan sera gazı emisyonları bu doğal dengeyi olumsuz yönde değiştirmektedir. Atmosferde biriken sera gazları, yeryüzünden yansıyan güneş ışıyımının daha büyük bir kısmını tutarak küresel ısınmaya yol açmaktadır (Hasanova, 2022; Ryley ve diğ., 2020). İklim değişikliğinin havacılığın işleyişi üzerine olumsuz etkileri de ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler aşağıda belirtilmiştir (Ryley ve diğ., 2020):

- Sıcak hava dalgalarının şiddetlenmesi, yağış ve rüzgâr koşullarındaki dalgalanmalar ve deniz seviyesinin yükselmesi ile havalimanı operasyonlarının olumsuz etkilemesi,
- İklim değişikliği sonucu ortaya çıkan aşırı hava koşulları ve bu koşulların öngörülemezliği sonucu uçuş operasyonlarında aksamalar,
- Tatil bölgelerinde iklim değişikliğinin yarattığı olumsuzluklarla beraber bu destinasyonlara olan ilginin azaltılması.

2.2. Hava aracı operasyonlarının iklim değişikliğindeki rolü

Havacılık sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2,5'ini oluşturmaktadır. Ancak, emisyonların yüksek irtifalarda salınması ve CO₂ dışındaki sera gazlarının etkisi nedeniyle, havacılık sektörünün insan kaynaklı küresel ısınmaya toplam katkısının yaklaşık %5 olduğu tahmin edilmektedir. Hava yolu seyahatine olan talebin artmasıyla birlikte, bu emisyonların önümüzdeki yıllarda artması beklenmektedir (Enes, 2021; Lundaev, 2019). Havacılıktan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının %95'i hava aracı operasyonlarından, %5'i ise havalimanlarında enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır (ACI, 2015). Hava araçlarının yerde ve havada gerçekleştirdiği hareketler, motorlarda jet yakıtlarının yanmasıyla üretilen itki kuvvetine dayanmaktadır. Bu süreçte, yakıtların yanması sonucunda atmosfere zararlı egzoz gazları ve partikül maddeler (PM) salınmaktadır. Salınan bu egzoz gazları atmosferde sera etkisini güçlendirerek iklim değişikliği üzerindeki etkilerin artmasına yol açmaktadır. Uçak operasyonlarından kaynaklanan emisyonlar başlıca karbondioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), su buharı (H₂O) ve diğer gazlardan oluşmaktadır (Xu Ve diğ., 2020).

CO₂ emisyonlarının, Kyoto Protokolü kapsamında tüm sera gazları yerine zorunlu raporlamaya konu edilmesinin temel nedeni, havalimanlarından kaynaklanan toplam sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık %95'inin karbondioksitten (CO₂) oluşmasıdır. Bu durum, düzenleyici otoritelerin büyük ölçüde CO₂ emisyonlarının azaltılmasına odaklanmasını sağlamaktadır. Buna karşın, diğer Kyoto Protokolü gazlarının raporlanması kuruluşların takdirine bırakılmıştır ve çoğunlukla gönüllü esaslara dayanmaktadır. Havacılık sektörü bağlamında değerlendirildiğinde,

havalimanları toplam havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5'ine katkıda bulunmaktadır. Bu oran, hava aracı operasyonlarının emisyon kaynakları arasında dominant bir paya sahip olduğunu ve emisyon azaltım stratejilerinin büyük ölçüde uçuş faaliyetlerine odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır (ACI, 2015).

2.3. Havalimanlarının iklim değişikliğindeki rolü

ICAO'ya göre, havalimanı; tamamen ya da kısmen hava araçlarının iniş, kalkış ve yüzey hareketleri için tahsis edilen, kara veya su üzerinde (ilgili bina, tesisat veya ekipmanlar dahil) belirlenmiş bir alan olarak tanımlanmaktadır (ICAO, 2009). Havalimanları, yerel, ulusal ve küresel taşımacılık ağlarının kritik düğüm noktaları olarak stratejik bir öneme sahiptir. Temel işlevleri, yolcular ve kargonun hava taşımacılığına erişimini sağlamaktır. Havalimanları genel olarak iki ana bölüme ayrılır: kara sahası ve hava sahası. Kara sahası; terminal binası, kargo terminali ve otopark alanı gibi yolcu odaklı tesisleri içermektedir. Bu alandaki tüm faaliyetler, yolcuların gereksinimlerini karşılamaya yönelik olarak düzenlenmektedir. Hava sahası ise apron, pist, kontrol kulesi ve uçak bakım tesisleri gibi hava araçlarıyla ilişkili tüm alan ve yapıları kapsamaktadır (Ortega Alba ve Manana, 2016).

Havalimanlarının karmaşık altyapısı ve çok yönlü hizmetleri nedeniyle, enerji tüketimleri çoğu zaman küçük bir şehir seviyesine ulaşmaktadır. (Costa ve diğ., 2012). Hava tarafındaki başlıca enerji tüketicileri; seyrüsefer sistemleri, hava trafik kulesi, apron ve pist aydınlatma sistemleridir. Buna ek olarak meteoroloji istasyonları ve itfaiye tesisleri de hava tarafında önemli ölçüde enerji tüketen unsurlar arasında yer almaktadır. (Ortega Alba ve Manana, 2016). Kara tarafında ise temel enerji tüketicisi terminal binasıdır. Yolcuların ve kargonun hava taşımacılığına erişimini sağlayan ana merkez olan terminal binasında, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemleri, aydınlatma ile bilgi ve iletişim teknolojileri sistemleri yüksek düzeyde enerji tüketmektedir (Costa ve diğ., 2012; Uysal ve Söğüt, 2017).

Uluslararası Havalimanları Konseyi (Airports Council International, ACI), havalimanı yetkilileri tarafından oluşturulan küresel bir organizasyondur. 1991 yılında kurulan ve merkezi Kanada'da bulunan ACI, Mayıs 2024 itibari ile 169 ülkede 814 üye kuruluşa sahiptir. Üyeleri tarafından işletilen toplam havalimanı sayısı 2.110 olup, kuruluşun temel amacı havalimanı standartlarının geliştirilmesi ve bu alanda ortak

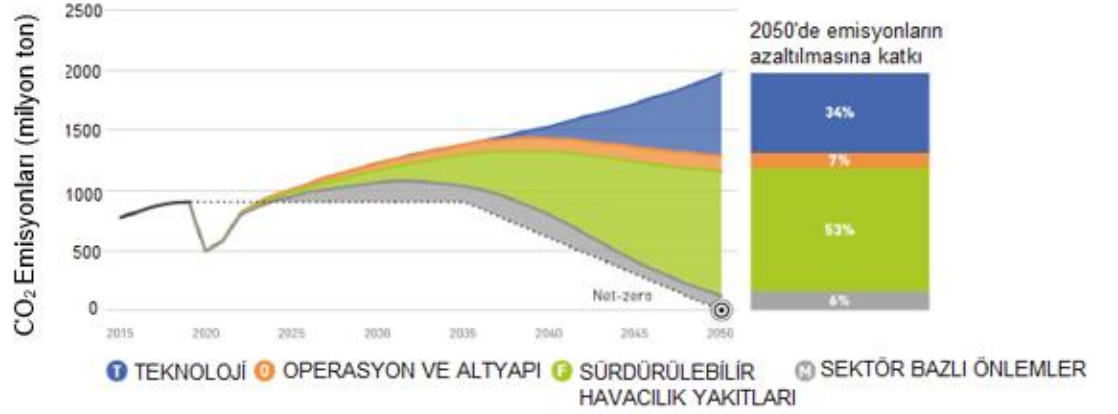
hareket edilmesini sağlamaktır. ACI, havalimanı kaynaklı karbon ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak üyelerini temiz ve sürdürülebilir teknolojilere yatırım yapmaları konusunda teşvik etmektedir. (ACI , 2024).

Havalimanları için kabul gören tek karbon yönetimi sertifikasyon standardı olan Havalimanı Karbon Akreditasyon Programı, sektör genelinde iklim değişikliğiyle mücadele uygulamalarını desteklemektedir. Bu program, havalimanlarının CO₂ emisyonlarını yönetme ve azaltma yönündeki çabalarını tanıyan ve değerlendiren dünyadaki tek sistemdir. Programa katılan havalimanları, farklı ölçütlere dayalı olarak belirlenen 7 akreditasyon seviyesine göre sertifikalandırılmaktadır. Mayıs 2023 ile Mayıs 2024 dönemini kapsayan rapor, havalimanlarının karbon yönetimi konusundaki ilerlemelerini ortaya koymaktadır. Rapora göre, akredite edilmiş havalimanları toplamda 1.037.292 ton CO₂ azaltımı gerçekleştirmiştir; bu, %14,8'lik bir düşüş anlamına gelmektedir. Aynı dönemde, programa akredite havalimanı sayısı 87 ülkede 558'e ulaşmış; bunlardan 70'i programa ilk kez dahil olmuştur. Bunun yanında, 132 havalimanı daha yüksek bir karbon yönetimi seviyesine yükselmiştir. Ayrıca, dünya genelindeki yolcu trafiğinin %51,5'i, Havalimanı Karbon Akreditasyon Programı kapsamında sertifikalandırılmış havalimanları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bulgular, havalimanlarının karbon emisyonlarını azaltma konusundaki taahhütlerinin ve sürdürülebilirlik uygulamalarının küresel ölçekte giderek yaygınlaştığını göstermektedir (ACA, 2025).

2.4. ICAO İklim Değişikliği Faaliyetleri

IPCC değerlendirme raporlarına göre, iklim değişikliği tehdidinin başlıca nedeni olan küresel ısınmanın 1.5°C ile sınırlandırılması, daha yüksek sıcaklık artışlarıyla karşılaştırıldığında, doğal ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde öngörülen zararları önemli ölçüde azaltacaktır. Bu hedef doğrultusunda, ICAO, 2010 yılında karbon nötr büyümeyi taahhüt eden ilk kuruluş olmuştur. Bu hedefe ulaşmak amacıyla ICAO; uçak teknolojileri, operasyonel iyileştirmeler, hava trafik yönetimi ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarının kullanımı gibi alanlarda kapsamlı stratejiler geliştirmiştir. Ancak, söz konusu önlemlerin 2020 sonrası karbon nötr büyüme hedefini karşılamakta yetersiz kalacağı öngörülmüş ve bu doğrultuda 2016 yılında Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması'nı

(CORSIA) benimsenmiştir. Şekil 2.1'de, alınacak önlemlerin 2050 karbon nötr hedefine katkıları gösterilmektedir. Bu katkılar arasında %53 ile sürdürülebilir havacılık yakıtları en yüksek paya sahipken, bunu %34 ile uçak teknolojilerindeki ilerlemeler izlemektedir (ICAO, 2022a).



Şekil 1.1. 2050 Karbon Nötr Hedefinde ICAO Önlem Sepetinin Payı (ICAO, 2022a)

2.5. AB Havacılık Kaynaklı Emisyon Azaltma Faaliyetleri

2023 yılında Avrupa'nın en büyük 40 havalimanı, 10,2 milyon uçuş ve 1,19 milyar yolcuya hizmet vererek hareketlilik, turizm ve ekonomik büyümeyi desteklemiştir. Ancak IPCC tarafından çevresel etkileri "azaltılması zor" bir sektör olarak sınıflandırılan havacılık, 2022 yılında küresel enerjiyle ilişkili CO₂ emisyonlarının %2'sine neden olmuştur. Emisyonların uçuş operasyonları sırasında gerçekleşmesi ve bu operasyonların yüksek irtifalarda olması sera etkisini arttırmaktadır. Bu nedenle küresel ısınma etkisi yalnızca CO₂ kaynaklı etkinin 2,6 katı olduğu hesaplanmıştır. Yolcu sayısının yıllık ortalama %4,7 artması öngörülürken, emisyonların önümüzdeki yıllarda üç katına çıkabileceği tahmin edilmektedir. (Castello ve Haegeman, 2024). Avrupa Birliği (AB) 2030'a kadar sera gazlarını 1990 yılına göre en az %55 azaltmayı hedeflemiştir. Bu hedef, AB İklim Yasası'na dahil edilmiştir. Bununla beraber AB, 2050 yılı itibari ile net sıfır sera gazı emisyonuna sahip bir ekonomi oluşturarak iklim nötr hedefine ulaşmak istemektedir. Bu hedefi AB İklim Yasası ile güvence altına almıştır. (E.C, 2025).

AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS), iklim değişikliğiyle mücadele için geliştirilen piyasa temelli bir mekanizmadır. İlk kez 1997'de Kyoto Protokolü ile

uluslararası alanda benimsenmiş ve gelişmiş ülkelere yasal emisyon azaltım hedefleri getirmiştir. 2005 yılında dünyanın ilk büyük ölçekli ETS'si olan EU ETS kurulmuştur. Başlangıçta enerji ve sanayi sektörlerini kapsayan EU ETS, zamanla farklı sektörleri de içine alarak karbon kredilerinin ülkeler ve şirketler arasında alınıp satılmasına olanak sağlamış ve en düşük maliyetle emisyon azaltımını teşvik etmiştir. 2012 yılından itibaren havacılık sektörü de EU ETS'ye dahil edilmiştir. Bu sistem çerçevesinde havayolu şirketleri, saldıkları CO₂ emisyonlarını izlemek, raporlamak ve doğrulamakla yükümlüdür. Hükümetler veya yetkili kurumlar, sektörler için yıllık emisyon limitleri belirler ve bu limitler zamanla sıkılaştırılır. İşletmeler, kendilerine tahsis edilen emisyon haklarıyla faaliyet gösterir. Eğer bir işletme, izin verilen limitin altında emisyon salarsa fazla haklarını açık pazarda satabilir; limiti aşan işletmeler ise bu hakları satın alarak cezadan kaçınabilir. Bu ticaret, karbon fiyatını belirleyerek şirketleri daha az emisyon salmaya teşvik eder. ETS, çevresel sürdürülebilirliği desteklerken düşük karbon teknolojilerine yatırım yapan şirketlere ekonomik avantajlar da sağlar (Metsims, 2024; EC, 2025). Avrupa Birliği, havacılık sektörünün büyümesini sürdürürken bu alandan kaynaklanan iklim değişikliği etkilerini azaltmayı temel hedeflerinden biri olarak belirlemiştir. Bu kapsamda, AB; teknolojik ilerlemeler, sektör odaklı stratejiler, havalimanı uygulamaları, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının geliştirilmesi, emisyon ticaret sistemi ve etkin hava trafik yönetimi gibi çeşitli alanlarda yoğun çalışmalar gerçekleştirmektedir (EASA,2022).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

HAVACILIKTA İKLİM DEĞİŞİKLİĞİYLE MÜCADELE

İklim değişikliğiyle mücadele, tüm sektörlerde sera gazı emisyonlarının sınırlandırılmasını gerektirir. Ancak, havacılıktaki emisyonları azaltmak teknik (düşük karbonlu alternatiflerin eksikliği) ve hukuki (uluslararası havacılığın bir devlete ait olmaması) nedenlerle zordur. Bu konuda iki ana yaklaşım geliştirilmiştir. Uluslararası düzeyde, ICAO teknik standartlar ve piyasa temelli bir mekanizma benimsemiştir. Aynı zamanda, ülkeler kendi vergilendirme politikalarını, teknik standartlarını ve altyapı önlemlerini uygulamaktadır (Mayer ve Ding, 2023). Havacılık endüstrisi, iklim üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla harekete geçmiş ve 2050 yılına kadar Net Sıfır Karbon hedefine ulaşmayı taahhüt etmiştir. IPCC'ye göre, havacılık faaliyetleri insan kaynaklı karbon emisyonlarının %2 ila %3'ünden sorumludur. Havalimanlarının emisyon katkısı hava trafiği operasyonlarına kıyasla daha düşüktür. Havacılık sektörün her bileşeni, küresel iklim değişikliği hedeflerine ulaşılabilmesi için GHG emisyonlarını azaltma ve yönetme sorumluluğunu üstlenmelidir (ICAO, 2022b).

Havacılığın iklim üzerindeki etkisi, diğer sektörlerin çoğundan daha hızlı artmaktadır. OECD verilerine göre, havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları 2013 ile 2018 yılları arasında %28 artmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre ise, havacılık kaynaklı emisyonlar 1980'den 2017'ye kadar 2,9 kat artmıştır. (IEA, 2019; Mayer ve Ding, 2023). Günümüzde kerosen en yaygın kullanılan uçak yakıtıdır. Tüm doğrudan uçak emisyonlarının yaklaşık %70'i CO₂'den oluşmaktadır (IPCC, 2006). ICAO tarafından CO₂ emisyonlarına yönelik yeni bir standart belirlenmiştir. Uluslararası Havacılık için Karbon Denkleştirme ve Azaltıma Şeması (CORSIA), karbon nötr büyüme için izin verilen emisyon sınırını aşan uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonları kontrol etmeyi amaçlamaktadır. CORSIA, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan emisyonları kontrol altına alan tek mekanizma olarak hizmet vermektedir (IATA, 2019a).

İklim değişikliğinin temel nedeni fosil yakıtların kullanımı olduğundan, bununla mücadelede en etkin yol sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiştir. Havacılık sektöründe alternatif yakıt kullanımı, iki temel gereklilik nedeniyle büyük önem taşımaktadır: fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması ve GHG emisyonlarının

azaltılması (Williams ve diğ., 2012). Araştırmacılar da geleneksel jet yakıtına alternatifler bulmaya çalışmaktadır. Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları (SAF), geleneksel jet yakıtına kıyasla yaşam döngüsü boyunca yaklaşık %80 daha az CO₂ salınımına neden olmaktadır. Bundan dolayı, sürdürülebilir biyoyakıtlar, havacılık sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarını fosil yakıtlara kıyasla %80 oranında azaltma potansiyeline sahiptir (Hasan ve diğ., 2021).

Havacılık, küresel iklimi hem CO₂ kaynaklı hem de CO₂ dışındaki emisyonlar nedeniyle etkilemektedir. CO₂ dışında; ozon, metan, nitrojen oksitler, su buharı ve aerosoller gibi kirleticiler küresel ısınmayı önemli ölçüde etkilemektedir. Uçaklar, seyir irtifasında salındığında ozon oluşumuna neden olan azot oksitler (NO_x) yaymaktadır. Ayrıca uçaklar, yoğunlaşma izleri oluşumunu tetiklemekte ve bu izler sirüs bulutlarının oluşumunu artırmaktadır. Sirüs bulutlarının ise küresel ısınma etkisini arttırdığı bilinmektedir. Bu CO₂ dışı etkilerin, havacılığın sadece CO₂ kaynaklı etkilerine kıyasla yaklaşık iki ila dört kat daha fazla küresel ısınma etkisine sahip olduğu tahmin edilmektedir (IPCC, 2007). Tüm bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda havacılık sektöründe iklim değişikliğiyle mücadelede bütünsel bir yol izlenmesi gerekmektedir. ICAO, küresel düzeyde belirlenen hedeflere ulaşmak ve uluslararası havacılığın sürdürülebilir büyümesini desteklemek amacıyla bir dizi tedbir paketi uygulamaya koymuştur. Bunlar aşağıdaki gibidir (ICAO, 2019);

- ✓ Uçak teknolojilerinin geliştirilmesi,
- ✓ Hava Trafik Yönetimi ve Operasyonları (Operasyonel iyileştirmeler),
- ✓ Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımı ve
- ✓ CORSIA

3.1. Uçak Teknolojilerinin Geliştirilmesi

Hava aracı emisyonlarının azaltılmasında en etkili yöntemlerden biri, aerodinamik performansı yüksek gövde tasarımı ile birlikte daha verimli kanatlar, gelişmiş kontrol yüzeyleri ve yüksek taşıma tertibatlarının (flap, slat) optimize edilmesidir. Kanat uçlarında oluşan girdapların neden olduğu indüklenmiş sürüklenme, winglet ve sharklet gibi kanat ucu tasarımlarıyla önemli ölçüde azaltılmakta; bu da yakıt verimliliğini artırarak emisyonların düşürülmesine katkı sağlanmaktadır. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler, özellikle kompozit malzemelerin

havacılık endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmasıyla birlikte, hava aracı gövde ve yapı elemanlarının daha hafif tasarlanabilmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, hem yakıt verimliliğinin artırılması hem de emisyonların azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Motor teknolojilerindeki gelişmeler, aerodinamik sürüklenme azaltma yöntemleri, üretim ve yapısal tasarım stratejileri ile hava aracı kaynaklı çevresel etkiler azaltılabilir. (ICAO, 2016).

Elektrikli ve hibrit tahrik sistemlerinin kara taşıtlarında fosil yakıtlı motorlara kıyasla çok daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu günümüzde geniş ölçüde kabul görmektedir. Benzer teknolojilerin havacılık sektörüne uyarlanması, özellikle sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından önemli bir potansiyele işaret etmektedir. Nitekim elektrikli tahrik sistemleri halihazırda hafif ve kısa menzilli hava araçlarında başarıyla uygulanmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin dar ve geniş gövdeli uçaklara entegrasyonu hâlâ ciddi teknik zorluklar barındırmaktadır. Özellikle uzun menzilli uçuş gereksinimleri bağlamında, artan kalkış ağırlığı ve uçuş mesafesi daha yüksek enerji ihtiyacı doğurmaktadır; bu da batarya sistemlerinin ağırlığının operasyonel verimlilik açısından ciddi bir engel oluşturmasına neden olmaktadır. Mevcut batarya teknolojisinin enerji yoğunluğu, bu tür uygulamalar için yetersiz kalmakta ve sektördeki ilerlemeyi sınırlamaktadır (Wheeler ve diğ., 2021).

Ancak, Avrupa Birliği ve diğer öncü ülkelerde bu engellerin aşılmasına yönelik kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Örneğin, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) tarafından Clean Sky 2 programı kapsamında sürdürülen bir projede, 70 yolcu kapasiteli ve 800 deniz mili menzile sahip bir hibrit elektrikli uçağın kavramsal tasarımı üzerinde çalışılmakta olup, bu teknolojinin 2035 yılı itibarıyla ticarileştirilmesi hedeflenmektedir (Strack ve diğ., 2017). NASA ile GE Havacılık, tek koridorlu yolcu uçaklarına güç sağlayabilecek hibrit bir motorun geliştirilmesine yönelik iş birliğine başlamıştır. GE Havacılık, söz konusu itki sistemini havada test edecek uçağın modifikasyonu için Boeing ile iş birliği yapmaktadır (GE, 2022). Hibritleşme araştırmalarını ilerletmek amacıyla Airbus, sektörün önde gelen aktörleriyle yakın iş birliği içinde çalışmalar yürütmektedir. Bu kapsamda, 2022'de Airbus ile Renault Grubu arasında, her iki şirketin elektrifikasyon yol haritalarını hızlandırmayı hedefleyen bir araştırma ve geliştirme anlaşması imzalanmıştır. Bunu takiben, 2023'te Airbus ile STMicroelectronics arasında, hibrit

ve elektrikli hava araçlarının geliştirilmesine yönelik araştırmaları ilerletmek için bir iř birliği protokolü gerçekleştirilmiştir. Bu girişimler, havacılıkta dūřuk karbonlu çözümlerin ticarileşmesi sürecini hızlandırma potansiyeline sahiptir (Airbus, 2025).

3.2. Hava Trafik Yönetimi ve Operasyonları

Hava ulaşımı, önemli sosyo-ekonomik faydalar sağlamakla birlikte, uçak kaynaklı sera gazı emisyonları ve gürültü gibi çevresel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Uçaklar, kirletici gaz ve partikülleri doğrudan üst troposfer ve alt stratosfer tabakalarına salarak atmosferi olumsuz etkilemektedir (IPCC, 1999). Bununla beraber, havalimanlarına yakın bölgelerde yaşayan milyonlarca insan, uçak motorlarından kaynaklanan kirletici gazlara ve gürültüye maruz kalmaktadır (Barret ve diğ., 2010). Sürdürülebilir havacılık yakıtları, hidrojenle çalışan ya da elektrikli uçaklar gibi çözümler henüz geliştirme aşamalarında ve bu teknolojilerin tam anlamıyla yaygınlaşması onlarca yıl sürebilir. Bu nedenle, hava araçlarından kaynaklanan kirletici emisyonların atmosfere salınmasını önlemek ve havacılığın iklim değişikliği üzerindeki etkilerini azaltmak için daha hızlı çözümler gerekmektedir. Karbonsuzlaşma açısından en büyük potansiyeli sürdürülebilir havacılık yakıtlarına geçiş sunsa da, kısa vadede hava trafik yönetimine (ATM) yeni teknoloji ve prosedürlerin entegre edilmesiyle de çevresel etkiler azaltılabilir. Bu tür değişiklikler, gürültü ve partikül madde kirliliği gibi CO₂ dışı çevresel etkilerin azaltılmasına da önemli katkılar sunar (Euroepan Commision, 2024).

Gecikmeler, havayolu şirketleri için ek maliyetlere neden olmakta ve uçakların daha uzun rotalarda uçması sonucu havacılık sektörüne ait ilave emisyonlara yol açmaktadır. 2004 yılında başlatılan Tek Avrupa Hava Sahası (SES) girişimi, Avrupa hava sahasındaki parçalanmış yapıyı ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. SES girişiminin amacı Avrupa hava sahasındaki bölünmeleri azaltarak ATM performansını emniyet, kapasite, maliyet ve çevresel açıdan arttırmaktır. Avrupa Tek Hava Sahası Hava Trafik Yönetimi Araştırmaları (SESAR) projesi, SES girişiminin teknolojik ayağını oluşturup, Avrupa'nın ATM altyapısını ve operasyonel prosedürlerini modernize etmeyi hedeflemektedir (Euroepan Commision, 2025). SESAR kapsamında yürütölen çalışmaların odak noktalarından biri, kalkış öncesi taksi sürecinin daha etkin ve öngörülebilir hale getirilmesi, hava sahasında varış anında oluşan bekleme ve

yönlendirme gereksinimlerinin azaltılması ile ileri teknolojiler aracılığıyla uçuş rotalarının optimize edilmesidir. Bu iyileştirmeler, yakıt tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe doğrudan katkı sağlamaktadır (SESAR, 2025).

Sürekli Tırmanış (CCO) ve Sürekli Alçalış (CDO) operasyonları, hava sahası yapısı ve hava trafik kontrolörü desteğiyle uçakların kesintisiz ve optimum uçuş rotalarını izlemesini sağlayan yöntemlerdir. Bu teknikler, yakıt tüketimini, emisyonları, gürültüyü ve yakıt maliyetlerini azaltırken uçuş emniyetini korur. CCO, kalkışta sürekli tırmanış; CDO ise inişte minimum motor gücüyle kesintisiz alçalışı ifade eder. Bu uygulamalar sayesinde daha az bekleme ve daha verimli seyir sağlanarak çevresel ve ekonomik faydalar elde edilir. EUROCONTROL, 2018 yılında Avrupa Sivil Havacılık Konferansı bölgesi genelinde CCO ve CDO operasyonlarının optimize edilmesine yönelik yakıt tasarrufu, emisyon azaltımı ve maliyet kazançlarını değerlendiren bir analiz gerçekleştirmiştir. 2017 yılına ait trafik verilerine dayanan çalışmada Genel olarak, CCO ve CDO optimizasyonu ile Avrupa genelinde yılda 340.000 ton yakıt, 1,1 milyon ton CO₂ ve 150 milyon € tasarruf sağlanabileceği sonucuna varılmıştır (EUROCONTROL, 2025).

3.3. Sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF)

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF), yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve geleneksel fosil bazlı Jet A-1 yakıtıyla karıştırılıp uçaklarda kullanılabilen bir alternatif jet yakıtıdır. SAF, mevcut uçak motorları ve yakıt ikmal altyapısıyla uyumlu olup herhangi bir teknik değişiklik gerektirmeden kullanılabilir. Fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere önemli miktarda kirletici emisyonlar salınır. SAF üretiminde kullanılan biyolojik kökenli hammaddeler sayesinde, yaşam döngüsü boyunca fosil bazlı jet yakıtlarına kıyasla atmosfere salınan kirletici emisyonlarda anlamlı bir azalma sağlanmaktadır. SAF, CO₂ emisyonlarını %80'e kadar azaltma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, SAF kullanımı net sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. SAF, sürdürülebilir olarak kabul edilir. Çünkü üretiminde kullanılan hammaddeler (örneğin atık yağlar, tarım atıkları, gıda dışı bitkiler) gıda üretimini engellemez, su kaynaklarını tüketmez ve ormanlara zarar vermez. Yani doğal kaynaklara zarar vermeden ve ekolojik yıkıma yol açmadan üretilir. (TOPSOE, 2025; IATA, 2025a).

SAF, üretim yöntemi ve kullanılan hammaddeye bağlı olarak %10 ile %50 arasında jet yakıtıyla karıştırılarak kullanılabilir. Ancak CO₂ emisyonlarını daha da azaltmak için %100 SAF ya da hidrojen gibi alternatif yakıtların kullanılması gereklidir. Bu geçişin sağlıklı şekilde yapılabilmesi için, SAF'ların; uçuş performansı, gaz ve partikül emisyonlarına etkisi, motor ve yakıt sistemleriyle uyumluluğu, titreşim ve gürültü gibi ekileri teknik açıdan detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir (Undavalli ve diğ., 2023). SAF kullanımını önemli çevresel faydalar sunsa da, uygulanmasında bazı zorluklar vardır. En büyük zorluklardan biri, SAF üretiminin yeterince yaygın olmaması ve talebi karşılayamamasıdır. Ayrıca, SAF üretim maliyetleri geleneksel jet yakıtlarına göre %120 ile %700 arasında daha yüksektir. Sınırlı hammadde erişimi ve yetersiz altyapı, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının yaygın olarak kullanılmasının önündeki diğer engellerdir (Watson ve diğ., 2022). Bu nedenle, SAF'ın yaygınlaşması için daha fazla yatırım, teşvik ve devlet desteğine ihtiyaç vardır (Lau ve diğ., 2024). Tüm bu zorluklara rağmen bugüne kadar başta Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'daki havalimanları olmak üzere, 46 farklı havalimanından gerçekleşen 360.000'in üzerinde ticari uçuşta SAF kullanılmıştır (US Department of Energy, 2025).

3.4. Uluslararası Havacılığa Yönelik Karbon Denkleştirme ve Azaltma Şeması (CORSIA)

Havacılığın karbon ayak izini azaltmak ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) 1,5°C hedefine ulaşmak amacıyla iki uluslararası piyasa temelli mekanizma tasarlanmış ve uygulamaya konulmuştur (UNFCCC, 2015). Bunlardan biri, 2012 yılında havacılık sektörünü de kapsayacak şekilde genişletilen Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi'dir (EU ETS). Diğeri ise, uzun süren uluslararası müzakerelerin ardından 2016 yılında ICAO'nun 39. Genel Kurulu'nda kabul edilen CORSIA'dır. 2021 yılında tam olarak faaliyete geçen CORSIA, zamanla daha fazla ülkeyi kapsayacak şekilde genişleyecektir. Her iki mekanizma da havacılığın iklim değişikliği etkisini azaltmayı amaçlamaktadır; zira havayolu şirketleri, belirli oranlardaki CO₂ emisyonları için ya emisyon izinleri (EU ETS) ya da dengeleme birimleri (CORSIA) sunmak zorundadır. Bu izinler ve dengelemeler, başka yerlerde sağlanan CO₂ azaltımlarını temsil etmektedir (Maertens, 2019). Bu küresel

piyasa temelli mekanizma, havacılık sektörünün iklim üzerindeki etkisini sınırlamayı hedeflemektedir. CORSIA, havayolu şirketlerinin 2019 seviyelerini aşan CO₂ emisyonlarını dengelemelerini zorunlu kılmaktadır. Etki değerlendirmeleri ve mevcut bilimsel veriler doğrultusunda yapılandırılan CORSIA, bu dengelemenin ya karbon kredileri yoluyla ya da CORSIA'ya Uygun Yakıtları (CEF) kullanılarak gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece uluslararası havacılık sektörünün 2020 yılından itibaren karbon nötr büyüme sağlaması hedeflenmektedir (Prussi, 2021).

CORSIA, havacılığın çevresel etkilerini azaltmaya yönelik teknolojik ilerlemeler, operasyonel iyileştirmeler ve SAF kullanımı gibi çabaların yerine geçmesi amacıyla tasarlanmamıştır. CORSIA, ICAO tarafından benimsenen önlem sepetine alternatif bir program değildir; aksine, bu önlemleri tamamlayıcı nitelikte tasarlanmış bir mekanizmadır (IATA, 2025b). Haziran 2018'de ICAO Konseyi, CORSIA'ya ilişkin Uluslararası Standartlar ve Tavsiye Edilen Uygulamaları (SARP) içeren “Ek 16'nın IV. cildi olan CORSIA'nın birinci baskısını kabul etmiştir. “CORSIA SARPs” olarak da bilinen bu düzenlemeler, 1 Ocak 2019 tarihinden itibaren tüm ICAO üye devletlerinde uygulanmaya başlanmıştır. Temmuz 2023'te, ICAO Genel Kurulu'nun kararı doğrultusunda yürütülen periyodik değerlendirme sonuçlarını yansıtmak üzere Ek 16, Cilt IV'ün ikinci baskısı yayımlanmıştır. Bu ikinci baskı, ilk baskının yerini almış olup 1 Ocak 2024 itibarıyla yürürlüğe girmiştir. Ek 16, Cilt IV, devletlerin CORSIA'yı yürütmesine ilişkin ayrıntılı kuralları içermekte olup emisyonların izlenmesi, raporlanması, doğrulanması gibi hususları kapsamaktadır (IATA, 2024). CORSIA yalnızca uluslararası uçuşlara uygulanmakta olup, belirli uçuş kategorileri kapsam dışında tutulmuştur. Bu bağlamda, “devlet uçuşları” olarak tanımlanan askeri, gümrük ve kolluk kuvvetlerine ait operasyonel uçuşlar CORSIA yükümlülüklerine tabi değildir. Buna ek olarak, belirli teknik ve operasyonel niteliklere sahip bazı uçuşlar da sistemin dışında bırakılmıştır. Muafiyet tanınan bu durumlar aşağıda belirtilmiştir (CAA, 2025):

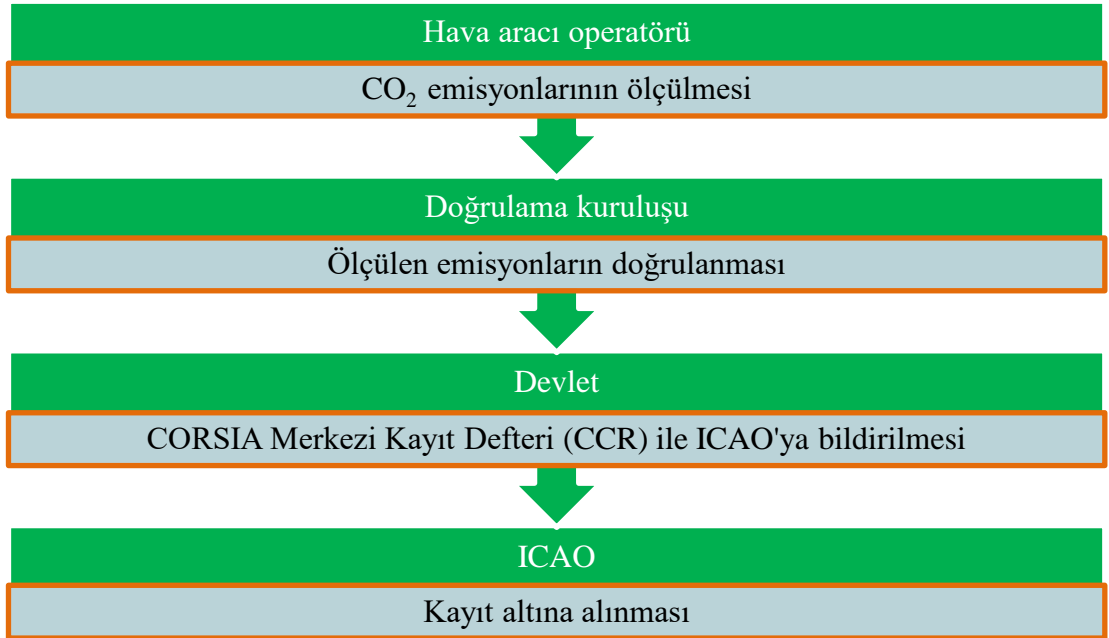
- Azami kalkış ağırlığı 5.700 kilogramdan az olan hava araçları ile gerçekleştirilen uluslararası uçuş operasyonları,
- İnsani yardım, acil tıbbi müdahale ve yangınla mücadele gibi kamu hizmeti amacıyla yapılan özel görev uçuşları,

- Yıllık uluslararası uçuş kaynaklı toplam CO₂ emisyonu 10.000 metrik tonun altında kalan hava aracı işleticileri.

Bu kategorilere giren uçuşlar, CORSIA kapsamında öngörülen izleme, raporlama, doğrulama ve dengeleme yükümlülüklerinden muaftır.

3.4.1. CORSIA'nın Uygulanmasında MRV Sisteminin Rolü

CORSIA'nın etkin ve güvenilir biçimde uygulanabilmesi, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının doğru ve şeffaf bir İzleme, Raporlama ve Doğrulama (MRV) sistemi ile yürütülmesine bağlıdır. Bu kapsamda, doğrulama işlemi, tüzel kişiliğe sahip, akredite edilmiş ve tamamen bağımsız üçüncü taraflarca gerçekleştirilmelidir. 1 Ocak 2019 tarihi itibarıyla, uluslararası uçuş gerçekleştiren tüm hava aracı operatörleri, bu uçuşlara ilişkin CO₂ emisyonlarını izlemek, ölçmek ve bağımsız doğrulayıcılar aracılığıyla doğrulamakla yükümlüdür. Doğrulanmış emisyon verileri, ilgili hava aracı operatörleri tarafından bağlı oldukları Devletin havacılık otoritesine bildirilmelidir. Devletler ise bu verileri toplayarak CORSIA Merkezi Kayıt Defteri (CCR) aracılığıyla ICAO'ya iletir. Bu veri akış süreci, Şekil 3.1'de gösterilen iş akış şemasında sunulmuştur. (ICAO, 2023a).



Şekil 2.1. CORSIA MRV Akış Şeması

Hava aracı operatörleri, uluslararası uçuşlardan kaynaklanan yakıt tüketimlerini, Annex 16, Cilt IV'te tanımlanan uygun yöntemlerle izlemeli ve belgelemelidir. Bu süreçte operatörlerin yıllık CO₂ emisyon miktarları temel alınarak iki farklı izleme yaklaşımı benimsenmiştir (ICAO, 2023a; SHGM, 2018).

- Yıllık CO₂ emisyonları 500.000 ton veya daha fazla olan hava aracı operatörleri, yalnızca Yakıt Tüketimi İzleme Yöntemini (Fuel Use Monitoring Method) kullanmalıdır.
- Yıllık CO₂ emisyonları 500.000 tondan az olan hava aracı operatörleri ise tercihe bağlı olarak Yakıt Tüketimi İzleme Yöntemini ya da ICAO CORSIA CO₂ Tahmin ve Raporlama Aracını (CERT) kullanabilirler.

3.4.2. CORSIA'ya Uygun Yakıtlar

CORSIA'nın temel amacı, uluslararası havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak ve sektörde karbon nötr büyümeyi sağlamaktır. Bu kapsamda, hava aracı operatörleri CORSIA'ya uygun yakıtlar (CEF - CORSIA Eligible Fuel) kullanarak denkleştirme yükümlülüklerini azaltabilirler. Bu yakıtlar iki gruba ayrılmaktadır (ICAO, 2022a):

CORSIA Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (SAF - Sustainable Aviation Fuel): Yenilenebilir kaynaklardan veya atıklardan elde edilen, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan yakıtlardır.

CORSIA Düşük Karbonlu Havacılık Yakıtı (LCAF - Lower Carbon Aviation Fuel): Fosil kökenli olmakla birlikte, belirlenen sürdürülebilirlik kriterlerine uygun şekilde üretilen ve daha düşük karbon salımı sağlayan yakıtlardır.

Bu iki yakıt türü birlikte CORSIA'ya Uygun Yakıtlar olarak adlandırılır. Hava aracı operatörleri, bu yakıtları kullanarak saldıkları emisyonların bir kısmını dengeleme zorunluluğundan muaf tutulabilir veya dengeleme miktarını azaltabilirler. Bir yakıtın CORSIA kapsamında uygun kabul edilebilmesi için belirli teknik ve çevresel standartları karşılaması gerekir. Yakıtların CORSIA'ya uygunluğuna ilişkin tüm kriterler ICAO'nun dökümanlarında yer almaktadır (ICAO, 2022a; ICAO, 2023a).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

4.1. Havaaracı Operasyonları Kaynaklı Çevresel Etkiler

Hava araçlarının iniş-kalkış (LTO – Landing and Take-off) döngüsü ile tırmanma, seyir ve alçalma (CCD) fazlarında neden oldukları emisyonlara ilişkin, hem ülkemizde hem de uluslararası düzeyde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar genellikle farklı hava aracı tiplerini, çeşitli havalimanlarını ve farklı hava yolu şirketlerini kapsayacak şekilde geniş bir yelpazede ele alınmıştır. Bu çalışmalar, operasyon sırasında atmosfere salınan farklı kirletici gazlara odaklanmakta ve bu emisyonların miktarları ile dağılımlarını, hava aracı tipine, uçuş fazına ve işletme koşullarına göre analiz etmektedir.

Sanajou ve Tchepel (2024), hava araçlarının LTO döngüsünde atmosfere salınan CO₂ dışı emisyonların belirlenmesi amacıyla yeni bir modelleme aracı geliştirmişlerdir. Modelin uygulanmasında, Flightradar24'ten elde edilen veriler ile Avrupa Çevre Ajansı tarafından sağlanan emisyon faktörleri kullanılmış ve Lizbon Havalimanı üzerinde test edilmiştir. Uçuşun farklı aşamalarında gerçekleştirilen analizler, HC ve CO emisyonlarının büyük ölçüde taksi (yer) aşamasında (yaklaşık %93 oranında), NO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarının ise çoğunlukla tırmanış aşamasında (%48 ve %35) atmosfere salındığını ortaya koymuştur.

Yılmaz ve Behçet (2024), Kütahya Zafer Havalimanı'nda 2022 yılı boyunca iniş ve kalkış yapan sivil hava araçlarının neden olduğu CO₂, HC, CO ve NO_x emisyonlarını, IPCC Tier 2 metodolojisi kullanılarak değerlendirmiştir. Çalışmada, uçuş fazlarına göre LTO sayıları, yakıt tüketimi ve ilgili emisyon değerleri uçak tipine göre hesaplanmıştır. Bulgulara göre, en fazla LTO gerçekleştiren B738 tipi uçaklar, toplam emisyonlar içinde CO₂'nin %55'ini, HC'nin %31'ini, CO'nun %46'sını ve NO_x'in %59'unu oluşturmuştur. Havalimanı genelinde yıllık toplam CO₂ emisyonu 1.873 ton, HC 0,88 ton, CO 5,83 ton ve NO_x 7,85 ton olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, LTO döngüsünün havalimanı kaynaklı emisyonlarda önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir.

Christodoulakis ve diğ. (2022), 2002-2019 yılları arasında Atina Uluslararası Havaalanı'na iniş kalkış gerçekleştiren uçakların LTO döngüsü sırasında atmosfere salmış olduğu kirletici emisyonları belirlemişlerdir. LTO döngüsü düşük irtifada ve yerleşim yerlerine yakın gerçekleştiğinden, atmosfere salınan kirletici gazlar havalimanı ve çevresindeki hava kalitesini doğrudan etkilemektedir. Araştırmanın bulgularına göre; 2002-2019 yılları arasında Atina Uluslararası Havaalanı'ndaki ticari uçakların LTO döngüsünde atmosfere saldığı toplam emisyon miktarları 1.47 kt HC, 6.555 kt CO₂, 0.3 kt PM, 18.4 kt CO ve 28.4 kt NO_x olduğun tespit etmişlerdir.

Aygün ve Sheikhi (2022), yakın itki kuvvetine sahip (117kN - 133 kN) 24 farklı turbofan motoru, LTO döngüsü süresince eksergo-çevresel, enerjetik ve ekserjetik araçlar yardımıyla incelemişlerdir. Araştırmanın bulgularına göre; en yüksek CO emisyonu rölanti (taksi) fazında atmosfere salınırken, en yüksek NO_x emisyonları ise kalkış aşamasında atmosfere salınmıştır. Ayrıca turbofan motorlarda en yüksek ekserji verimi tırmanma fazında (%15,88 ile % 24,31 arasında) en düşük ekserji verimi ise rölanti fazında (%4,59 ile %7,46 arasında) gerçekleşmiştir.

Akdeniz (2022), Hasan Polatkan Havalimanı'nda hava aracı operasyonlarından kaynaklı HC, CO ve NO_x emisyonları ile bu emisyonların çevresel ve ekonomik etkilerini incelemiştir. Farklı uçak tipleri için LTO döngüsünde gerçekleştirdiği analizlerde gerçek uçuş verileri ve ICAO Uçak Motoru Emisyonları Veri Tabanı'nı (AEED) kullanmıştır. Çalışma bulgularına göre, yıllık toplam emisyon miktarları NO_x için 4.156,391 kg/yıl, HC için 601,067 kg/yıl ve CO için 6.074,905 kg/yıl olarak belirlenmiştir. LTO döngüsünün fazları incelendiğinde, taksi fazı %52 ile toplam emisyonların en büyük kısmını oluşturmakta; bunu %19 ile yaklaşma fazı takip etmektedir. Kalkış ve tırmanma fazlarının ise toplam emisyonlardaki payı sırasıyla %11 ve %18'dir. Özellikle tırmanma fazı, salınan toplam NO_x'in %44'ünü oluşturarak bu kirleticinin en yoğun salındığı faz olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, A321 tipi uçağın tek başına CO, NO_x ve HC emisyonlarının yarısından fazlasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, uçak tipi ve uçuş fazlarının emisyon profilleri üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Gürçam ve diğ. (2021), Türkiye'de kentsel hava kirliliğinin en yüksek fakat nüfusun en az olduğu Iğdır'da hava taşımacılığının hava kirliliğine etkisini

incelemişlerdir. İğdır Havalimanı gerçek uçuş verileri ve AEED yardımıyla kirletici emisyonları hesaplamışlardır. Araştırmanın bulgularına göre; A319 uçağının en iyi yanma reaksiyonununa sahip motor ile donatıldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca A310 uçağının ise LTO döngüsünde en fazla yakıt tüketimine ve en yüksek CO₂, CO ve NO_x salımına neden olduğu tespit edilmiştir.

Aygün ve Çalışkan (2021), ticari uçaklarda genel olarak kullanılan iki farklı turbofan motorun (F1 ve F2 motorları) tırmanma, taksi, kalkış ve yaklaşma aşamalarını içeren LTO döngüsüne ait çevresel emisyonlar, küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve çevresel-maliyet analizlerini gerçekleştirmişlerdir. ICAO AEED yardımıyla yapılan analizlerde CO, NO_x, HC ve CO₂ emisyonları dikkate alınmıştır. Ayrıca, GWP ve çevresel-maliyetler, bypass oranı ve toplam basınç oranına bağlı olarak modellenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, F1 ve F2 motorlarının ortalama GWP değerleri sırasıyla 2.256,17 kg CO₂/gün/döngü ve 1.779,02 kg CO₂/gün/döngü olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, F1 motorunun ortalama çevresel-maliyeti 261,71 €/gün/döngü, F2 motorun ise 206,36 €/gün/döngü olarak hesaplanmıştır. GWP modelinin doğruluk seviyesi, F1 motoru için R² = 0,9956, F2 motoru için ise R² = 0,9664 olarak bulunmuştur.

Tokuşlu (2020), 2018 yılına ait verilerle, Tiflis Uluslararası Havalimanı'nda LTO döngüsünde uçaklardan kaynaklanan NO_x, CO ve HC emisyonlarını belirlemiştir. Bu emisyonlar hesaplanırken ICAO AEED'den alınan emisyon faktörleri kullanılmıştır. LTO döngüsünde atmosfere salınan toplam uçak emisyonları yıllık 428,78 ton olarak tahmin edilmiştir. (NO_x: 247,33 t/y, CO: 161,21 t/y, HC: 20,24 t/y). 2018 yılı boyunca uluslararası uçuşların, toplam LTO emisyonlarının %99'undan sorumlu olduğu belirlenmiştir. Sonuçlara göre NO_x emisyonları büyük ölçüde kalkış (%27) ve tırmanış (%37) aşamalarında meydana gelirken, CO ve HC emisyonlarının ise ağırlıklı olarak taksi aşamasında gerçekleştiği (%77 ve %70) görülmüştür.

Ekici ve Şöhret (2020), 2018 yılı verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada Isparta Süleyman Demirel Havalimanı'nda LTO döngüsünde uçaklardan salınan kirletici gazlarının çevresel ve ekonomik boyutlarını ortaya koymuşlardır. Çalışmanın temel bulgularına göre, toplam karbon ayak izi, çevresel etki ve çevresel maliyet açısından yılın zirve noktası Mart ayı olarak belirlenmiştir. Öte yandan, yolcu başına

düşen karbon ayak izi, çevresel etki ve çevresel maliyet değerleri açısından zirve nokta Nisan ayı olarak tespit edilmiştir.

Kumaş ve diğ. (2019), Muğla Dalaman Havalimanına uçuş gerçekleştiren dört farklı hava aracı modelinin neden olduğu CO₂ emisyonlarını IPCC Tier yaklaşımıyla belirlemişlerdir. 2017 yılına ait aylık uçuş verileri kullanılarak karbon ayak izi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Uçak tiplerine göre yapılan değerlendirmede, Boeing 737 tipi uçakların atmosfere saldığı CO₂ emisyonlarının en yüksek paya sahip olduğu belirlenmiştir. Dört farklı uçak operasyonundan kaynaklı toplam CO₂ emisyon miktarının 93410,750 tCO₂/yıl olduğu belirlenirken, emisyon miktarları açısından Boeing 737'yi sırasıyla Airbus A330, Airbus A321 ve Airbus A320 tipi uçakların takip ettiği belirlenmiştir. Aylık bazda ise en yüksek CO₂ emisyonlarının Temmuz ve Haziran aylarında atmosfere salındığı sonucuna varılmıştır.

Zhou ve diğ. (2019), 2015 yılında Çin'de gerçekleşen uçuşlardan kaynaklı atmosfere salınan emisyonları hesaplamışlardır. Emisyonların doğru bir şekilde tahmin edilmesi, ayrıntılı uçuş bilgileri ve tırmanış ile yaklaşma aşamalarındaki süreler önem arz etmektedir. Bu nedenle öncelikle uçuş yüksekliği verilerine dayalı olarak Gerçek Zamanlı Uçak Meteorolojik Veri Aktarım sistemi kullanılarak uçuş süresi/irtifa ilişkisi geliştirilmiştir. Daha sonra meteorolojik gözlemlerden elde edilen gerçek karışım tabakası yüksekliği verileri ile her bir uçuşun tırmanış ve yaklaşma modlarındaki gerçek süreleri hesaplanmıştır. Çin'deki iç hat uçuşlarının 2015 yılına ait LTO döngüleri dikkate alındığında, toplam NO_x, CO, SO₂, HC ve PM emisyonları sırasıyla 37,78 Gg, 30,25 Gg, 12,00 Gg, 2,38 Gg ve 0,75 Gg olarak hesaplanmıştır.

Şöhret (2018), Şöhret (2018), yaptığı çalışmada Birleşik Krallık'taki yurt içi uçuşlardan kaynaklanan sera gazlarının çevresel etkilerinin yanı sıra, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayalı termodinamik bir değerlendirme ile emisyonlara ilişkin çevresel maliyet analizi de gerçekleştirmiştir. 1990–2015 yılları arasında GWP değerleri, 2005 yılına kadar artış göstermiş, ardından ise bazı yıllardaki dalgalanmalar hariç olmak üzere düşüş eğilimi sergilemiştir. Çalışmanın sonuçları itibari ile yurt içi uçuşlardan kaynaklanan CO₂e değerlerinin yaklaşık 1.600 kiloton seviyelerine ulaşacağı öngörülmektedir. Bununla beraber, Birleşik Krallık'taki karbon vergisi

politikasının, enerji üretim maliyetleri ve dağıtım fiyatları da göz önünde bulundurularak yeniden gözden geçirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ünal ve diğ. (2014), Nevşehir Kapadokya Havalimanı'nın Yeşil Havalimanı gerekliliklerinin sağlanması açısından emisyon ve gürültü analizleri gerçekleştirmiştir. Emisyon hesaplamalarında, IPCC tarafından önerilen Tier yöntemi ile hava aracı emisyonları belirlenmiştir. 2007–2011 yılları arasında havalimanındaki LTO sayısının %131 oranında arttığı belirlenmiştir. IPCC Tier 2 yöntemiyle yapılan emisyon hesaplamalar sonucunda, aynı dönemde LTO'da tüketilen yakıt miktarı %115 artmıştır. Bunun yanında, CO₂ emisyonları da benzer şekilde %115 oranında yükselmiştir. Sera gazları ve kirleticiler açısından yapılan hesaplamalara göre; CH₄ emisyonu %75, NO₂ emisyonu %316, NO_x emisyonu %111, CO emisyonu %105, metan olmayan uçucu organik bileşiklerin (NMVOC) %71 ve SO₂ emisyonlarının %102 oranında arttığı belirlenmiştir.

Fan ve diğ. (2012), Çin'in 2010 yılı iç hat uçuş verileri, uçak/motor kombinasyon bilgileri ile meteorolojik verilere dayalı olarak ICAO emisyon veri tabanından alınan düzeltilmiş emisyon indislerini kullanarak yakıt tüketimi ile HC , CO, NO_x , CO₂ ve SO₂ emisyonlarını hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, 2010 yılında Çin'deki iç hat uçuşlarında toplam yakıt tüketimi 12,12 milyon ton olarak hesaplanmıştır. Aynı yıl içerisinde HC emisyonu 4.600 ton, CO emisyonu 39.700 ton, NO_x emisyonu 154.100 ton, CO₂ emisyonu 38,21 milyon ton ve SO₂ emisyonu ise 9.700 ton olarak hesaplanmıştır. Ulusal düzeyde en yüksek yakıt tüketimi ve emisyon miktarı China Southern Airlines ait olduğu belirlenmiştir. Bu havayolu şirketinin, toplam yakıt tüketiminin yaklaşık %27'sinden ve toplam emisyonların %25-%28'lik kısmından sorumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Kesgin (2006), Türkiye'de bulunan ve aralarında İstanbul Atatürk Havalimanı, Antalya Havalimanı ve Ankara Esenboğa Havalimanı gibi en büyük havalimanlarının da bulunduğu 40 havalimanında atmosfere salınan kirletici emisyonları hesaplamıştır. Yaptığı çalışmada LTO döngüsünde HC, CO, NO_x ve SO₂ emisyonlarını hesaplamıştır. Bu hesaplamada ICAO AEED kullanılmış ve veri tabanında yer alan minimum ve maksimum değerler ayrı ayrı kullanılarak, Türkiye'deki havalimanlarında uçak kaynaklı LTO emisyonlarına ilişkin iki ayrı tahmin (minimum

ve maksimum) yapılmıştır. Araştırmanın bulgularına göre; Türkiye’de bulunan havaalanlarındaki ticari uçaklardan kaynaklanan toplam LTO emisyonlarının 7.614,34 ile 8.338,79 ton/yıl arasında olduğu ve bu miktarların yaklaşık olarak yarısının Atatürk Havaalanı’ndan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, taksi süresinde 2 dakikalık bir azalma olduğunda, toplam LTO emisyonlarının %6 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir.

4.2. COVID-19 Pandemisinin Havacılığa Etkisi

2019 yılının Aralık ayında, Çin’in Hubei Eyaleti’ne bağlı Wuhan kentinde kaynağı bilinmeyen zatürre vakalarının ortaya çıktığı bildirilmiştir. Yapılan genom analizleri, bu virüsün SARS-CoV ile ilişkili yeni bir koronavirüs olduğunu göstermiştir. Bu nedenle virüs, “şiddetli akut solunum yolu sendromu koronavirüs 2” (SARS-CoV-2) olarak adlandırılmıştır. Koronavirüs hastalığı (COVID-19), SARS-CoV-2 virüsünün neden olduğu bulaşıcı bir hastalıktır. SARS-CoV-2'nin küresel çapta yayılması ve COVID-19 hastalığı nedeniyle binlerce insanın hayatını kaybetmesi, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) 12 Mart 2020 tarihinde bir pandemi ilan etmesine yol açmıştır (Ciotti ve diğ., 2020; WHO, 2025). Pandemiye kontrol altına almak amacıyla birçok ülke uluslararası seyahatlere yönelik çeşitli önlemler uygulamaya koydu. Bu önlemler arasında sınırların kapatılması, kısmi seyahat kısıtlamaları, giriş-çıkış taramaları ve yolcuların karantinaya alınması gibi uygulamalar yer almaktadır. Bu tür tedbirler, virüsün ülkeler arası yayılımını sınırlamayı ve sağlık sistemleri üzerindeki baskıyı azaltmayı hedeflemiştir (Burns ve diğ., 2020).

Pandeminin, 1930’lardaki Büyük Buhran’dan bu yana yaşanan en ağır ekonomik durgunluğa yol açtığı tahmin edilmektedir. Seyahat kısıtlamaları nedeniyle en çok etkilenen sektörlerden biri ise havacılık endüstrisi olmuştur. COVID-19 pandemisi, birçok sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de derin bir ekonomik durgunluğa neden olmuş ve sektör genelinde ciddi finansal kayıplar yaşanmıştır (Sumner ve diğ., 2020; Sun ve diğ., 2021). COVID-19 pandemisi, küresel tarifeli yolcu taşımacılığı üzerinde son derece yıkıcı etkilere neden olmuştur. 2020 yılı verilerine göre, 2019 ile kıyaslandığında havayolu şirketlerinin sunduğu koltuk kapasitesinde %50 oranında azalma yaşanmış, yolcu sayısı 2,703 milyon kişi azalarak %60’lık bir düşüş göstermiştir. Bu durum, havayolu şirketlerinin brüt yolcu işletme gelirlerinde

yaklaşık 372 milyar ABD doları kayba yol açmıştır. 2021 yılına ilişkin ön tahminler ise toparlanmanın sınırlı düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. 2021'de ise 2019 ile karşılaştırıldığında, koltuk kapasitesinde %40'lık, yolcu sayısında ise 2,201 milyon (%49) azalma yaşanmış; gelir kaybı ise yaklaşık 324 milyar ABD doları olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, pandeminin havacılık sektöründe neden olduğu büyük ölçekli kriz ve ekonomik daralmanın boyutlarını açıkça ortaya koymaktadır (ICAO, 2023b).

2020 yılının başlarında patlak veren COVID-19 pandemisinin ardından, küresel havacılık iki yılı aşkın bir süre boyunca ciddi bir baskı altında kalmış ve sektörün tüm paydaşları toparlanma sürecini sabırsızlıkla beklemiştir. 2022 yazı itibarıyla, birçok havayolu şirketi yeniden kârlılık düzeyine ulaşmış, bazıları ise pandemi öncesi yolcu sayısı ve çeyreklik gelirleri dâhil aşmayı başarmıştır. Bu bağlamda, 2022 yılı küresel havacılık açısından “yeni normal”in bir parçası olarak değerlendirilebilir (Sun ve diğ., 2023). Son dönemde, pandemi sürecinde havacılıkla ilişkili çevresel etkilerin belirlenmesi, araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Havacılık sektöründeki faaliyetlerin azalmasıyla birlikte emisyonlar ve çevresel göstergelerde meydana gelen değişimler, çevresel etkilerin değerlendirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Ekici ve diğ. (2021), COVID-19 pandemisinin Türkiye’de ticari hava taşımacılığı kaynaklı kirletici emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü’nden (DHMI) ve Türk Hava Yolları’ndan (THY) temin edilen gerçek uçuş verileri kullanılmıştır. ICAO AEED yardımıyla LTO döngüsünde, 2017-2020 yıllarında farklı uçak tipleri için HC, CO, NO_x ve CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Türkiye’de pandeminin ciddi bir boyut kazanması Mart 2020 itibarıyla gerçekleştiği için, hesaplamalarda Mart–Ağustos 2020 arası dönem pandemi dönemi olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalı analizler ise Ocak 2017 itibarıyla başlatılmıştır. 2020 yılı Mart, Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında iç hat uçuşlarının neden olduğu toplam kirletici emisyon miktarındaki aylık değişim oranları sırasıyla -%42,78, -%99,76, -%99,61, -%73,27, -%49,66 ve -%36,66 olarak hesaplanmıştır.

Bakırcı (2020), COVID-19 pandemisinin Türkiye'deki havayolu ulaşımına etkilerini incelemek amacıyla DHMİ'nin aylık yolcu ve yük taşıma verileri ile Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) yıllık istatistiklerini kullanarak 2020 yılı Ocak-Ağustos dönemi için kapsamlı bir karşılaştırma yapmıştır. Çalışmada, 2019 yılında en fazla havayolu taşımacılığı gerçekleştirilen 10 havalimanı (Trabzon, Antalya, Muğla Milas-Bodrum, Gaziantep, Adana, İzmir Adnan Menderes, Ankara Esenboğa, İstanbul, Muğla Dalaman ve İstanbul Sabiha Gökçen) analiz kapsamına alınmıştır. Araştırma bulgularına göre, 2019 yılına kıyasla 2020 yılı Ağustos ayı sonu itibarıyla toplam yolcu taşımacılığında en büyük oransal düşüş %80,1 ile Antalya Havalimanı'nda gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, yük taşımacılığında da %80,5'lik azalma ile en büyük düşüş yine Antalya Havalimanı'nda gözlemlenmiştir. Türkiye genelindeki havalimanları dikkate alındığında ise, 2020 yılı Ocak-Ağustos döneminde toplam yük taşımacılığında %45,4, toplam yolcu taşımacılığında ise %62,8 oranında düşüş yaşandığı belirlenmiştir. Bu bulgular, pandeminin havayolu taşımacılığı üzerindeki etkisinin oldukça ciddi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Öz ve Ercoşkun (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma, COVID-19'un hava araçlarının çevresel etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu kapsamda, Esenboğa Havalimanına ait 2019 ve 2020 yıllarına ait uçuş verileriyle LTO döngüsündeki emisyonlar belirlenmiştir. Emisyon hesaplamalarında, IPCC tarafından önerilen Tier yaklaşımı kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, Esenboğa Havalimanı'ndaki toplam uçuş sayısının 2020 yılında, 2019 yılına göre %49,2 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Buna bağlı CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, CO, NMVOC, ve SO₂ emisyonları sırasıyla %55,89, %54,94, %55,57, %56,70, %53,42, %54,92 ve %55,92 oranlarında azaldığı hesaplanmıştır. Ayrıca, B738, B739, A320 ve A321 uçak tiplerinin 2019 yılı toplam CO₂ emisyonlarının %86,05'ini, 2020 yılında ise %87,18'ini oluşturduğu belirlenmiştir.

Akyüz (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Van Ferit Melen Havalimanı'nda COVID-19 pandemisi öncesi ve pandemi dönemi için ticari uçakların LTO döngüsünden kaynaklanan yolcu başına ve toplam CO, CO₂, HC ve NO_x emisyonları belirlenmiş ve bu emisyonlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu emisyonlardan kaynaklanan toplam ve yolcu başına GWP, Spesifik Çevresel Etkiler (SEI) ve Spesifik Çevresel Maliyeller (SEC) belirlenmiştir. Hesaplamalarda, ICAO AEDD emisyon

indeksleri ve DHMİ tarafından kayıt altına alınan gerçek uçuş verileri kullanılmıştır. Araştırma bulgularına göre, pandemi döneminde toplam emisyonların pandemi öncesine kıyasla %23,7 ile %30,8 arasında azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, pandemi süresince uçuş sayısındaki düşüşe bağlı olarak yolcu sayısı azalmış fakat yolcu başına düşen emisyon miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, pandemi öncesine kıyasla toplam SEC, GWP ve SEI değerleri sırasıyla %23,93, %24,1 ve %23,89 oranında azalırken, yolcu başına hesaplanan bu değerlerde yaklaşık %10 oranında artış meydana gelmiştir.

Zeydan ve Zeydan (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada COVID-19'un hava araçlarının neden olduğu çevresel emisyonlar üzerine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye'deki hava trafik verileriyle 2019 ve 2020 yıllarında LTO döngüsü için SO₂, CO₂, CO, NO_x, NMVOC, CH₄, N₂O, ve PM_{2.5} emisyonları hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre 2020 yılında 2019'a kıyasla SO₂, CO₂, CO, NO_x, NMVOC, CH₄, N₂O ve PM_{2.5} emisyonlarında sırasıyla %49,8, %49,7, %41,0, %52,6, %40,0, %33,8, %49,8 ve %50,3 azalma olmuştur. 2020 yılının ikinci, üçüncü ve dördüncü çeyreklerinde CO₂ emisyonlarındaki azalma oranları ise sırasıyla %87, %50 ve %43 olarak hesaplanmıştır.

Li ve Zheng (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Çin'den dış ülkelere ve dış ülkelere Çin'e gerçekleşen uluslararası uçuşlar için çevresel emisyonlar hesaplanmış ve COVID-19'un etkileri ortaya konmuştur. 2019–2021 yılları arasında gerçekleşen uluslararası uçuşlar için CO₂, CO, HC, NO_x, SO₂ ve PM_{2.5} emisyonları hesaplanmıştır. COVID-19 pandemisinin Çin çıkışlı ve varışlı uluslararası hatlarda toplam emisyonların azalmasına neden olduğunu, ancak yolcu kilometre başına düşen emisyon yoğunluğunun arttığı çalışmanın en önemli sonuçlarından biridir. Bununla beraber yapılan hesaplamaların doğruluğu test edilmiş ve Çin Sivil Havacılık İdaresi'nin resmi verileri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan sonuçlar ile resmi sonuçlar arasındaki hata payı yaklaşık %2,74 olarak bulunmuştur.

Vieira ve diğ. (2022) Brezilya'da COVID-19'un hava yolu yolcu talebi ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıntılı uçuş verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada iç hat uçuşlarından kaynaklanan CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre COVID-19, Brezilya havacılık sektörü

kaynaklı CO₂ emisyonlarında %63'lük bir azalmaya neden olmuştur. Bu da 4,7 milyon metrik ton CO₂'nin atmosfere salınmasının engellendiği anlamına gelmektedir. Seyahat faaliyetlerindeki azalma, daha kısa mesafeli uçuşlarda daha belirgin olmuştur. Toplam emisyonlardaki azalmaya rağmen pandemi döneminde uçaklardaki doluluk oranının düşmesi nedeniyle yolcu başına düşen emisyon miktarı artmıştır.

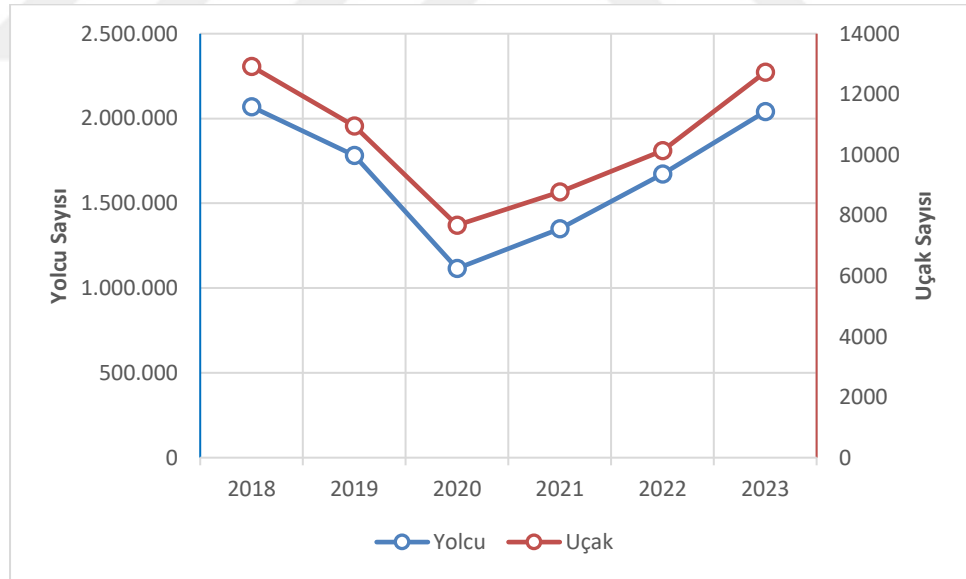
Cui ve diğ. (2022) COVID-19'un Güney Amerika'daki uluslararası uçuşlardan kaynaklanan CO₂, CO, HC, NO_x, SO₂ ve PM_{2.5} emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. 2019-2021 yıllarına ait veriler ile yapılan çalışmada pandeminin güzergâh sayısı, ortalama uçuş mesafesi, uçak konfigürasyonu, CCD safhasındaki emisyon oranları ve ortalama emisyon miktarları dâhil olmak üzere tüm emisyonlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. 2020'de 2019'a kıyasla toplam CO₂, CO, HC, NO_x, SO₂ ve PM_{2.5} emisyonlarındaki azalma oranları sırasıyla %87,84, %87,04, %86,67, %88,50, %87,84 ve %88,40 olarak hesaplanmıştır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

ÖRNEKLEM VE YÖNTEM

5.1. Çalışma Alanı

Diyarbakır Havalimanı, 1952 yılından bu yana hava taşımacılığında Türkiye'nin güneydoğusunda yer alan önemli bir merkezdir. Bölgenin ana ulaşım merkezi olarak hizmet vermektedir. Havayoluna olan yolcu talebinin sürekli olarak artması üzerine 2016 yılında modern yeni bir terminal binası inşa edilmiştir. Havalimanı terminal binası, iç hatlar ve dış hatlar olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Toplam 95.691 m² kapalı alana sahip olan terminal binası, yolcu yoğunluğunu karşılayabilecek şekilde modern tasarım ve altyapı ile donatılmıştır. Diyarbakır Havalimanı IATA: DIY ve ICAO: LTCC kodlu olarak yer almaktadır. (DHMİ, 2025a). 2023 yılında Diyarbakır Havalimanı 12.000'den fazla uçağa ve 2 milyondan fazla yolcuya hizmet verilmiştir. Şekil 5.1'de son yıllara ait toplam yolcu sayısı ile ticari uçuş sayıları gösterilmektedir (DHMİ, 2025b).



Şekil 5.1. 2018-2023 Diyarbakır Havalimanı Ticari Uçak ve Yolcu Sayısı

Bu çalışmada, 2018-2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanına uçuş gerçekleştiren ticari uçakların LTO döngüsünde neden olduğu HC, CO, NO_x ve CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. DHMİ'den elde edilen gerçek uçuş verileri ve ICAO AEED kullanılarak bu emisyonlar hesaplanmıştır (EASA, 2024). Pandemi öncesi ve

pandemi sonrası dönemler, pandemi kısıtlamalarının başladığı 2020 yılı ile karşılaştırılmıştır. Yakıt tüketimine bağlı olarak toplam ve yolcu başına HC, CO, NO_x ve CO₂ emisyonları belirlenmiştir. Bu sera gazlarının (GHG) neden olduğu, Spesifik Çevresel etkiler (SEI) Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ve Spesifik Çevresel Maliyet (SEC) analizleri yapılarak pandeminin etkileri ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın yeniliği, uçuşlardan kaynaklanan GHG'lerin ve bunlara bağlı GWP, SEI ve SEC'in belirlenerek COVID-19'un etkilerinin ortaya koymasındadır.

5.2. LTO Döngüsünde Hava Araçlarından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması

LTO döngüsünde uçakların yakıt tüketimi ile HC, CO ve NO_x emisyonlarının belirlenmesinde, ICAO tarafından motor sertifikasyon süreçlerinden elde edilen deneysel verilerle oluşturulan Uçak Motoru Emisyon Veri Tabanı (AEED) kullanılabilir. ICAO, uçaklardan kaynaklanan çevresel etkilerin, kullanılan motor gücüne bağlı olarak belirli bir sınır değeri aşmamasını zorunlu kılmaktadır. Motor gücü ile emisyonlar arasındaki sınır değerler, ICAO Ek 16 Cilt II kapsamında düzenlenmiştir. Motor üreticilerinin sertifikasyon süreçlerinde, LTO döngüsünün her bir fazı için tanımlanan itki seviyelerinde, ISA (Uluslararası Standart Atmosfer) koşulları altında yapılan gerçek ölçümler ile emisyon değerleri belirlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır (EASA, 2024). Uçak motorları, her 1 kilogram havacılık yakıtının yakılması sonucunda yaklaşık 3,16 kilogram CO₂ emisyonu üretmektedir. Bu nedenle, LTO döngüsünde her bir motor tarafından tüketilen yakıt miktarı esas alınarak CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır (ICAO, 2018).

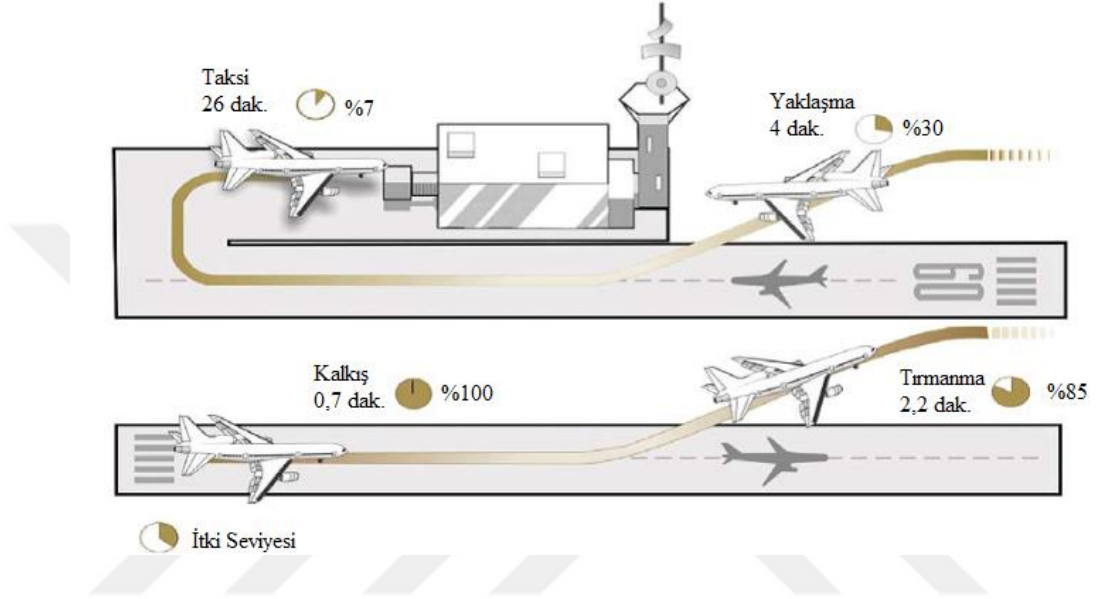
LTO döngüsünde hava aracı GHG emisyonlarının hesaplanabilmesi için; uçak tipi, motor tipi, her fazdaki süre (time-in-mode) ve itki oranı (thrust setting) gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tüm ticari uçuş verileri, 2018–2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanı'nda gerçekleştirilen seferlere ait olup, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü'nden (DHMI) temin edilmiştir. Söz konusu veriler; havayolu firması, uçak tipi ve modeli, varış ve kalkış noktaları, uçak tescil kodları, iniş ve kalkış saatleri, uçuş çağrı kodları ve motor çalıştırma zamanlarını içermektedir. Tablo 5.1'de 2018-2023 yılları arasında Diyarbakır havalimanına uçuş gerçekleştiren hava araçlarına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 5.1. Uçuşlara Ait Bilgiler

Havaaracı Ailesi	Hava aracı	Motor Tipi	Tip Kodu	Motor Sayısı	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Airbus	A20N	LEAP-1A26	20CM089	2	292	317	361	483	288	382
Airbus	A21N	PW1133 G1-JM	15PW107	2	0	28	25	50	353	703
Airbus	A318	CFM56-5B8/3	8CM059	2	2	0	0	0	1	2
Airbus	A319	V2524-A5	31A007	2	56	83	38	39	45	112
Airbus	A332	CF6-80E1A4	4GE081	2	0	0	2	0	0	2
Airbus	A333	CF6-80E1A1	2GE050	2	0	0	0	1	0	6
Airbus	A343	CFM56-5C4	2CM015	4	0	0	0	1	0	0
Airbus	A359	TRENT XWB-75	14RR072	2	0	0	0	0	0	1
Airbus	A320	V2527-A5	1IA003	2	527	255	229	382	252	254
Airbus	A321	V2533-A5	3IA008	2	295	412	190	198	203	537
Boeing	B733	CFM56-3B-2	1CM005	2	0	0	1	1	1	0
Boeing	B734	CFM56-3C-1	1CM007	2	6	1	1	0	1	2
Boeing	B737	CFM56-7B24	3CM032	2	89	53	10	23	613	812
Boeing	B738	CFM56-7B26	8CM051	2	5127	4282	2940	3052	2758	2912
Boeing	B739	CFM56-7B27	3CM034	2	57	40	42	65	164	216
Boeing	B762	PW4062	12PW102	2	0	0	0	0	2	0
Boeing	B38M	LEAP-1B28	18CM084	2	10	3	0	73	367	410
Boeing	B39M	LEAP-1B28	18CM084	2	0	0	0	20	19	15

Uçak operasyonları, iki ana kategori altında incelenmektedir. LTO döngüsü, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 3.000 feet (yaklaşık 915 metre) altındaki faaliyetleri kapsamakta olup, taksi, kalkış, tırmanma ve yaklaşma fazlarından oluşmaktadır.

(Christodoulakis ve diğ., 2022). CDD aşamaları için emisyon hesaplamaları yapılabilmesi, her bir uçağın gerçek uçuş rotasının bilinmesini gerektirmektedir. Ancak, mevcut çalışmada yalnızca LTO döngüsü için emisyon hesaplaması yapılmıştır; çünkü LTO döngüsüne ait veriler, DHMİ tarafından sağlanabilmektedir. ICAO yaklaşımına göre, LTO döngüsündeki her bir faz için tanımlanmış standart mod süresi ve itki oranları Tablo 5.2’de sunulmaktadır.



Şekil 5.2. LTO Döngüsü (ICAO, 2016; ICAO, 2025b)

Tablo 5.2. LTO Döngüsünde Operasyon Modu, İtki Seviyesi ve Modun Süresi (ICAO, 2016)

Operasyon modu	İtki seviyesi (%)	Modun süresi (dak.)
Kalkış	100	0.7
Tırmanma	85	2.2
Yaklaşma	30	4
Taksi	7	26

Her uçuş modu için yakıt tüketimi ve emisyon indeksleri, ICAO AEED'den elde edilmiştir. Her bir uçak için emisyon değerleri, Denklem 5.1 kullanılarak hesaplanır (Kalivoda ve Kudrna, 1997; Stefanou ve Haralambopoulos, 1998).

$$E_{i,m} = \sum_a \sum_e n_a I_{a,e} F_{a,e,m} E_{e,m,i} t_{m,a} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'deki değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- $E_{i,m}$: Emisyon i için mod m 'deki emisyon miktarı
- n_a : a tipi uçağın motor sayısı
- $I_{a,e}$: a tipi uçağın, e tipi motorla yaptığı LTO sayısı
- $F_{a,e,m}$: a tipi uçağın, e tipi motorla mod m 'deki yakıt tüketimi
- $E_{e,m,i}$: e tipi motorun, mod m 'deki i kirletici gazı için emisyon faktörü
- $t_{m,a}$: a tipi uçak için mod m 'de harcanan süre

5.3. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ve Spesifik Çevresel Etkilerin (SEI) Hesaplanması

Dünya yeryüzünden yansıyan güneş ışınlarıyla ısınır, bu ışınların bir kısmı atmosferdeki GHG'ler tarafından tutulur ve yeryüzüne geri döner bu da yeryüzü sıcaklığının bir miktar daha artmasına sebep olur. Sera gazlarının atmosferde birikmesi sonucunda, Dünya'nın sıcaklığı artar. İklim değişikliğinin ve küresel ısınmanın en önemli nedeni fosil yakıtların kullanımıdır. Fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere çeşitli sera gazları ve diğer kirleticiler salınmaktadır (Kumar ve diğ., 2022). Tablo 5.3'te, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından belirlenmiş olan başlıca sera gazlarının GWP değerleri verilmiştir. HC, CO, NO_x ve CO₂ gibi gazların GWP etkileri, karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden ifade edilmektedir.

Tablo 5.3. Sera Gazlarının GWP Değerleri (IPCC, 2018)

Emisyon	Sembol	GWP (kg CO _{2e})
Karbondioksit	CO ₂	1
Karbonmonoksit	CO	1
Hidrokarbonlar	HC	21
Azotoksitler/Nitrojenoksitler	NO _x	310

Uçak operasyonlarından kaynaklanan GWP etkileri, Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanabilir. Her bir emisyonun küresel ısınma etkisini karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden ifade edebilmek için, Tablo 5.3'te sunulan katsayılar kullanılabilir. Bu katsayılar, CO_{2e} cinsinden GWP hesaplamalarında referans niteliğindedir (Aygün ve Çalışkan, 2021).

$$GWP_{CO_{2e}} = HC_{CO_{2e}} + CO_{CO_{2e}} + NOx_{CO_{2e}} + CO_2 \quad (5.2)$$

Sera gazı emisyonları, hava kirliliği ve iklim değişikliğine yol açmanın ötesinde, farklı olumsuz etkiler de yaratmaktadır. Doğal kaynakların tükenmesi, doğal ekosistemin hasar görmesi ve insan sağlığına zarar verilmesi bu olumsuz etkiler arasında yer almaktadır. Bu değerlendirme, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) temelli bir yaklaşıma dayanmaktadır. Toplam çevresel etki, farklı kategorilerdeki etkilerin tek bir birim altında normalize edilip ağırlıklandırılmasıyla hesaplanmaktadır. CO₂, NO_x, CO ve HC gibi emisyonların çevresel etkileri, Eco-indicator 99'a benzer etki değerlendirme yöntemleriyle sayısal olarak belirlenmiştir. Bu yöntem, çevresel zararları üç ana kategoriye ayırır: insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve doğal kaynaklar (Meyer ve diğ., 2009). Bu metodolojik çerçeve, enerji ve emisyon temelli çevresel analizlerde kullanılan ve uluslararası geçerliliğe sahip olan ISO 14040 standardı (ISO, 2006) ile uyumludur. Her bir emisyon türüne ait Spesifik Çevresel Etki (SEI) değeri Tablo 5.4 ile gösterilmiş ve SEI değeri denklem 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır (Ekici ve Şöhret, 2020).

Tablo 5.4. Emisyonların Spesifik Çevresel Etki faktörü (Meyer ve diğ., 2009)

Emisyonlar	Spesifik Çevresel Etki (SEC) faktörü (mPts/kg)
CO ₂	54,545
CO	8,363
HC	114,622
NO _x	2749,36

$$B = \sum m_i b_i \quad (5.3)$$

Denklem 5.3'teki değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- b_i : Spesifik çevresel etki faktörü,
- m_i : emisyonun kütlesi,
- B_i : Toplam spesifik çevresel etki
- i : emisyon türü

5.4. Çevresel Maliyet Hesaplamaları

Çevresel maliyetler, çevresel zararın önlenmesi için gereken parasal bedeldir. Bu maliyetler ürün ve hizmetlerin üretimi ve kullanımı sırasında doğaya, insan sağlığına ve doğal kaynaklara verilen zararın çevresel maliyetlerini temsil eder. Ayrıca çevresel zararın gerçekleşmeden önce önlenmesi için gerekli olan parasal harcamayı ifade eder. Bu, oluşan zararın onarımı değil, zararın önlenmesi için gereken teknik ve yönetsel önlemlerin maliyetidir (Sustainability Impact Metrics, 2025). Havacılık açısından düşünüldüğünde, özellikle hava aracı operasyonları boyunca atmosfere zararlı çeşitli gazlar salınır. Sera gazı emisyonlarının zararlı etkilerinin ortadan kaldırılması ek bir maliyet yaratmaktadır. Havacılık sektörü özelinde karbon denkleştirme (carbon offset) girişimi, sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan finansal bir araçtır. Bu yöntem, uçak seferlerinin neden olduğu sera gazı emisyonlarının, başka çevresel projelere destek verilerek dengelemeye çalışılmasını içerir. Yani, uçuşlardan kaynaklanan emisyonların etkisi, başka yerlerde yürütülen sera gazı azaltım projeleriyle telafi edilir. (ICAO, 2023a). Emisyonların Spesifik Çevresel Maliyet (SEC) değerleri Tablo 5.5'te sunulmuş olup denklem 5.4 kullanılarak hesaplanabilir (Ekici ve Şöhret, 2020).

Tablo 5.5. Spesifik Çevresel Maliyetler (Vogtlander 2019)

Emisyon	Spesifik Çevresel Maliyet (€/kg)
CO ₂	0,116
CO	0,27
HC	3,538
NO _x	6,65

$$C = \sum m_i c_i \quad (5.4)$$

Denklem 5.4'teki değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

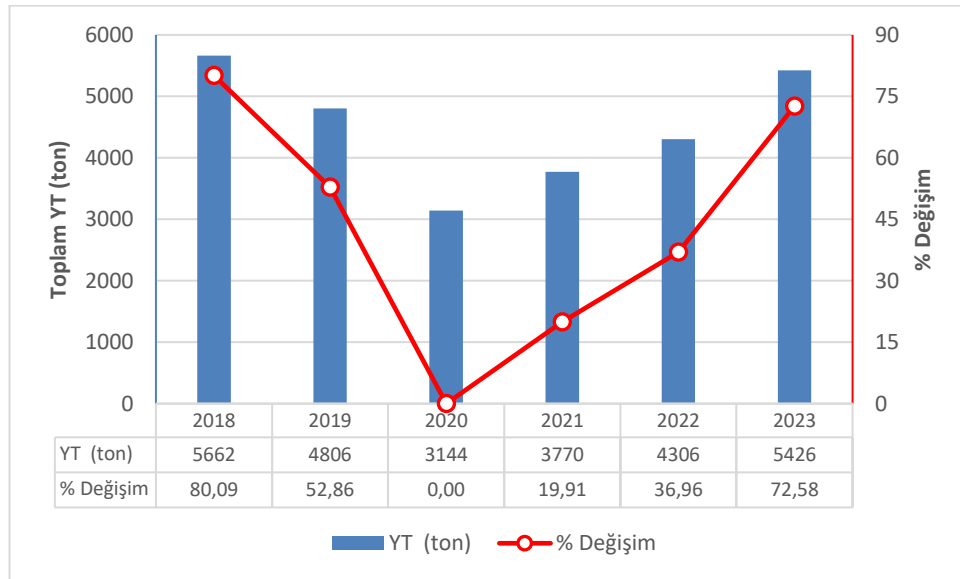
- C : Toplam çevresel maliyet,
- m_i : Emisyon miktarı
- c_i : Her bir emisyonun spesifik çevresel maliyeti
- i : Emisyonun türü

ALTINCI BÖLÜM

BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER

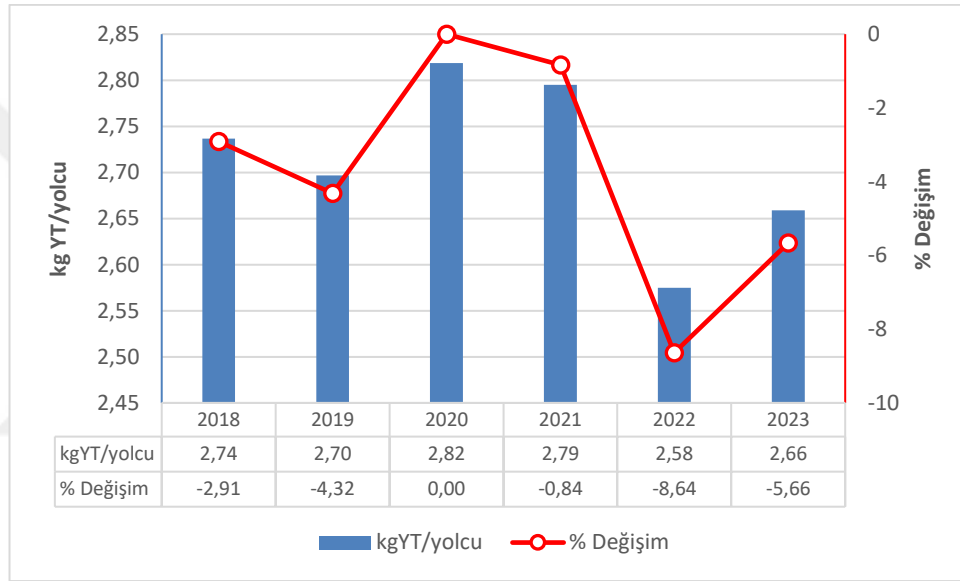
6.1. Yakıt Tüketimi ve Sera Gazı Emisyonlarına Ait Bulgular

Diyarbakır Uluslararası Havalimanı'nda 2018–2023 yılları arasında gerçekleşen gerçek uçuş verilerine dayanarak, LTO döngüsündeki yakıt tüketimine (YT) bağlı CO, NO_x, HC ve CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Bu çalışma, 2020 yılında ortaya çıkan COVID-19 pandemisinin toplam ve yolcu başına çevresel etkilerini ortaya koymaktadır. Şekil 6.1, 2018–2023 yılları arasında LTO döngüsünde uçaklar tarafından tüketilen toplam yakıt miktarını vermekle birlikte, bu değer pandeminin başladığı 2020 yılına göre yüzde değişimlerini göstermektedir. Altı yıllık dönem içerisindeki en düşük toplam yakıt tüketimi, 2020 yılında 3.144 ton olarak hesaplanmıştır. LTO döngüsünde en yüksek yakıt tüketimi ise 2018 yılı için 5.662 ton olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.1'den de görülebileceği üzere, pandemi öncesi dönem (2018–2019) ile pandeminin küresel bir tehdit olmaktan çıktığı 2023 yılına ait yakıt tüketimi değerleri birbirine oldukça yakındır. Şekilde mavi çubuklar toplam yakıt tüketimini, kırmızı çizgi ise toplam yakıt tüketiminin 2020'ye göre yüzde değişimini göstermektedir. Buna göre, 2018 ve 2023 yıllarındaki toplam yakıt tüketimi, 2020 yılına kıyasla sırasıyla %80,09 ve %72,58 oranında daha fazladır.



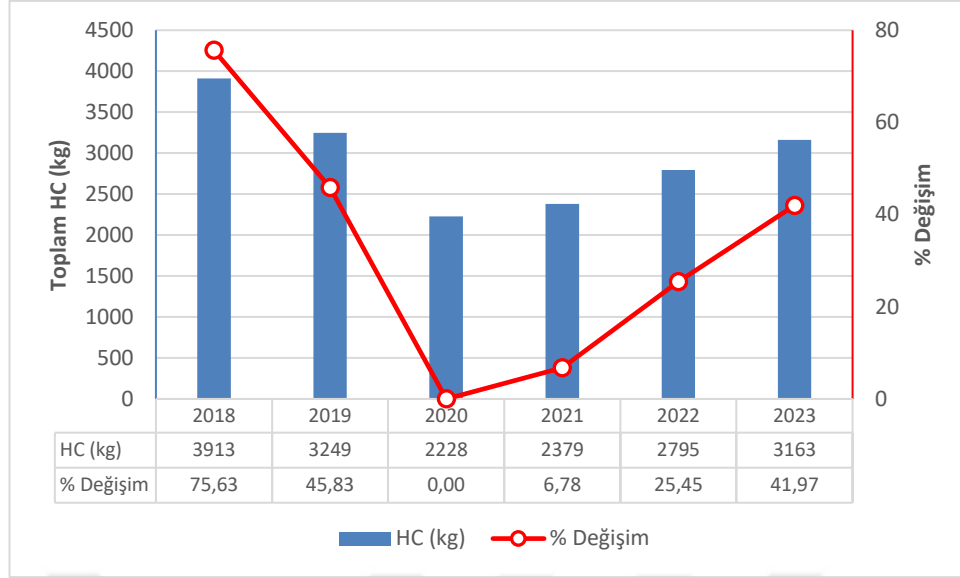
Şekil 6.1. Toplam Yakıt Tüketimi ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.2, LTO döngüsünde yolcu başına yakıt tüketimini ve bu değerlerin yüzde değişimini göstermektedir. Toplam yakıt tüketiminin aksine, yolcu başına yakıt tüketimi en yüksek değerine 2020 yılında ulaşmış ve 2,82 kg/yolcu olarak hesaplanmıştır. Bu değer, pandemi öncesi dönem olan 2018 ve 2019 yıllarında sırasıyla 2,74 kg/yolcu ve 2,70 kg/yolcu olarak belirlenmiştir. 2018–2023 yılları arasında yolcu başına yakıt tüketimi, 2020 yılına kıyasla %0,84 ila %8,64 oranında daha düşük olarak hesaplanmıştır. Diğer yıllarda toplam yakıt tüketimi 2020 yılına göre daha yüksek olmasına rağmen, yolcu başına yakıt tüketimi en yüksek seviyesine 2020 yılında ulaşmıştır.



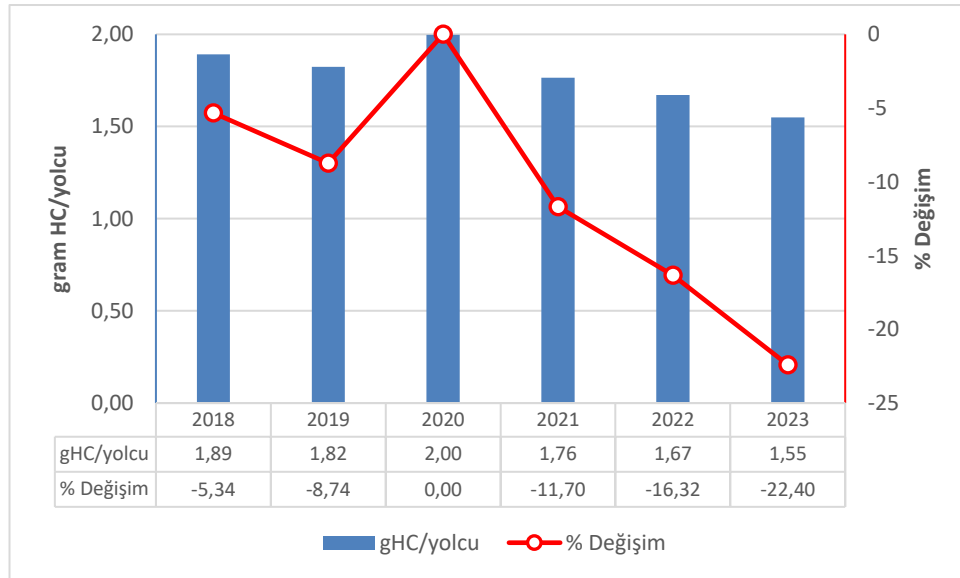
Şekil 6.2. Yolcu Başına Yakıt Tüketimi ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.3'te, LTO döngüsünde atmosfere salınan toplam HC emisyonları ve yıllar içindeki yüzde değişimleri gösterilmektedir. Altı yıllık dönemde LTO döngüsünde atmosfere salınan toplam HC emisyonlarının en yüksek olduğu yıl 3.913 kg ile 2018, en düşük olduğu yıl ise 2.228 kg ile 2020 olarak hesaplanmıştır. 2018 yılındaki toplam HC emisyonları, 2020 yılına kıyasla %75,63 daha yüksektir. 2020 sonrası dönemde toplam HC emisyonları artış göstermiş ve 2023 yılında, 2020 yılına göre %41,97 artmıştır.



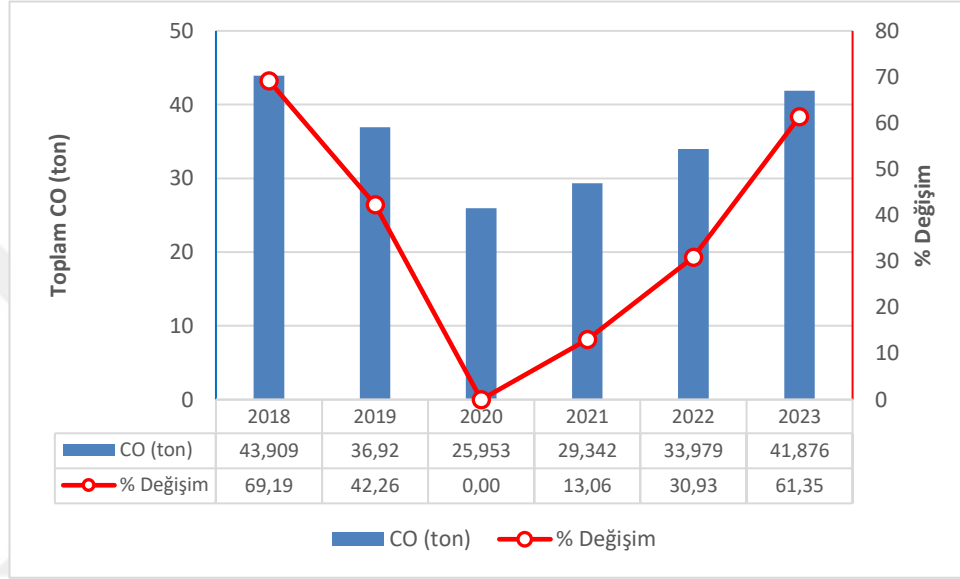
Şekil 6.3. Toplam HC Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.4, yolcu başına düşen HC emisyon miktarlarını ve bu değerlerin 2020 yılına göre yüzde değişimlerini göstermektedir. Yolcu başına HC emisyonu, 2020 yılında 2g/yolcu ile en yüksek seviyede hesaplanmış, 2023 yılında ise 1,55 g/yolcu ile en düşük seviyeye gerilemiştir. 2020 yılından itibaren yolcu başına HC emisyonlarında azalma eğilimi gözlenmiştir; bu azalma 2021, 2022 ve 2023 yıllarında sırasıyla %11,70, %16,32 ve %22,40 olarak gerçekleşmiştir.



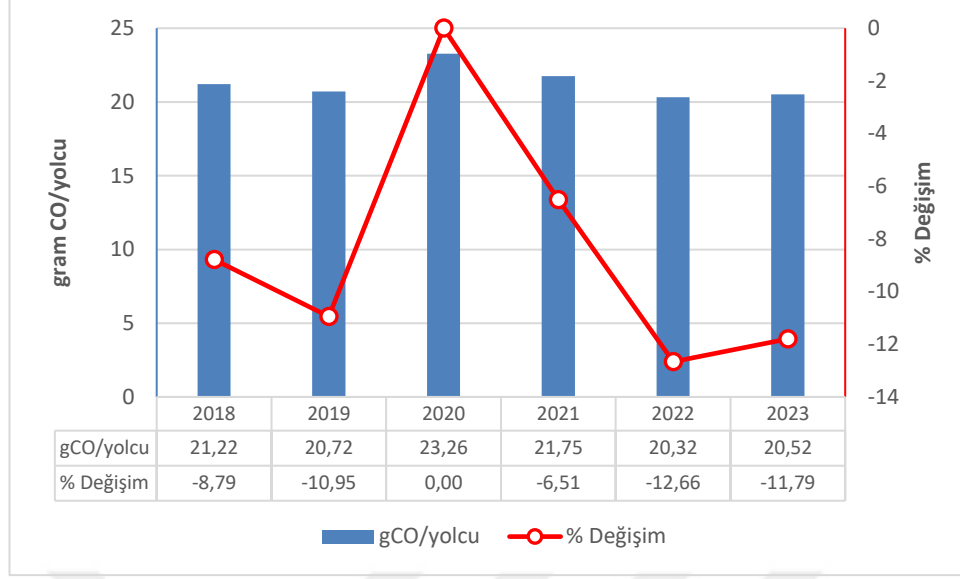
Şekil 6.4. Yolcu Başına HC Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.5, toplam CO emisyonlarını ve yıllar içindeki yüzde değişimlerini göstermektedir. Atmosfere salınan toplam CO emisyonları 2018 yılı için 43,91 ton, 2023 yılı için 41,88 ton ve 2020 yılı için 25,95 ton olarak hesaplanmıştır. 2020 yılında, 2018 ile 2023 yılına kıyasla toplam CO emisyonlarında %60'ın üzerinde bir azalma gerçekleşmiştir. 2021'den itibaren artan toplam CO emisyonları 2023'te pandemi öncesi seviyelere yaklaşmıştır.



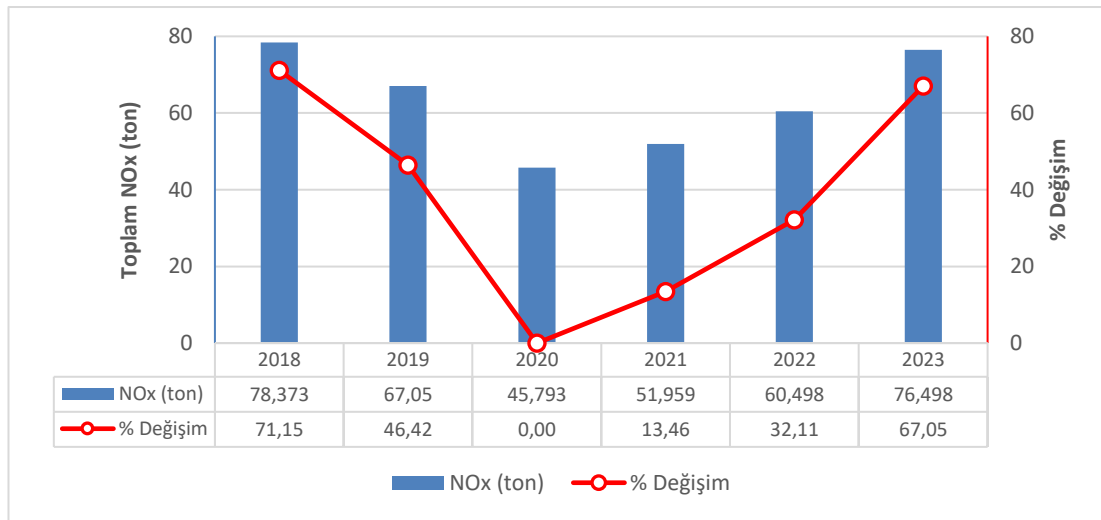
Şekil 6.5. Toplam CO Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.6'da 2018-2023 yılları arasında LTO döngüsünde yolcu başına atmosfere salınan CO emisyonları ve bunların 2020'ye göre yüzde değişimleri verilmiştir. Yolcu başına atmosfere salınan CO emisyonları, 2020 yılında 23,26 gram ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Pandemi öncesi dönem olan 2018 ve 2019 yıllarında bu değerler sırasıyla 21,22 gram ve 20,72 gram olarak hesaplanmıştır. 2022 yılında ise yolcu başına CO emisyonları 20,32 gram ile analiz edilen dönem içerisindeki en düşük seviyeye gerilemiş, 2023 yılında ise bu değer hafif bir artış göstererek 20,52 gram olarak belirlenmiştir. 2020 yılında atmosfere salınan toplam CO emisyonları diğer yıllara kıyasla belirgin şekilde azalmış olsa da, yolcu başına CO emisyonları ters bir eğilim göstererek aynı yıl içerisinde en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



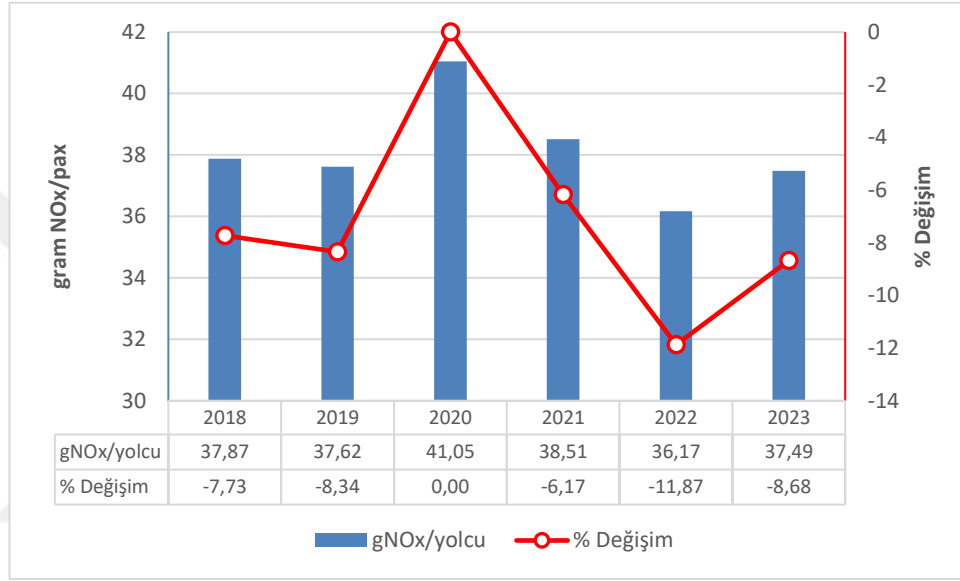
Şekil 6.6. Yolcu Başına CO Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.7, uçakların LTO döngüsü sırasında atmosfere salınan toplam NO_x emisyonlarını, 2018–2023 yıllarını kapsayan altı yıllık dönemde göstermektedir. Toplam NO_x emisyonları, 2020 yılında 45,793 ton olarak hesaplanmış ve analiz edilen dönem içerisindeki en düşük seviyeye ulaşmıştır. Aynı emisyonlar 2018 yılında 78,373 ton, 2023 yılında ise 76,498 ton olarak belirlenmiştir. Buna göre, 2018 ve 2023 yıllarında salınan NO_x emisyonları, 2020 yılına kıyasla sırasıyla %71,15 ve %67,05 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



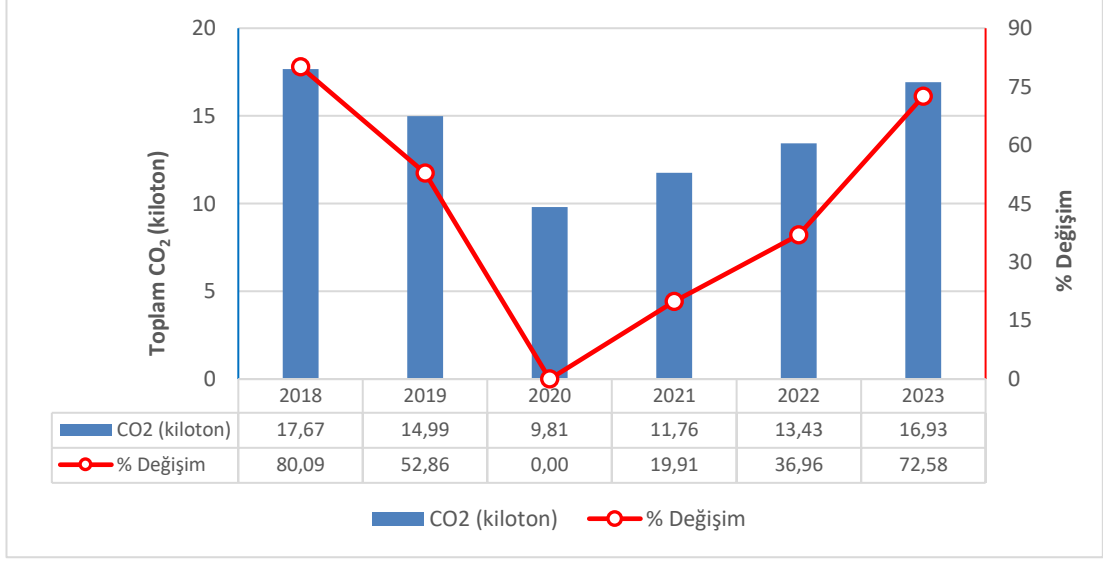
Şekil 6.7. Toplam NO_x Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Toplam değerlere zıt bir eğilim olarak, yolcu başına NO_x emisyonları 2020 yılında 41,05 g/yolcu ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yıllara ait yolcu başına atmosfere salınan NO_x emisyonları Şekil 6.8 ile gösterilmiştir. Diğer yıllarda yolcu başına NO_x emisyon değerleri birbirine yakın olup, 2018’de 37,87 g/yolcu, 2023’te ise 37,49 g/yolcu olarak hesaplanmıştır. Yolcu başına NO_x emisyonu 2022 yılında 36,17 g/yolcu ile analiz edilen dönem içerisindeki en düşük seviyeye gerilemiş ve 2020’ye kıyasla %11,87 azalmıştır.



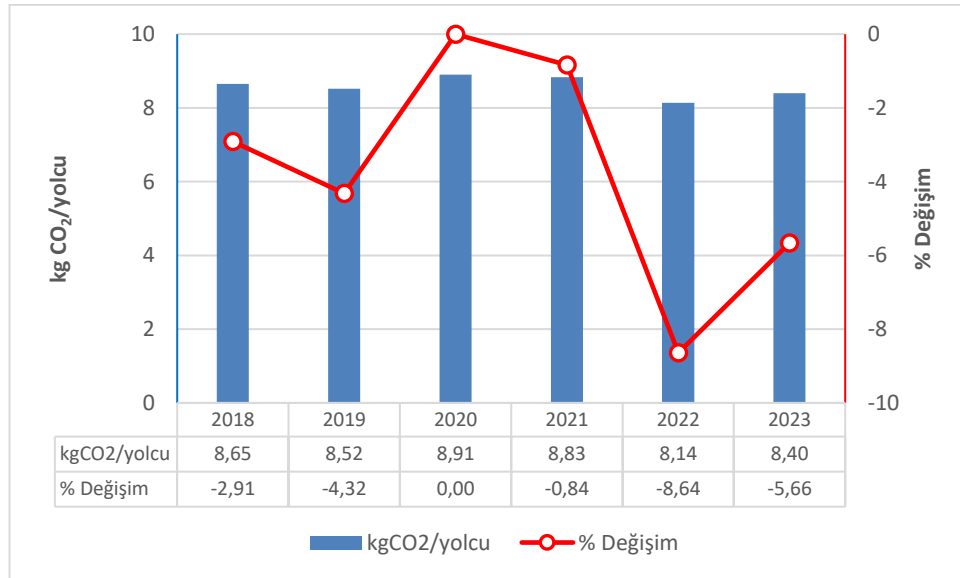
Şekil 6.8. Yolcu Başına NO_x Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Şekil 6.9, LTO döngüsünde yakıt tüketimine bağlı olarak atmosfere salınan CO₂ emisyonlarını ve yıllar içerisindeki değişimlerini göstermektedir. Toplam CO₂ emisyonları 2020 yılında 9,94 kiloton (kt) ile en düşük seviyede gerçekleşmiş, 2023 yılında ise 17,15 kt’ye yükselerek %72,58 oranında bir artış göstermiştir. Pandemi öncesi dönemdeki toplam CO₂ emisyonlarının, hayatın normale döndüğü 2023 yılı ile yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



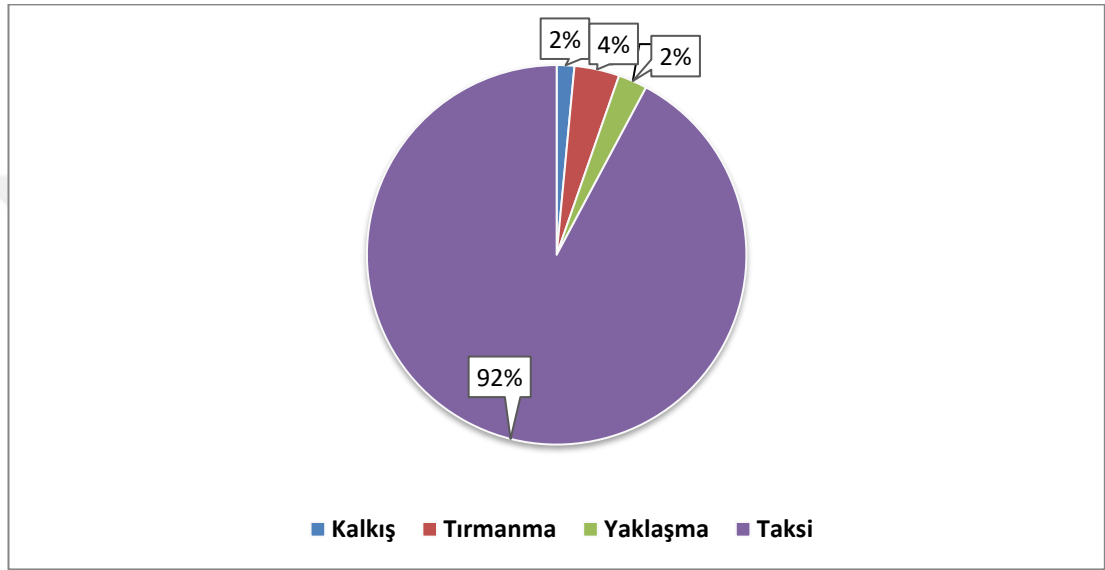
Şekil 6.9. Toplam CO₂ Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

2018–2023 yılları arasında ticari uçuşlardan kaynaklanan yolcu başına CO₂ emisyonları 8,14 ile 8,91 kg/yolcu aralığında değişmiştir. Yolcu başına atmosfere salınan CO₂ miktarı ve yıllara göre değişimi Şekil 6.10 ile gösterilmiştir. Diğer sera gazlarında olduğu gibi, en yüksek değer 2020 yılı için hesaplanmıştır. 2022 ve 2023 yıllarında yolcu başına CO₂ emisyonları, 2020 yılına kıyasla sırasıyla %8,64 ve %5,66 oranlarında azalma göstermiştir.



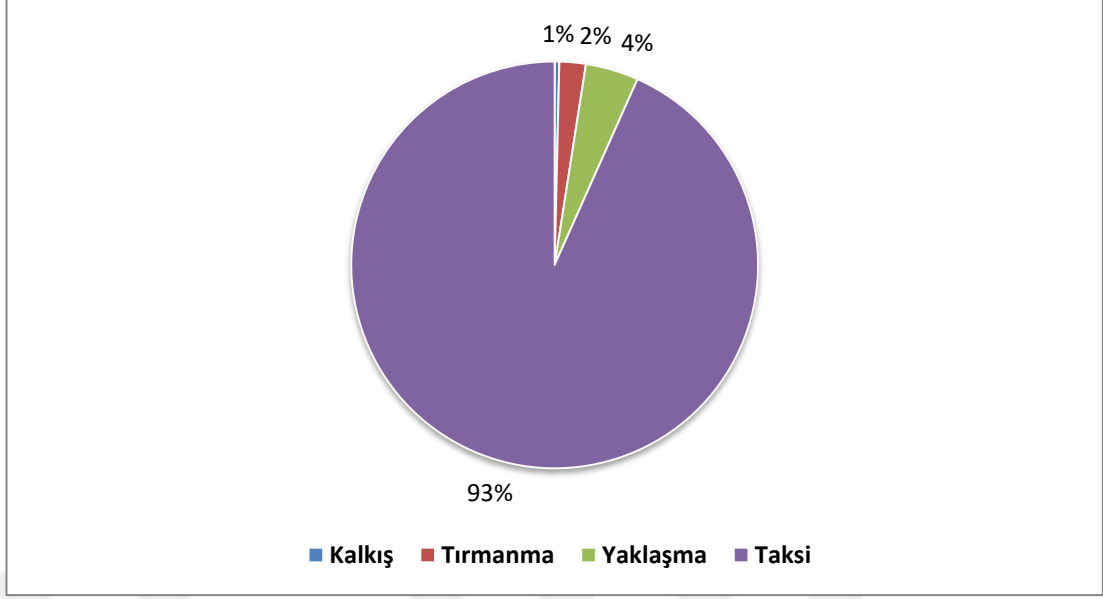
Şekil 6.10. Yolcu Başına CO₂ Emisyonları ve 2020 Yılına Göre Değişimi

Bu çalışmada ayrıca, 2018–2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanı'na gerçekleşen ticari uçuşlardan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarının, LTO döngüsünün hangi aşamasında atmosfere salındığı da belirlenmiştir. Şekil 6.11'de LTO döngüsü boyunca her bir modda atmosfere salınan HC emisyonları oranları olarak verilmiştir. Kalkış modu atmosfere salınan HC emisyonlarının %2'sinden, tırmanma modu bu emisyonların %4'ünden sorumludur. Yaklaşma ve taksi modlarında ise atmosfere salınan toplam HC emisyon oranları ise sırasıyla %2 ve %92'dir.



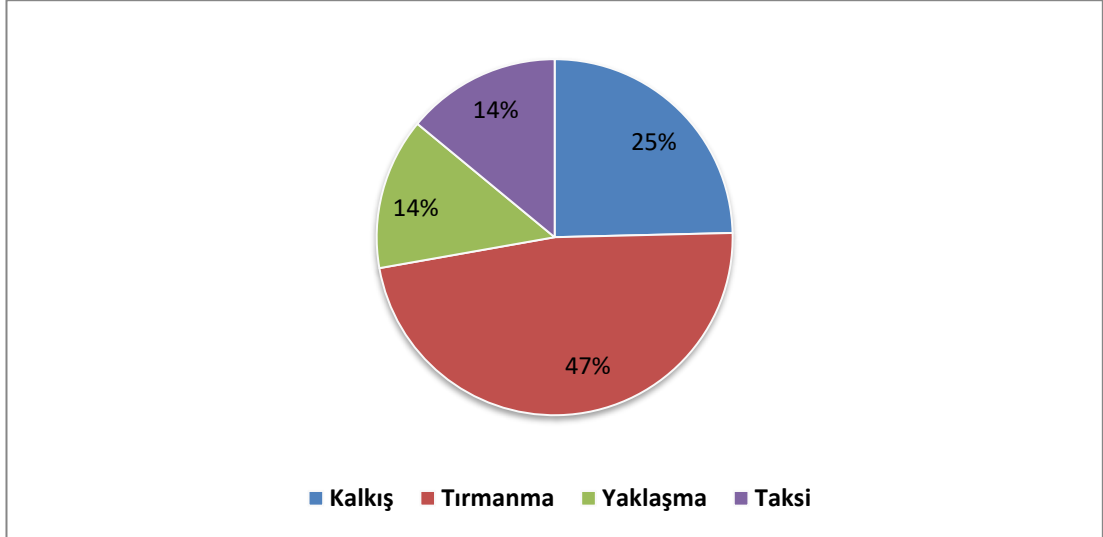
Şekil 6.11. LTO Döngüsünde HC Emisyonları

Şekil 6.12'de LTO döngüsü boyunca her bir modda atmosfere salınan CO emisyon oranları verilmiştir. Kalkış modunda atmosfere salınan CO emisyonlarının oranı %1 iken, tırmanma modunda atmosfere salınan CO emisyonlarının oranı %2'dir. Yaklaşma ve taksi modları ise atmosfere yayılan CO emisyonlarının sırasıyla %4 ve %93'ünden sorumludur.



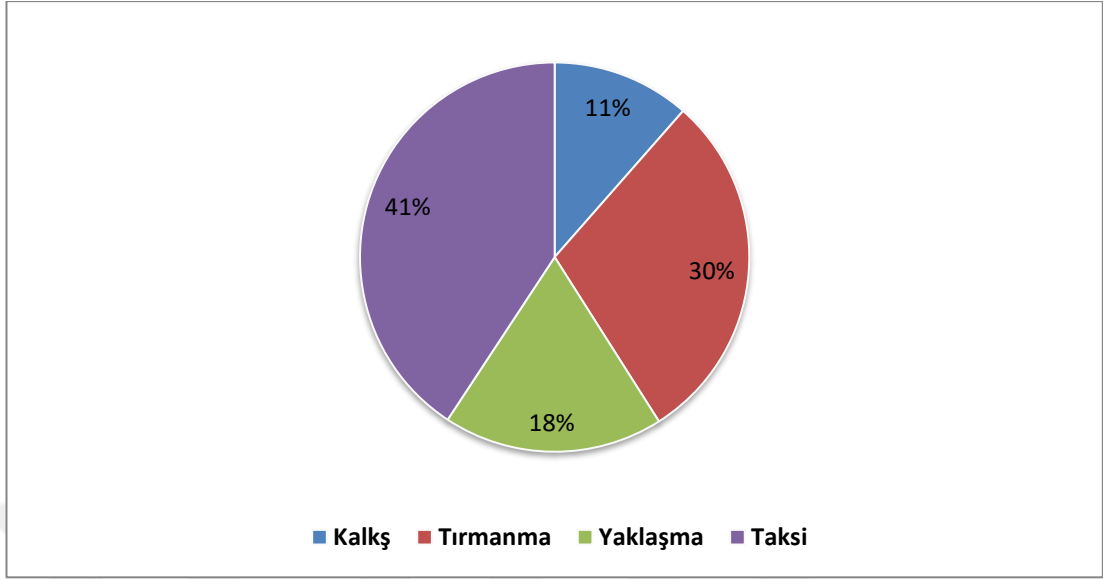
Şekil 6.12. LTO Döngüsünde CO Emisyonları

Şekil 6.13'te LTO döngüsü boyunca her bir modda atmosfere salınan toplam NO_x emisyon oranları gösterilmiştir. NO_x emisyonunun %25'inin kalkış modunda atmosfere salındığı belirlenmiştir. Tırmanma modunda atmosfere salınan NO_x emisyonlarının oranı %47 iken, yaklaşma ve taksi modlarının her biri atmosfere salınan NO_x emisyonlarının %14 'ünden sorumludur.



Şekil 6.13. LTO Döngüsünde NO_x Emisyonları

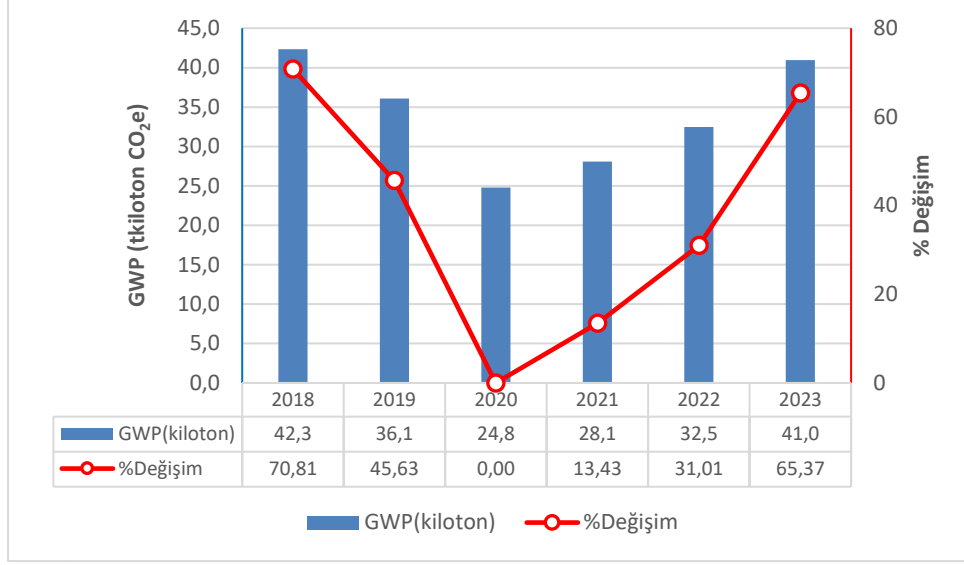
Şekil 6.14'te LTO döngüsü boyunca her bir modda atmosfere salınan CO₂ emisyon oranları verilmiştir. Toplam CO₂ emisyonlarının %11'i kalkış %30'u tırmanma, %18'i yaklaşma ve %41'i taksi modunda atmosfere salınmıştır.



Şekil 6.14. LTO Döngüsünde CO₂ Emisyonları

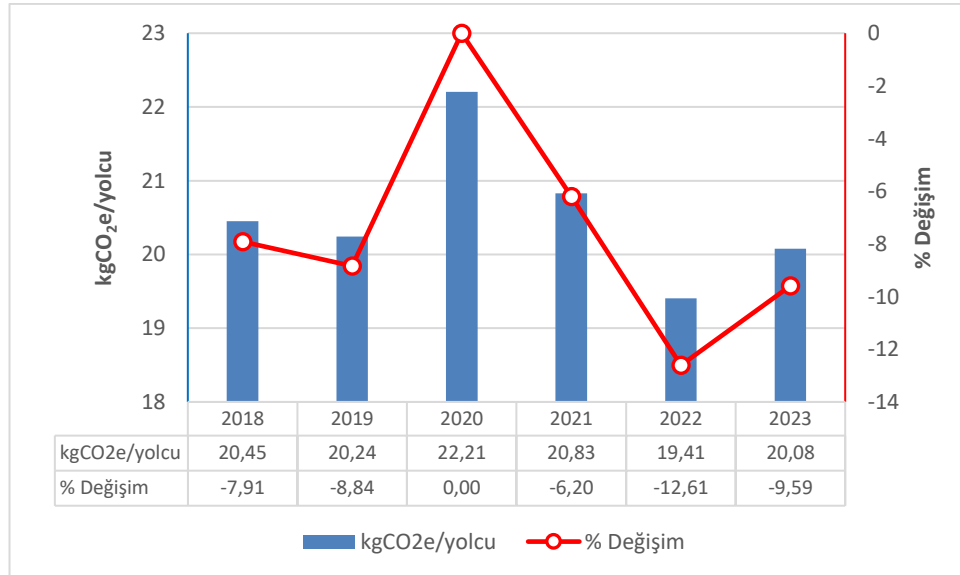
6.2. Küresel Isınma Potansiyeli, Spesifik Çevresel Etkiler ve Spesifik Çevresel (SEC) Maliyetlere Ait Bulgular

Bu çalışmada 2018-2023 yılları arasında Diyarbakır Havalimanına uçuş gerçekleştiren tüm ticari uçaklara ait sera gazları (GHG) ile beraber, bu gazların neden olduğu Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), Spesifik Çevresel Etkiler (SEI) ve Spesifik Çevresel Maliyetler hesaplanmıştır. Şekil 6.15'te toplam GWP, kgCO₂ eşdeğeri (kg CO₂e) cinsinden sunulmuştur. Yapılan hesaplamalara göre, atmosfere salınan sera gazlarının toplam GWP değeri 2018 yılında 42,32 ktCO₂e, 2023 yılında ise 40,97 ktCO₂e olarak belirlenmiştir. 2020 yılında ise bu değer dikkate değer bir düşüşle 24,77 ktCO₂e seviyesine gerilemiş olup, bu durum 2018 yılına göre %70,81 ve 2023 yılına göre %65,37 oranında bir azalmaya işaret etmektedir.



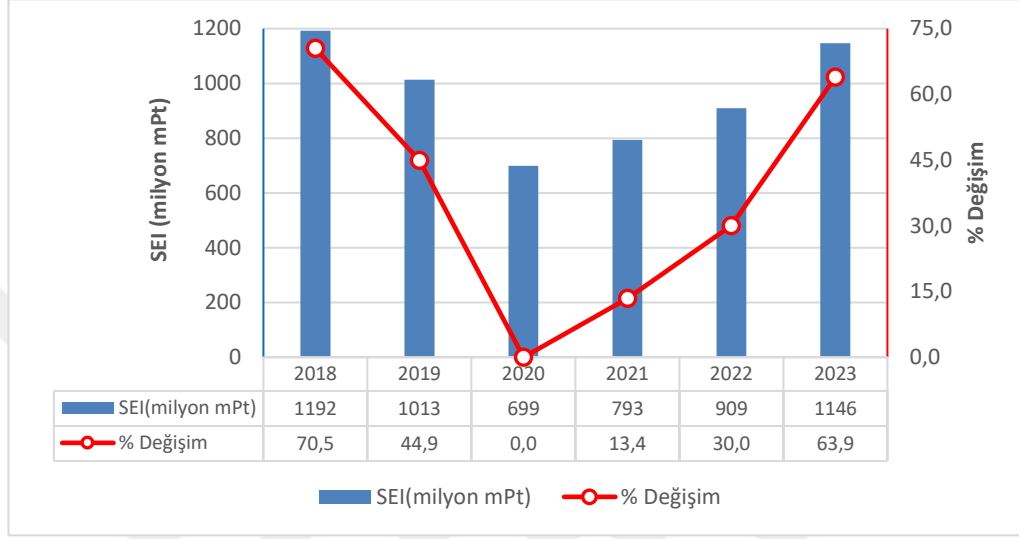
Şekil 6.15. Toplam GWP ve Yıllara Göre Değişimi

Toplam emisyon değerlerinin aksine, atmosfere yolcu başına salınan sera gazlarının CO₂ eşdeğeri 2020 yılında 22,21 kgCO₂e ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Şekil 6.16'da görüldüğü üzere, 2018–2023 yılları arasında yolcu başına GWP etkileri, 2020 yılına kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Yolcu başına GWP değerlerinin, 2020 yılına göre %6,20 ile %12,61 arasında değişen oranlarda daha düşük olduğu hesaplanmıştır.



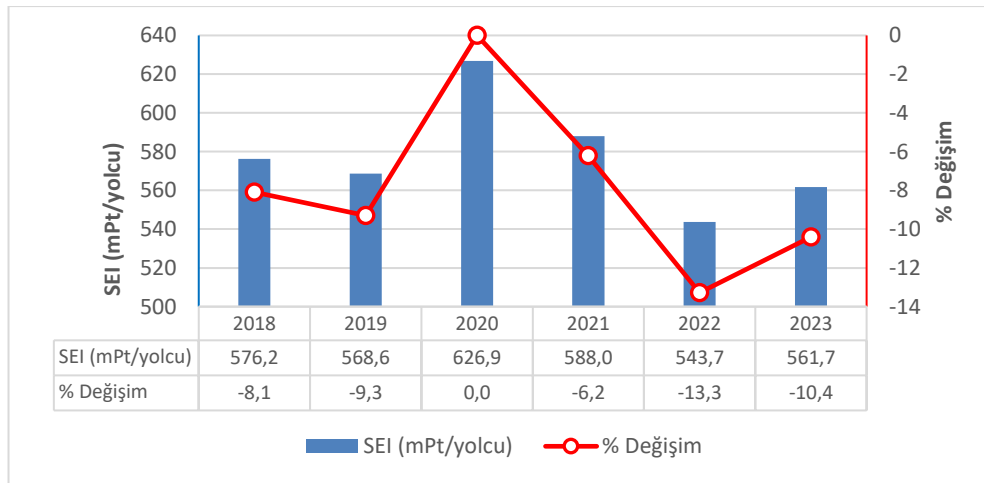
Şekil 6.16. Yolcu Başına GWP ve Yıllara Göre Değişimi

Şekil 6.17'de uçak operasyonlarından kaynaklı atmosfere salınan GHG'lerin neden olduğu toplam Spesifik Çevresel Etkiler (SEI) yıllık bazda verilmiştir. SEI, 2020 yılında en düşük seviyesine ulaşmış, bu yıldan sonra artış göstermiştir. 2023 yılı itibari ile pandemi öncesi seviyelerine ulaşmıştır. 2022 ve 2023 yıllarında, 2020 yılına kıyasla sırasıyla yaklaşık %30 ve %64 oranında artmıştır.



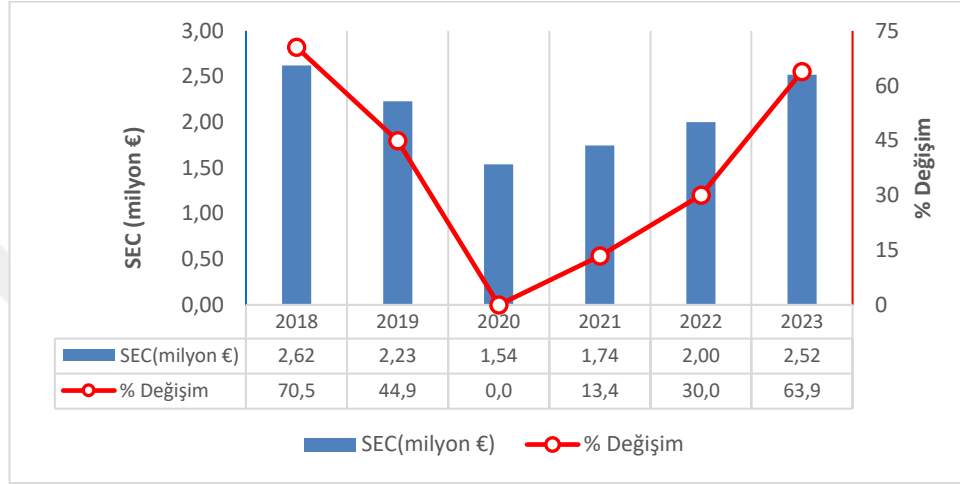
Şekil 6.17. Toplam SEI Yıllara ve Yıllara Göre Değişimi

Şekil 6.18, yolcu başına SEI ve bu değer 2020 yılına göre yüzde değişimini göstermektedir. Yolcu başına en yüksek seviyesine 2020 yılında ulaşmış, bu değer 2022 ve 2023 yıllarında sırasıyla %13,3 ve %10,4 oranında azalmıştır. Pandeminin etkilerinin azalmasına paralel olarak yolcu başına SEI de azalmıştır.



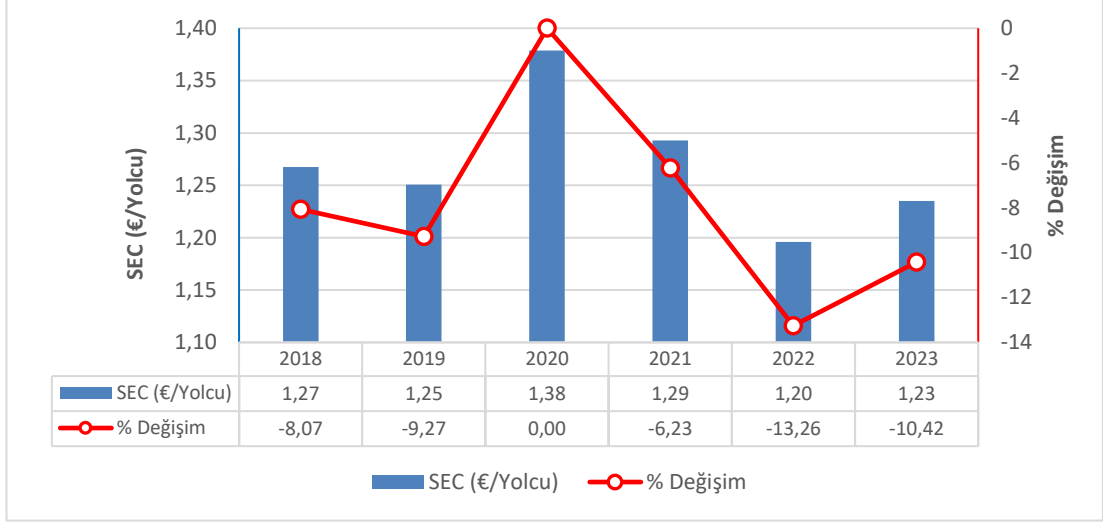
Şekil 6.18. Yolcu Başına SEI ve Yıllara Göre Değişimi

Şekil 6.19'da, sera gazı emisyonlarından kaynaklanan toplam ve yolcu başına düşen Spesifik Çevresel Maliyetler (SEC) ile bu değerlerin yüzdelerdeki değişim oranları sunulmaktadır. Toplam SEC, COVID-19 pandemisinin yaşandığı 2020 yılına kıyasla 2018 yılında yaklaşık %70 oranında daha yüksektir. Ayrıca, 2020 yılına göre toplam SEC değerinde 2022 ve 2023 yıllarında sırasıyla yaklaşık %30 ve %63,9 oranlarında artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.19. Toplam SEC ve Yıllara Göre Değişimi

Şekil 6.20'de, yolcu başına SEC değerinin en yüksek olduğu yıl 1,38 € ile 2020 yılıdır. Diğer yıllarda ise bu değer 2018'de 1,27 €, 2019'da 1,25 €, 2021'de 1,29 €, 2022'de 1,20 € ve 2023'te 1,23 € olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına kıyasla, 2022 ve 2023 yıllarında yolcu başına SEC sırasıyla yaklaşık %13,4 ve %10,87 oranlarında azalmıştır.



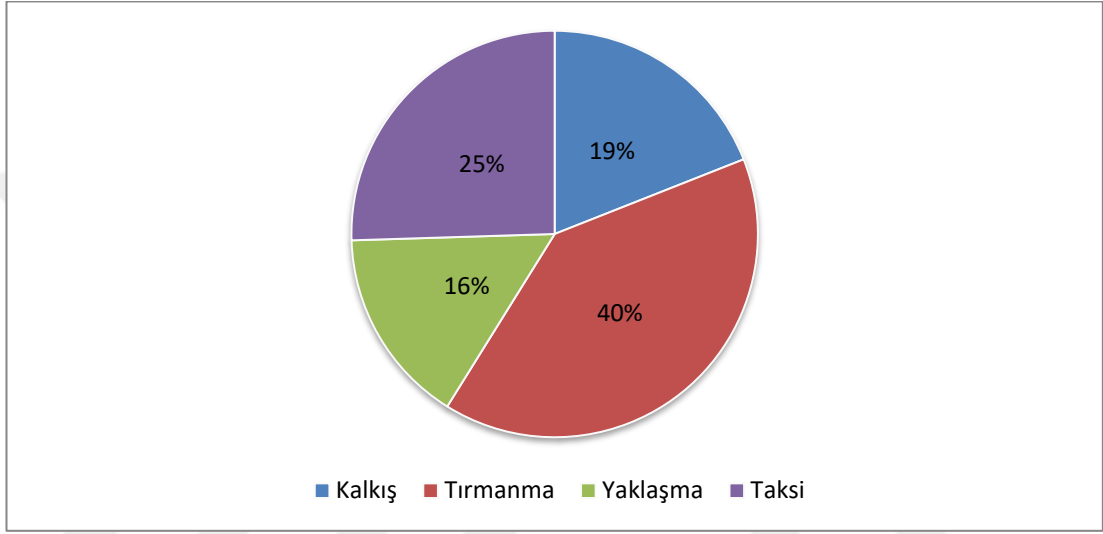
Şekil 6.20. Yolcu Başına SEC ve Yıllara Göre Değişimi

Tablo 6.1’de, uçakların LTO döngüsü boyunca atmosfere salınan sera gazlarının (CO₂, CO, NO_x ve HC) GWP, SEI ve SEC içerisindeki payları verilmiştir. GWP açısından değerlendirildiğinde, NO_x emisyonları %57,48 ile en yüksek paya sahipken, CO₂ emisyonlarının payı %42,26 olarak hesaplanmıştır. SEI üzerindeki etkiler incelendiğinde ise CO₂ emisyonu %81,79 ile en yüksek katkıyı sağlarken, NO_x emisyonlarının payı %18,17’dir. SEC açısından bakıldığında ise CO₂ emisyonlarının toplam çecresel maliyetler içindeki payı %79,07, NO_x emisyonlarının payı ise %19,98 olarak belirlenmiştir. CO ve HC emisyonlarının GWP, SEI ve SEC üzerindeki etkilerinin ise ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Bu veriler doğrultusunda, havacılık otoritelerinin yalnızca CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik stratejilerle sınırlı kalmayıp, çevresel etkileri yüksek olan NO_x gibi diğer emisyonların azaltımına yönelik politikalar geliştirmeleri büyük önem taşımaktadır.

Tablo 6.1. Sera Gazlarının GWP, SEI ve SEC İçindeki Payları

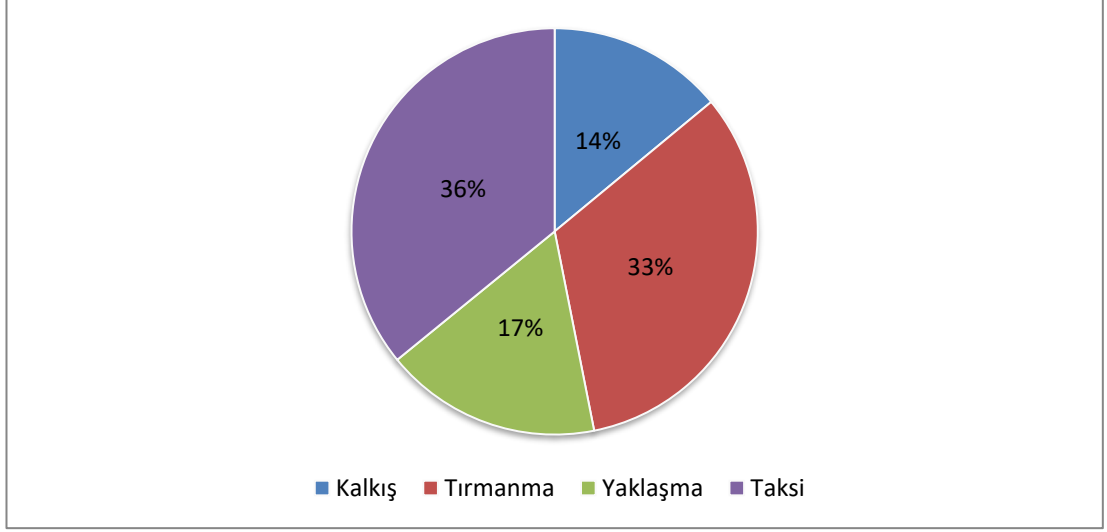
	Emisyonlar			
	CO	HC	NO _x	CO ₂
GWP (kgCO ₂ e)	%0,10	%0,16	%57,48	%42,26
SEI (mPt)	%0,001	%0,04	%18,17	%81,79
SEC (€)	%0,45	%0,5	%19,98	%79,07

Diyarbakır Havalimanı'na 2018–2023 yılları arasında operasyon gerçekleştiren tüm ticari uçakların LTO döngüsü kapsamında, her bir modun GWP üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Şekil 6.21’de yer alan grafikte, LTO döngüsündeki her bir modun GWP’ye katkı oranları gösterilmektedir. Buna göre, tırmanma, taksi ve yaklaşma modlarının GWP üzerindeki etkileri sırasıyla %19, %25 ve %16 olarak hesaplanmıştır. GWP’ye en fazla neden olan mod ise %40 oranıyla tırmanma modu olmuştur.



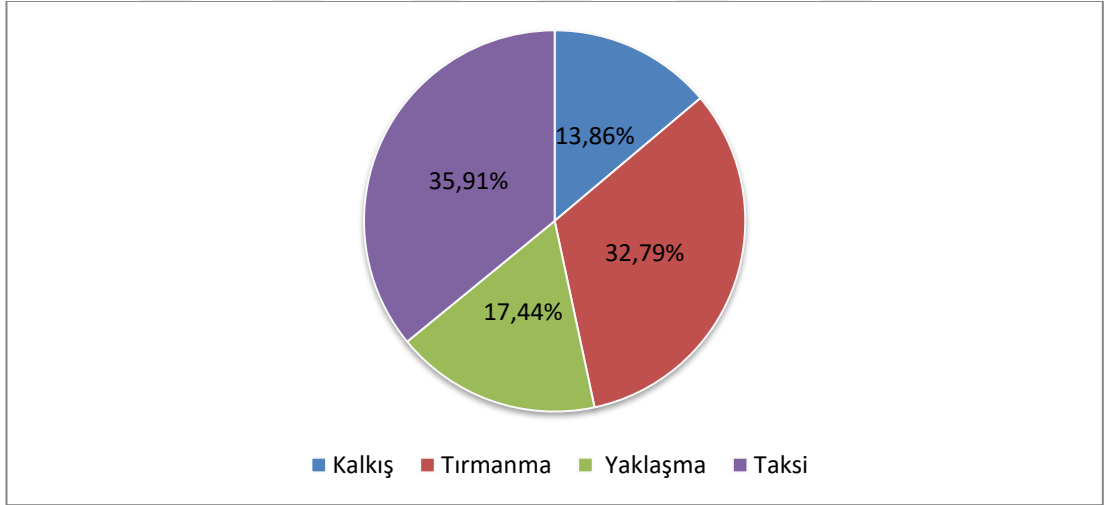
Şekil 6.21. LTO Döngüsünde GWP Etkileri

Şekil 6.22’de verilen grafikte ise LTO döngüsündeki her bir modun SEC üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Kalkış ve Yaklaşma modlarında SEC’in etkileri sırasıyla %14 ve %17 olarak belirlenmiştir. Tırmanma ve taksi modlarında ise SEC’in etkileri diğer modlara göre daha yüksektir ve oranları sırasıyla %33 ve %36 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.22. LTO Döngüsünde SEC Etkileri

Şekil 6.23'teki grafikte LTO döngüsündeki her bir modun SEI üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Tırmanma ve taksi modlarında SEI'nin etkileri sırasıyla %32,79 ve %35,91'dir. Ayrıca Kalkış ve yaklaşma modlarında ise SEI'nin etkisi sırasıyla %13,86 ve %17,44 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.23. LTO Döngüsünde SEI Etkileri

6.3. Uçak Tipine Göre Emisyon Oranları

Diyarbakır havalimanına 2028-2023 yılında iniş kalkış gerçekleştiren tüm uçakların neden olduğu sera gazları her bir uçak için ayrı hesaplanmış ve farklı uçakların toplam sera gazları içindeki payı belirlenmiştir. Tablo 6.2'de, hava aracı tipine göre emisyon oranları sunulmuştur.

Tablo 6.2. Uçak Tipine Göre Emisyon Oranları

Hava aracı Ailesi	Havaaracı	CO ₂	HC	CO	NO _x
Airbus	A20N	4,46%	0,95%	5,68%	3,45%
Airbus	A21N	3,18%	0,19%	3,31%	2,99%
Airbus	A318	0,01%	0,03%	0,03%	0,01%
Airbus	A319	1,18%	0,13%	0,96%	0,27%
Airbus	A332	0,03%	0,02%	0,02%	0,03%
Airbus	A333	0,05%	0,04%	0,04%	0,05%
Airbus	A343	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%
Airbus	A359	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
Airbus	A320	6,12%	0,69%	5,00%	5,45%
Airbus	A321	7,01%	0,73%	3,91%	8,46%
Boeing	B733	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%
Boeing	B734	0,03%	0,03%	0,06%	0,03%
Boeing	B737	4,86%	7,81%	6,08%	4,39%
Boeing	B738	68,50%	86,03%	70,88%	69,07%
Boeing	B739	1,97%	2,21%	1,91%	2,09%
Boeing	B762	0,01%	0,08%	0,03%	0,02%
Boeing	B38M	2,41%	0,95%	1,92%	3,47%
Boeing	B39M	0,15%	0,06%	0,12%	0,22%

Yapılan değerlendirmeye göre, A20N, A321, B737 ve B738 model hava araçlarının Diyarbakır Havalimanına iniş kalkış sayılarının yüksek olmasının nedeniyle toplam emisyonlardaki paylarının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. A20N modelinin toplam CO₂, CO, NO_x ve HC emisyonlarındaki payı sırasıyla %4,46, %5,68, %3,45 ve %0,95 olarak hesaplanmıştır. A321 modelinde bu oranlar CO₂ için %7,01, CO için %3,91, NO_x için %8,46 ve HC için %0,73'tür. B737 modelinin toplam CO₂, HC, CO ve NO_x emisyonlarındaki payı ise sırasıyla %4,86, %7,81, %6,08 ve %4,39'dur. Diyarbakır Havalimanına en fazla uçuş gerçekleştirilen uçak B738 olduğundan, toplam emisyonlardaki payı da en yüksektir. B738'in toplam CO₂ emisyonlarındaki payı %68,50, toplam HC emisyonlarındaki payı %86,03, toplam CO emisyonlarındaki payı %70,88 ve toplam NO_x emisyonlarındaki payı %69,07 olarak belirlenmiştir.

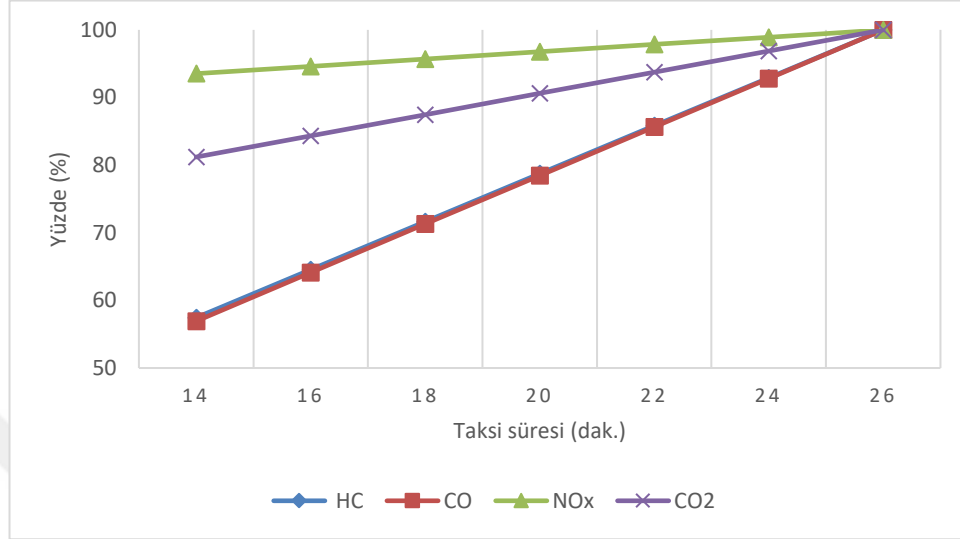
6.4. Taksi Sürelerinin Çevresel Etkiler Üzerindeki Rolü

ICAO, uluslararası sivil havacılık faaliyetlerinin küresel iklim üzerindeki etkilerini en aza indirmeyi amaçlamakta ve bu doğrultuda çevresel korumaya yönelik bütüncül bir yaklaşım benimsemektedir. Bu yaklaşım; uçak gürültüsü, yerel hava kalitesi, iklim değişikliği ve uçak emisyonları gibi temel alanları kapsamaktadır. ICAO öncülüğünde gerçekleştirilen üst düzey çevre görüşmelerinde, Paris Anlaşması'nın küresel sıcaklık artışını sınırlama hedefinin gerçekleştirilmesi için uluslararası iş birliğinin önemi vurgulanmıştır. 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda; uçak teknolojilerinin geliştirilmesi, operasyonel iyileştirmeler, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), sektör bazlı önlemler ve CORSIA'nın uygulanması üzerinde uzlaşmıştır. Bu önlemler arasında, emisyon azaltımına en yüksek katkının %53 ile sürdürülebilir havacılık yakıtlarından, ardından %34 ile uçak teknolojilerindeki ilerlemelerden sağlanacağı öngörülmektedir (ICAO, 2022a).

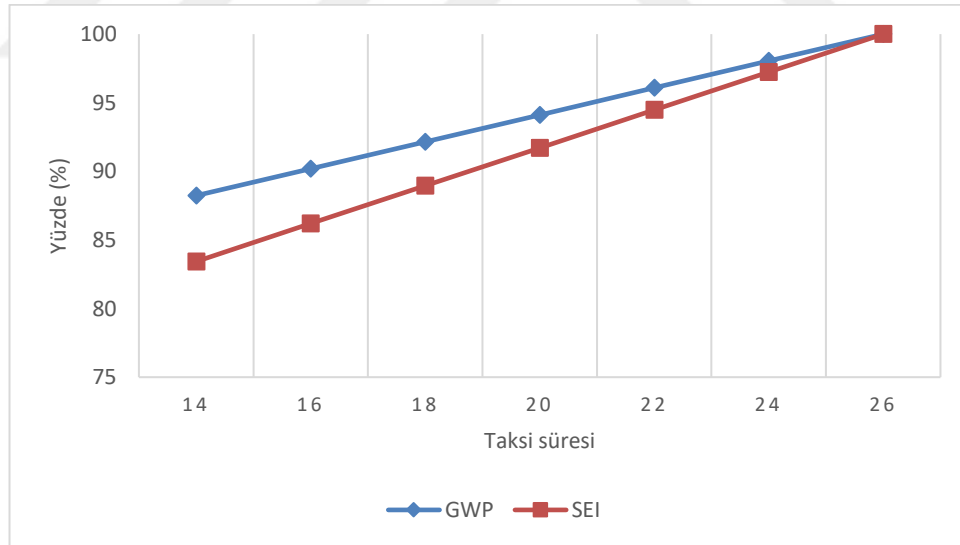
Sürdürülebilir havacılık kapsamında önemli bir araştırma alanı, uçakların yer operasyonlarının optimize edilmesidir. LTO döngüsü 3.000 feet altındaki irtifalarda gerçekleşmekte olup, havalimanları ve çevresindeki yerel hava kalitesi üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bu döngüde yer alan taksi modu, çevresel emisyonlara en fazla katkı sağlayan aşamalardan biridir. Bu çalışmada, tüm uçuş verileri dikkate alınarak taksi sürelerine bağlı olarak sera gazlarının GWP ve SEI değerleri hesaplanmıştır. Taksi süresindeki artış, yakıt tüketimine bağlı olarak kirletici emisyonların da artmasına neden olmaktadır.

Uçakların yer operasyon süreleri, özellikle taksi süresi, yerel hava kalitesi üzerinde doğrudan etkili olup, çevresel yükü artırmaktadır. Bu nedenle, havalimanlarında taksi sürelerinin azaltılması, yakıt tüketimini ve dolayısıyla iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir stratejidir. Şekil 6.24'te görüldüğü üzere, taksi süresinin 26 dakikadan 20 dakikaya düşürülmesi durumunda; HC ve CO emisyonlarında sırasıyla %21,3 ve %21,5 azaltılabilir. Bunun yanında, NO_x emisyonlarında %3,2 ve CO₂ emisyonlarında %9,4 oranında azalma sağlanabilmektedir. Ayrıca, Şekil 6.25'te gösterildiği üzere, taksi süresindeki 6 dakikalık bir azalma, GWP etkilerinde yaklaşık %6 ve SEI değerinde %8 oranında bir düşüş sağlamaktadır. Bu bulgular, havacılık sektöründe yer operasyonlarının optimize

edilmesinin çevresel etkileri azaltma açısından önemli bir katkı sağlayacağını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.24. Taksi Sürelerine Bağlı ve Sera Gazı Emisyonları



Şekil 6.25. GWP ve SEI'nin Taksi Süresine Bağlı Olarak Değişimleri

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, COVID-19 pandemisinin ticari uçuşlar üzerindeki çevresel etkileri, Diyarbakır Havalimanı özelinde 2018–2023 yılları arasındaki uçuş verileri temel alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler kapsamında uçakların iniş-kalkış (LTO) döngüsünde atmosfere salınan hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) emisyonları belirlenmiş; bu emisyonların Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), Spesifik Çevresel Etkiler (SEI) ve Spesifik Çevresel Maliyetler (SEC) üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 2020 yılı, COVID-19 pandemisinin etkisiyle tüm emisyon türlerinde önemli düşüşlerin yaşandığı bir kırılma yılı olmuştur. Bu yılda, toplam CO₂ emisyonları 2018'e göre yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Benzer şekilde HC, CO ve NO_x emisyonlarında da %65'in üzerinde düşüşler gerçekleşmiştir. Bu düşüş, hem uçuş sayısındaki azalmadan hem de havacılık faaliyetlerinin genel yavaşlamasından kaynaklanmaktadır.
- 2021 yılı itibarıyla havacılık faaliyetlerinde kademeli bir toparlanma yaşanmış ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarında yeniden artış gözlemlenmiştir. 2021 yılında CO₂ emisyonları, 2020'ye kıyasla yaklaşık %12 oranında artış göstermiştir. Bu artış eğilimi, 2022 ve 2023 yıllarında da devam etmiş ve emisyon seviyeleri pandemi öncesine yaklaşmıştır.
- Yolcu başına düşen CO₂, NO_x, CO ve HC emisyonlarında 2020 yılında artış yaşanmıştır. Uçuş sayıları azalsa da yolcu sayısındaki daha keskin düşüş nedeniyle emisyonların kişi başı çevresel yükü artmıştır. Yolcu başına CO₂ emisyonları 2020 yılında en yüksek seviyeye ulaşmıştır (8,91 kg/yolcu).
- NO_x emisyonları, GWP üzerindeki en büyük etkiye sahiptir ve tüm yıllarda toplam GWP'nin yaklaşık %57'si NO_x kaynaklıdır. CO₂ ise SEI üzerinde %81.72'lik bir paya sahiptir. Bu da NO_x ve CO₂'nin çevresel etkiler açısından en baskın kirleticiler olduğunu göstermektedir.
- COVID-19 pandemisiyle birlikte 2020 yılında toplam ticari uçuş sayısında ve yakıt tüketiminde büyük bir düşüş yaşanmış, buna paralel olarak toplam GHG

emisy onları, GWP ve SEI de ğerlerinde önemli oranında azalma meydana gelmiştir.

- Buna karşın yolcu sayısındaki keskin düşüş nedeniyle, yolcu başına düşen GWP, SEI ve SEC oranlarında %10'a yakın artış kaydedilmiştir. Bu durum, düşük doluluk oranlarının yolcu başına çevresel etkileri artırdığını göstermektedir.
- Uçak taksi sürelerinin azaltılması, önemli bir emisyon azaltma potansiyeli taşımaktadır. Taksi sürelerinin 26 dakikadan 20 dakikaya indirilmesiyle HC ve CO emisyonlarında %21,3 ve %21,5, NO_x emisyonlarında %3,2, CO₂ emisyonlarında ise %9,4 oranında azalma sağlanabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, bu iyileştirme GWP'de yaklaşık %6, SEI'de ise %8'e yakın bir düşüş sağlamaktadır.
- B738, A321, B737 ve A20N model hava araçlarının Diyarbakır Havalimanına iniş kalkış sayıları fazla olduğundan toplam emisyonlara olan katkılarının diğer modellere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle B738, neredeyse toplam GHG'lerin üçte ikisinden fazlasına neden olmaktadır.
- Emisyonların LTO döngüsündeki dağılımına bakıldığında, NO_x emisyonlarının en yoğun salındığı modun %47 ile tırmanma, CO ve HC emisyonlarının ise %90'ından fazlasının taksi aşamasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum, yer operasyonlarının çevresel etkisini azaltmaya yönelik önlemlerin önemini vurgulamaktadır.

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, havacılık sektöründe çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

Yer operasyonlarının optimize edilmesi: LTO döngüsünün özellikle taksi aşamasında emisyon salımı yüksek düzeyde gerçekleşmektedir. Bu nedenle taksi sürelerinin azaltılmasına yönelik uygulamalar yaygınlaştırılmalıdır. Bu tür iyileştirmeler, hem yerel hava kalitesi hem de küresel sera gazı emisyonları açısından anlamlı kazanımlar sağlayacaktır.

Yolcu doluluk oranlarının artırılması: Pandemi sürecinde yolcu başına düşen çevresel etkilerdeki artış, düşük doluluk oranlarının çevresel performans üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kapasite planlaması ve

frekans optimizasyonları yoluyla uçaklarda doluluk oranlarının artırılması teşvik edilmelidir.

Uçak tipi bazlı çevresel performans izleme: B738, A321 ve B737 gibi belirli uçak modellerinin fazla kullanılmasına bağlı emisyon yoğunlukları diğer modellere göre daha yüksektir. Hava yolu şirketlerinin filo yenileme stratejilerinde, çevresel etkileri düşük olan uçak modellerine öncelik vermeleri hem maliyet hem sürdürülebilirlik açısından fayda sağlayacaktır.

Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) teşvik edilmesi: Çevresel etkilerin azaltılmasında en yüksek katkının SAF kullanımıyla sağlandığı bilinmektedir. Türkiye’de bu yakıtların üretim ve kullanım altyapısının güçlendirilmesi için kamu destekli projeler ve özel sektör yatırımları teşvik edilmelidir.

Bu öneriler, yalnızca Diyarbakır Havalimanı özelinde değil, benzer ölçekli havalimanları ve bölgesel hava trafiği açısından da uygulanabilir niteliktedir. Böylelikle, Türkiye'nin ulusal iklim hedeflerine ulaşmasında havacılık sektörü önemli bir katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Abrantes, I., Ferreira, A. F., Magalhães, L. B., Costa, M., & Silva, A. (2024). The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions. *Renewable Energy*, 223, 119937.
- ACA. (2025). Airport Carbon Accreditation. Erişim Tarihi: 16 Mart 2025, <https://www.airportcarbonaccreditation.org/airports-save-one-million-tonnes-of-co2-82-82-under-airport-carbon-accreditation/>
- ACI. (2015). Airports Council International. Erişim Tarihi: 13 Mart 2025, <https://www.airportcarbonaccreditation.org/wp-content/uploads/2023/11/Airport-Carbon-Accreditation-Full-Annual-Report-2014-2015.pdf>
- ACI. (2024). Airports Council International. Erişim Tarihi: 16 Mart 2025, <https://aci.aero/about-aci/aci-regions/>
- Airbus. (2025). *Hybrid and electric flight*. Erişim Tarihi: 20 Mart 2025, <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight>
- Akdeniz, H. Y. (2022). Estimation of Aircraft Turbofan Engine Exhaust Emissions with Environmental and Economic Aspects at a Small-Scale Airport. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(2), 176-186.
- Akyüz, M. K. (2022). Environmental and enviroeconomic impacts of COVID-19 pandemic on commercial flights. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(8), 1449-1457.
- Armstrong, A. K., Krasny, M. E., & Schuldt, J. P. (2018). Communicating climate change: *A guide for educators* (p. 144). Cornell University Press.
- Aygun, H., & Caliskan, H. (2021). Environmental and enviroeconomic analyses of two different turbofan engine families considering landing and take-off (LTO) cycle and global warming potential (GWP) approach. *Energy Conversion and Management*, 248, 114797.
- Aygün, H. ve Sheikhi, M. R. (2022). Assessment of Emission and Environmental Parameters of Different Commercial High By-Pass Turbofan Engines Throughout Landing and Take-Off Cycle. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(1), 13974.
- Bakırcı, M. (2020). COVID-19 pandemisinin Türkiye havayolu ulaşımına etkisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (76), 45-58.
- Barrett, S. R., Britter, R. E., & Waitz, I. A. (2010). Global mortality attributable to aircraft cruise emissions. *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7736-7742.

- Burns, J., Movsisyan, A., Stratil, J. M., Coenen, M., Emmert-Fees, K. M., Geffert, K., ... & Rehfuss, E. (2020). Travel-related control measures to contain the COVID-19 pandemic: a rapid review. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 10, CD013717-CD013717.
- CAA. (2025). *CAR-CORSIA Civil Aviation Regulation Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*. CAA, Oman.
- Castello, P., & Haegeman, K. (2024). *Transition to sustainability in the European Union aviation system*. Seville. Spain
- Christodoulakis, J., Kelemen, M., Kouremadas, G., Varotsos, C., Karinou, F. And Fotaki, E. F. (2022). Assessment of Air Pollution from Athens International Airport and Suggestions for Adaptation to New Aviation Emissions Restrictions. *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101441.
- Ciotti, M., Ciccozzi, M., Terrinoni, A., Jiang, W. C., Wang, C. B., & Bernardini, S. (2020). The COVID-19 pandemic. *Critical reviews in clinical laboratory sciences*, 57(6), 365-388.
- Costa, A., Blanes, L. M., Donnelly, C., & Keane, M. M. (2012, Ekim). *Review of EU airport energy interests and priorities with respect to ICT, energy efficiency and enhanced building operation*. International Conference of Enhanced Building Operation. Manchester. UK
- Cui, Q., Lei, Y., Li, Y., & Wanke, P. F. (2022). Impacts of the COVID-19 on all aircraft emissions of international routes in South America. *Iscience*, 25(9), 104865.
- Çelik, L. ve Birgili, E. (2010). Çevre Finansmanı Kapsamında Emisyon Ticareti ve Karbon Piyasasının Türkiye'ye Yansımaları. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 47(544), 1-12.
- Dessens, O., Köhler, M. O., Rogers, H. L., Jones, R. L., & Pyle, J. A. (2014). Aviation and climate change. *Transport Policy*, 34, 14-20.
- DHMİ. (2025a). *Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü*. Erişim Tarihi: 2 Nisan 2025, <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Havalimani/Diyarbakir/GenelBilgiler.aspx>
- DHMİ. (2025b). *Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü*. Erişim Tarihi: 2 Nisan 2025, <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>
- E.C. (2025). European Commission. *European Climate Law*. Erişim Tarihi: 16 Mart 2025, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
- EASA. (2022). European Aviation Environmental Report 2022. Erişim Tarihi: 18 Mart 2025, https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/230217_EASA%20EAER%202022.pdf

- EASA. (2024). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. Erişim Tarihi: 4 Nisan 2025, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
- Ekici, S. ve şöhret, Y. (2020). 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.
- Ekici, S., şöhret, Y., & Gürbüz, H. (2025). Influence of COVID-19 on air pollution caused by commercial flights in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 6285-6297.
- Enes, J. (2021). *Mitigation of the aviation sector–LCA of alternative fuels, and future scenarios*. Unpublished Master's thesis. NTNU.
- EPA. (2017). U.S. Environmental Protection Agency. Erişim Tarihi: 12 Mart 2025, https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-02/documents/2017_executive_summary.pdf
- EUROCONTROL. (2025). *Continuous climb and descent operations*. Erişim Tarihi: 22 Mart 2025, <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations>
- European Commission. (2024). *Air Traffic Management and the Green Deal*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2025). *Mobility and Transport*. Erişim Tarihi: 22 Mart 2025, https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky_en
- Fan, W., Sun, Y., Zhu, T., & Wen, Y. (2012). Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010. *Atmospheric Environment*, 56, 52-57.
- GE. (2022). *GE Aerospace*. Erişim Tarihi: 20 Mart 2025, <https://www.geaerospace.com/news/articles/sustainability-technology/electric-skies-boeing-joins-ge-and-nasas-hybrid-electric-flight>
- Gielen, D., & Kram, T. (1998). The role of non-CO₂ greenhouse gases in meeting Kyoto targets. In *Economic Modelling of Climate Change, OECD Workshop Report* (pp. 17-18).
- Gürçam, S., Konuralp, E. ve Ekici, S. (2021). Determining The Effect of Air Transportation on Air Pollution in The Most Polluted City in Turkey. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(2), 354-362.
- Hasan, M. A., Mamun, A. A., Rahman, S. M., Malik, K., Al Amran, M. I. U., Khondaker, A. N., ... & Alismail, F. S. (2021). Climate change mitigation pathways for the aviation sector. *Sustainability*, 13(7), 3656.

- Hasanova, S. (2022). *Eskişehir ilindeki enerji tüketim kaynaklı sera gazlarının envanterinin belirlenmesi ve analizi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- IATA, (2019a). *Fact sheet: CORSIA*. Erişim Tarihi: 19 Mart 2025, https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/corsiafact-sheet.pdf
- IATA. (2024). *CORSIA Handbook*. Erişim Tarihi: 28 Mart 2025, <https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/corsia-handbook.pdf>
- IATA. (2025a). *Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)*. Erişim Tarihi: 25 Mart 2025, <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>
- IATA. (2025b). *International Air Transport Association*. Erişim Tarihi: 26 Mart 2025, <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/corsia/>
- ICAO. (2025a). International Civil Aviation Organization. Erişim Tarihi: 10 Mart 2025, https://applications.icao.int/postalhistory/annex_16_environmental_protection.htm
- ICAO. (2009). *Annex-14: Aerodromes, Volume I–Aerodrome design and operations (Fifth Edition)*. International Civil Aviation Organisation.
- ICAO. (2016). *Environmental Report*. Erişim Tarihi: 19 Mart 2025, https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg115-118.pdf
- ICAO. (2018). *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology*. Erişim Tarihi: 4 Nisan 2025, https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf
- ICAO. (2019). *Environmental Report*. Erişim Tarihi: 19 Mart 2025, [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf)
- ICAO. (2022a). *Environmental Report*. Erişim Tarihi: 10 Mart 2025, <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf>
- ICAO. (2022b). *GHG Management and Mitigation at Airports*. Erişim Tarihi: 18 Mart 2025, <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/GHG%20Management%20and%20Mitigation%20at%20Airports.pdfV>

- ICAO. (2023a). *Annex 16 Volume IV- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)*. Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2023b). Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. Erişim Tarihi: 30 Mart 2025, https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf
- ICAO. (2025b). Local Air Quality Technology Standards. Erişim Tarihi: 6 Nisan 2025, https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx
- IEA. (2019). CO₂ Emissions from Fuel Combustion. International Energy Agency, Paris,
- IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. Erişim Tarihi: 22 Mart 2025, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8209/-IPCC%20Special%20report,%20Aviation%20and%20the%20Global%20Atmosphere-19991758.pdf>
- IPCC. (2006). *IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan: IGES
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland,
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA
- IPCC. (2020). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Erişim Tarihi: 26 Şubat 2025, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- ISO. (2006). *ISO 14040: 2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization (ISO). Geneva.
- Kafali, H., & Altuntas, O. (2020). The analysis of emission values from commercial flights at Dalaman international airport Turkey. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(10), 1451-1457.
- Kalivoda, M.T., Kudrna, M. (1997). *Methodologies for estimating emissions from air traffic: future emissions*. Cost 319 Action, report no. MEET Project ST-96-SC.204, Vienna, Austria; 1997, Perchtoldsdorf-Vienna.

- Kesgin, U. (2006). Aircraft emissions at Turkish airports. *Energy*, 31(2-3), 372-384.
- Keskin, A., & Kanat, Z. (2018). Dünyada iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmalar ve Türkiye'de mevcut durum. *Atatürk University Journal of Agricultural Faculty*, 49(1).
- Kılıkış, B., & Kılıkış, Ş. (2017). New exergy metrics for energy, environment, and economy nexus and optimum design model for nearly-zero exergy airport (nZEXAP) systems. *Energy*, 140, 1329-1349.
- Klöwer, M., Allen, M. R., Lee, D. S., Proud, S. R., Gallagher, L., & Skowron, A. (2021). Quantifying aviation's contribution to global warming. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104027.
- Kumar, A., Singh, P., Raizada, P., & Hussain, C. M. (2022). Impact of COVID-19 on greenhouse gases emissions: A critical review. *Science of the total environment*, 806, 150349.
- Kumaş, K., İnan, O., Akyüz, A.Ö. ve Güngör, A. (2019). Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 291-297.
- Kurnaz, M. L. (2019). *Brika Sürdürülebilirlik*. Atmosferdeki Karbondioksit Miktarı Rekor Düzeyde. Erişim Tarihi: 10 Aralık 2024, <https://www.brikasurdurulebilirlik.com/atmosferdeki-karbondioksit-miktari-rekor-duzeyde/>
- Lau, J. I. C., Wang, Y. S., Ang, T., Seo, J. C. F., Khadaroo, S. N., Chew, J. J., ... & Sunarso, J. (2024). Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF). *Biomass and Bioenergy*, 186, 107277.
- 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 anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric environment*, 244, 117834.
- Li, Y., & Zheng, J. K. (2024). The impacts of the COVID-19 on the aircraft emissions from international routes from and to China. *Journal of Air Transport Management*, 119, 102640.
- Lundaev, V. (2019). *Aviation sector possibilities to reduce global warming impact*. Unpublished Master's thesis, Lappeenranta–Lahti University Of Technology Lut.
- Maertens, S., Grimme, W., Scheelhaase, J., & Jung, M. (2019). Options to Continue the EU ETS for Aviation in a CORSIA-World. *Sustainability*, 11(20), 5703.
- Mayer, B., & Ding, Z. (2023). Climate change mitigation in the aviation sector: a critical overview of national and international initiatives. *Transnational Environmental Law*, 12(1), 14-41.

- Metsims. (2024). Erişim Tarihi: 18 Mart 2025, <https://metsims.com/tr/emisyon-ticaret-sistemi-ets-nedir-2/>
- Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., & Schebek, L. (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, 34(1), 75-89.
- NASA. (2024). *What's the difference between climate change and global warming?* 28 şubat 2025, <https://science.nasa.gov/climate-change/faq/whats-the-difference-between-climate-change-and-global-warming/>
- NASA. (2025). *Carbon Dioxide*. Erişim Tarihi: 28 şubat 2025, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>
- Ortega Alba, S., & Manana, M. (2016). Energy research in airports: A review. *Energies*, 9(5), 349.
- Öz, E., & Erçoşkun, Ö. Y. (2022). Covid-19 Pandemisinin Esenboğa Havalimanı hava trafiğine ve uçak emisyonlarına etkisi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(1), 45-59.
- Prussi, M., Lee, U., Wang, M., Malina, R., Valin, H., Taheripour, F., ... & Hileman, J. I. (2021). CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111398.
- Ryley, T., Baumeister, S., & Coulter, L. (2020). Climate change influences on aviation: A literature review. *Transport Policy*, 92, 55-64.
- Sanajou, K., & Tchepel, O. (2024). Modelling of Aircraft Non-CO₂ Emissions Using Freely Available Activity Data from Flight Tracking. *Sustainability*, 16(6), 2558.
- SESAR. (2025). *Enabling Greener Flights*. Erişim Tarihi: 22 Mart 2025, <https://www.sesarju.eu/sustainability>
- SHGM. (2018). *SHT-CORSIA*. Erişim Tarihi: 28 Mart 2025, <https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/taslaklar/2018/SHT-CORSIA.pdf>
- Stefanou, P., & Haralambopoulos, D. (1998). Energy demand and environmental pressures due to the operation of Olympic Airways in Greece. *Energy*, 23(2), 125-136.
- Strack, M., Pinho Chiozzotto, G., Iwanizki, M., Plohr, M., & Kuhn, M. (2017). *Conceptual design assessment of advanced hybrid electric turboprop aircraft configurations*. In 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (p. 3068).

- Sumner, A., Hoy, C., Ortiz-Juarez, E. (2020). Estimates of the impact of COVID-19 on global poverty, WIDER Working Paper, No. 2020/43, The United Nations University World Institute for Development Economics Research (UNU-WIDER), Helsinki
- Sun, X., Wandelt, S., & Zhang, A. (2023). Aviation under the COVID-19 pandemic: A synopsis from normalcy to chaos and back. *Journal of the Air Transport Research Society*, 1(1), 136-151.
- Sun, X., Wandelt, S., Zheng, C., & Zhang, A. (2021). COVID-19 pandemic and air transportation: Successfully navigating the paper hurricane. *Journal of Air Transport Management*, 94, 102062.
- Sustainability Impact Metrics. (2025). *What are eco-costs?* Erişim Tarihi: Erişim Tarihi: 8 Nisan 2025, <https://www.ecocostsvalue.com/ecocosts/#top>
- Şöhret, Y. (2019). Multi-objective evaluation of aviation-induced GHG emissions: UK domestic flight pattern. *Energy & Environment*, 30(6), 1049-1064.
- Tokuslu, A. (2020). Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport. *Energy*, 206, 118219.
- TOPSOE. (2025). Erişim Tarihi: 23 Mart 2025, https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel?gad_source=1&gad_campaignid=20660454919&gbraid=0AAAAAqXg41y5kibKF4E6LvgLEAANz3hWz&gclid=CjwKCAjwuIbBBhBvEiwAsNypvfTIVRsUgJ9tsOF2Kriljks8DXGmp93DxEXCJ40ZJTKU8ztUiRtu6hoCqsMQAvD_BwE
- Turan, P. (2020). *Yeşil Havalimanı Kapsamında Sera Gazı Emisyonları: İstanbul Havalimanı Örneği*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Undavalli, V., Olatunde, O. B. G., Boylu, R., Wei, C., Haeker, J., Hamilton, J., & Khandelwal, B. (2023). Recent advancements in sustainable aviation fuels. *Progress in Aerospace Sciences*, 136, 100876.
- UNFCCC. (2015). *Adoption of the Paris Agreement, Conference of the Parties, Twenty-First Session (COP 21); United Nations Framework Convention on Climate Change*: Paris, France. Erişim Tarihi: 26 Mart 2025, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- UNFCCC. (2025). Erişim Tarihi: 26 Şubat 2025, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- US Department of Energy. (2025). *Sustainable Aviation Fuel*. Erişim Tarihi: 25 Mart 2025, <https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel>
- Uysal, M. P., & Sogut, M. Z. (2017). An integrated research for architecture-based energy management in sustainable airports. *Energy*, 140, 1387-1397.

- Ünal, İ., Türkoğlu, F., & Doğan, B. (2014). Nevşehir Kapadokya Havalimanının emisyon ve gürültü açısından değerlendirilmesi. *Engineer & The Machinery Magazine*, (654), 24-29.
- Vieira, J. P. B., Braga, C. K. V., & Pereira, R. H. (2022). The impact of COVID-19 on air passenger demand and CO₂ emissions in Brazil. *Energy Policy*, 164, 112906.
- Vogtlander, J. 2019. *Data on eco-costs*. Delft, The Netherlands.: Delft University of Technology
- Watson, M. J., Machado, P. G., Da Silva, A. V., Saltar, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141472.
- Wheeler, P., Sirimanna, T. S., Bozhko, S., & Haran, K. S. (2021). Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1115-1127.
- WHO. (2025). Coronavirus disease (COVID-19). Erişim Tarihi: 30 Mart 2025, https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1
- Williams, P. I., Allan, J. D., Lobo, P., Coe, H., Christie, S., Wilson, C., ... & Rye, L. (2012). Impact of alternative fuels on emissions characteristics of a gas turbine engine—Part 2: Volatile and semivolatile particulate matter emissions. *Environmental science & technology*, 46(19), 10812-10819.
- WRI. (2024). *Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector*. 1 Mart 2025. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>
- Xu, H., Xiao, K., Cheng, J., Yu, Y., Liu, Q., Pan, J., ... & Fu, Q. (2020). Characterizing aircraft engine fuel and emission parameters of taxi phase for Shanghai Hongqiao International Airport with aircraft operational data. *Science of The Total Environment*, 720, 137431.
- Yılmaz, Y. ve Behçet, R. (2024). Kütahya Zafer Havalimanını Kullanan Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonlar. *EJONS*, 8(1), 66-75.
- Zeydan, Ö. Z. G. Ü. R., & Zeydan, İ. (2024). Impacts of travel bans and travel intention changes on aviation emissions due to Covid-19 pandemic. *Environment, Development and Sustainability*, 26(2), 4955-4972.
- Zhou, Y., Jiao, Y., Lang, J., Chen, D., Huang, C., Wei, P., ... & Cheng, S. (2019). Improved estimation of air pollutant emissions from landing and takeoff cycles of civil aircraft in China. *Environmental pollution*, 249, 463-471.