

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

TÜRKİYE İÇ HAT OPERASYONLARINDA KULLANILAN DAR GÖVDELİ
UÇAKLARIN İNİŞ-KALKIŞ (LTO) EMİSYONLARININ UÇAK/MOTOR BAZLI
ANALİZİ

Hatice KILIÇ

Danışman: Prof. Dr. Harun YILMAZ

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Harun YILMAZ

Dr. Öğretim Üyesi Kadir Münir ERCÜMEN

Dr. Öğretim Üyesi Ömer ÇAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Hatice KILIÇ]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. Harun YILMAZ danışmanlığında, Hatice KILIÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 10/06/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğretim Üyesi Ömer ÇAM

İmza:

Üye : Prof. Dr. Harun YILMAZ

İmza:

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Kadir Münir ERCÜMEN

İmza:

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Türkiye İç Hat Operasyonlarında Kullanılan Dar Gövdeli Uçakların İniş-Kalkış (LTO) Emisyonlarının Uçak/Motor Bazlı Analizi” isimli “Yüksek Lisans” tezimin tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 10/06/2026.

(İmza)

Hatice KILIÇ

ÖZET

TÜRKİYE İÇ HAT OPERASYONLARINDA KULLANILAN DAR GÖVDELİ UÇAKLARIN İNİŞ-KALKIŞ (LTO) EMİSYONLARININ UÇAK/MOTOR BAZLI ANALİZİ

Hatice KILIÇ

Yüksek Lisans Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Harun YILMAZ

2026, 80 sayfa

Bu tez çalışmasında, havacılık sektöründe önemli bir çevresel etki unsuru olan uçak emisyonları, iniş-kalkış (LTO) fazı kapsamında uçak/motor kombinasyonu temelinde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında Türkiye iç hat operasyonlarında yaygın olarak kullanılan A320, A320neo, A321, A321neo, B737-800, B737 MAX ve B737-900 uçak tipleri ele alınmış ve bu uçaklarda kullanılan farklı motor varyantlarının emisyon performansları karşılaştırılmıştır. Emisyon hesaplamalarında literatürde yaygın olarak kullanılan ICAO Motor Emisyon Veri Tabanı (EEDB) yerine EUROCONTROL tarafından geliştirilen IMPACT modeli tercih edilmiştir. Bu sayede motorların uçakla bütünleşik yapısı ve gerçek operasyonel koşullar dikkate alınarak daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Analiz sonuçları, aynı uçak tipi içerisinde farklı motor seçeneklerinin hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve azot oksit (NO_x) emisyonları üzerinde önemli farklılıklar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, IMPACT modeli ile hesaplanan emisyon değerlerinin ICAO referanslarına kıyasla genel olarak daha yüksek olduğu ve bu durumun gerçek uçuş koşullarını daha iyi temsil ettiği belirlenmiştir. Yeni nesil uçakların daha düşük emisyon değerleri sunduğu görülmekle birlikte, motor seçiminin emisyon performansı üzerinde kritik bir belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, uçak/motor kombinasyonuna dayalı bu analiz yaklaşımı, havayolu işletmeleri için hem çevresel etkilerin azaltılması hem de yakıt tüketiminin optimize edilmesi açısından etkili bir karar destek aracı sunmaktadır. Bu yaklaşımın, sürdürülebilir filo planlaması ve operasyonel karar alma süreçlerine önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: LTO emisyonları, Uçak-motor kombinasyonu, Eurocontrol impact modeli, Havacılık emisyonları, Filo planlama optimizasyonu

ABSTRACT

AIRCRAFT/ENGINE-BASED ANALYSIS OF LANDING AND TAKE-OFF (LTO) EMISSIONS OF NARROW-BODY AIRCRAFT USED IN DOMESTIC OPERATIONS IN TÜRKİYE

Hatice KILIÇ

Master's Thesis

**Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,
Department of Aviation Science and Technology**

Advisor: Prof. Dr. Harun YILMAZ

2026, 80 pages

In this thesis, aircraft emissions, which constitute a significant environmental impact factor in the aviation sector, are analyzed within the Landing and Take-Off (LTO) cycle based on aircraft–engine combinations. The study focuses on commonly used aircraft types in domestic operations in Türkiye, including A320, A320neo, A321, A321neo, B737-800, B737 MAX, and B737-900, and compares the emission performance of different engine variants used on these aircraft. Instead of the widely used ICAO Engine Emissions Databank (EEDB), the EUROCONTROL IMPACT model is employed for emission calculations. This approach enables the consideration of the integrated structure of aircraft and engines as well as real operational conditions, thereby providing more realistic and reliable results. The findings indicate that different engine options within the same aircraft type led to significant variations in hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxides (NO_x) emissions. Furthermore, emission values calculated using the IMPACT model are generally higher than ICAO reference values, suggesting that the model better reflects actual flight conditions. Although new-generation aircraft generally exhibit lower emission levels, engine selection is identified as a critical determinant of overall emission performance. In conclusion, the aircraft–engine combination-based analysis approach provides an effective decision-support tool for airline operators in reducing environmental impacts and optimizing fuel consumption. This approach is expected to contribute significantly to sustainable fleet planning and operational decision-making processes.

Keywords: LTO emissions, Aircraft-engine combination, Eurocontrol impact model, Aviation emissions, Fleet planning optimization

TEŐEKKÖR

Tezimde bana yardımcı olan eőim Doç. Dr. Uęur KILIÇ ve danışmanım Prof. Dr. Harun YILMAZ'a teşekkür ederim.

Hatice KILIÇ

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
1.GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi	3
1.2. Gaz Türbinli Motorlar	4
1.3. Kirlenici Emisyonların Tanımı ve Çevreye Etkileri	7
1.4. LTO Uçuş Fazlarında Emisyon	10
1.5. Emisyon Salınımına Etki Eden Parametreler	13
1.6. Uçuş Mesafeleri Bilgisi	16
1.7. Havalimanları Bilgisi	17
1.8. Literatür Taraması	24
2. YÖNTEM	36
2.1. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü-Uçak Motoru Emisyon Veri Bankası	36
2.2. EUROCONTROL IMPACT Modelleme Platformu	41
3. BULGULAR	45
4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKÇA	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. ICAO-EEDB LTO Güç ve Süre Değerleri	11
Tablo 2. Uçuş Mesafeleri	16
Tablo 3. Esenboğa Havalimanı Pist Bilgileri	18
Tablo 4. ICAO-EEDB Motor Bilgileri	37
Tablo 5. Çalışmada Kullanılan ve Airbus Firmasına Ait Bazı Uçak Bilgileri	40
Tablo 6. Çalışmada Kullanılan ve Boeing Firmasına Ait Bazı Uçak Bilgileri	40
Tablo 7. A320 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları.....	45
Tablo 8. A320Neo için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları	48
Tablo 9. A321 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları.....	51
Tablo 10. A321Neo için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları	53
Tablo 11. B737-800 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları.....	55
Tablo 12. B737Max için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları.....	57
Tablo 13. B737-900 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Turbofan Motorun Parçaları	5
Şekil 2. Uçuş Fazları.	10
Şekil 3. Ankara Esenboğa Uluslararası Havalimanı.....	18
Şekil 4. Trabzon Havalimanı.....	22
Şekil 5. IMPACT Platformu.....	42
Şekil 6. IMPACT Platformu ve İlişkili Uçuş Fazları.....	43
Şekil 7. A320 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması.	47
Şekil 8. A320Neo için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması .	49
Şekil 9. A321 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması.....	52
Şekil 10. A321Neo için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması	54
Şekil 11. B737-800 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması.	56
Şekil 12. B737Max için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması.	58
Şekil 13. B737-900 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması.	61

1. GİRİŞ

İnsanlar günlük yaşamlarını sürdürebilmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar ve bu enerji ihtiyacı nüfus artış oranına göre her geçen gün daha da artış göstermektedir. Yanma, insan yaşamının başlangıcından beri en temel enerji dönüşüm yöntemi olarak kullanıldığından ve kullanılan yakıt türlerinden dolayı doğaya salınan kirletici emisyonlar, bu artışa paralel olarak artmıştır. Yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar artış göstermesine rağmen, günümüzde enerji talebinin büyük bölümü hâlâ fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz ve kömür) aracılığıyla karşılanmaktadır. Bu durum, hava kirliliği, sera gazı birikimi, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtların enerji üretimindeki yüksek payını sürdüren etkenlerden biri de havacılık sektöründe yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyonların yeterince kapsamlı ve gerçekçi şekilde analiz edilememesidir (IEA, 2018).

Yedi farklı rota aralığına (uzun mesafeli uçuşlar, orta mesafeli uçuşlar, kısa mesafeli uçuşlar, karışık uzun mesafe/orta mesafe, karışık orta mesafe/kısa mesafe, karışık uzun mesafe/kısa mesafe ve karışık uzun mesafe/orta mesafe/kısa mesafe) göre yapılan sınıflandırma doğrultusunda, dünya genelindeki uçuşların %89,5'inin 1.500 km ve altındaki mesafeleri kapsayan kısa mesafeli uçuşlardan oluştuğu belirlenmiştir (CND/CODA, 2011). Kısa mesafeli uçuşlar, toplam uçuşlar içindeki yüksek oranlarının yanı sıra, birim mesafe başına değerlendirildiğinde orta ve uzun mesafeli uçuşlara kıyasla daha yüksek emisyon salınımına neden olmaktadır (Baumeister, 2019). Uçak emisyonları küresel olarak %71,5 karbondioksit (CO₂), %28 su buharı (H₂O) ve %0,5 diğer gazlardan (azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x), karbon monoksit (CO), yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonlar (HC), partikül maddeler (PM) ve diğer eser bileşikler) oluşmaktadır (Young v.d., 2019). CO₂, H₂O, NO_x ve SO_x emisyonları hem küresel hem de yerel hava kalitesi üzerinde etkiye sahipken, CO, HC ve PM emisyonları iniş ve kalkış (LTO) döngüsü operasyonları olarak yerel hava kalitesi üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. İniş ve kalkış faaliyetleri şehir merkezlerinin yakınında gerçekleştirildiğinden dolayı tüm kirletici emisyonlar yaşam alanlarına salınır ve doğrudan insan sağlığını, hava kalitesini ve ekosistemi etkiler (Rohacs v.d., 2022).

Atmosfer, Dünya'yı çevreleyen ve yaşamın devamı için gerekli fiziksel ve kimyasal koşulları sağlayan bir gaz örtüsüdür. Genel olarak troposfer, stratosfer, mezosfer, termosfer ve ekzosfer olmak üzere beş temel tabakadan oluşur. Troposfer, yüzeye en yakın tabaka olup su buharı

içeriğinden dolayı hava olaylarının tamamına yakını burada gerçekleşir ve atmosferik gazların büyük bölümü bu tabakada yoğunlaşır. Troposferin üzerinde yer alan stratosfer tabakası, ozon tabakasının varlığı sayesinde Güneş'ten gelen zararlı ultraviyole (UV) radyasyonun önemli bir kısmını soğutarak Dünya'daki yaşamı korur (Wallace ve Hobbs, 2006). Atmosferdeki enerji dengesi, gelen güneş ışınımı ile yeryüzünden geri yayılan uzun dalga ışınımı (kızılötesi) arasındaki etkileşimle sürdürülür. Sera gazları olarak adlandırılan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve su buharı gibi gazlar, bu uzun dalga ışınımın bir kısmını tutarak doğal sera etkisini oluşturur. Bu etki, Dünya'nın yaşanabilir sıcaklık seviyesini koruması açısından zorunlu olmakla birlikte, insan kaynaklı faaliyetlerin sera gazı yoğunluklarını artırması, bu doğal mekanizmayı bozarak küresel ısınmaya yol açmaktadır (IPCC, 2021). Sanayi Devrimi sonrası fosil yakıt tüketiminin hızla artması, özellikle CO₂ ve CH₄ birikiminde önemli artışlara neden olmuştur. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre, atmosferdeki CO₂ yoğunluğu son iki milyon yılın en yüksek seviyelerine ulaşmış ve küresel ortalama yüzey sıcaklığı 1850–1900 dönemine göre yaklaşık 1,1°C artmıştır (IPCC, 2021). Bu sıcaklık artışı; deniz seviyelerinde yükselme, buzulların hızla erimesi, aşırı hava olaylarının sıklığında artış ve ekosistemlerin bozulması gibi geniş kapsamlı çevresel etkileri beraberinde getirmektedir. Ulaşım sektörü, özellikle havacılık sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının önemli kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Havacılık sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2–2.5'ini oluşturmaktadır (Lee v.d., 2021). Ek olarak yüksek irtifalarda meydana gelen NO_x emisyonları, iz bulutları (contrails) ve sirus bulutlarının oluşumu, CO₂ dışı iklim etkileri yaratarak toplam iklim zorlaması üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, atmosfer yapısının anlaşılması ve küresel ısınma mekanizmalarının havacılık faaliyetleriyle ilişkilendirilmesi, sürdürülebilir hava taşımacılığının planlanması açısından kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, atmosferin tabakalaşma özellikleri, enerji dengesi ve sera gazlarının rolü küresel ısınma sürecini doğrudan etkilemektedir. Artan antropojenik-insan kaynaklı emisyonlar, atmosferin radyatif dengesini bozarak iklim sistemini geri dönüşü zor değişimlere sürüklemektedir. Bu çerçevede emisyon azaltıcı uygulamalar, alternatif yakıt teknolojileri ve sürdürülebilir ulaşım politikaları küresel ısınma ile mücadelede önemli bir yere sahiptir.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Havalimanlarında iniş ve kalkış gerçekleştiren uçakların motorlarından salınan emisyonların doğrudan ölçümü çoğu durumda güç, bazı durumlarda ise mümkün değildir. Bu nedenle, söz konusu emisyonlar genellikle hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir (Emisyon ölçüm cihazları bazı emisyonları ölçtüğü değerlerden hesaplama yoluyla elde etmektedir). Bu çalışmada yapılan analizler ile uçak emisyonlarının hesaplanması işlemi sadece uçak veya sadece motor tipine göre değil de ikisinin birleşimine göre yapılmıştır. Hesaplamalar havalimanı ile çevresini en çok kirlüten LTO fazı için yapılmıştır. Literatürde yer alan Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü-Motor Emisyonları Veri Tabanına (ICAO-EEDB) göre yapılan çalışmalar yerine bu çalışmada Avrupa Hava Seyrüsefer Güvenliği Örgütü- Entegre Uçak Gürültüsü ve Emisyon Modelleme Platformunun (EUROCONTROL-IMPACT) kullanımı ile motor tiplerinin uçağa bütünleşmiş şekilde yani motorun bir ağırlık altında incelenmesiyle daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede hem her bir uçak için en optimum uçak/motor kombinasyonu seçilirken, hem de en çevreci uçak/motor kombinasyonu analiz edilmiştir.

Çalışmada Türkiye’de iç hat uçuşlarında en çok kullanılan uçak tipleri için en çevreci uçak/motor kombinasyonlarının önerilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, salınan emisyonun daha az düzeyde seyretmesi bir yönüyle yakılan yakıtın miktarı ve yakıtın kimyasal bileşimine bağlı olduğundan dolayı en çevreci uçak/motor kombinasyonunun önerilmesi çevresel faydanın yanı sıra havayolları için yakıt maliyetlerinin azalmasını da sağlayacaktır. Bu amaca ulaşılırken, yalnızca motor verilerine dayanan ICAO-EEDB ve Tier1/Tier2 yöntemleri yerine, uçak ve motor tipini birlikte ele alan EUROCONTROL IMPACT programı kullanılarak emisyon hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Havayollarının, sürdürülebilirlik ve çevresel etki kategorisinde kendi filolarının yakıt tüketimi ve emisyon haritalarını değerlendirirken uçak/motor eşleşmelerini dikkate almaları gerekir. Örneğin; Airbus A320'nin sahip olduğu motorların tip kodları şöyledir: 1IA002, 1IA003, 3IA006, 3CM026, 3CM027 ve 3CM028. Listelenen bu motor tip kodlarına sahip her bir gaz türbininin farklı yakıt tüketim miktarları ve bu tüketimden kaynaklanan farklı miktarda emisyonları bulunmaktadır. Bu sınıflandırma her bir uçak için yapıldığında uçak/motor ilişkisine göre yakılan yakıt ve salınan emisyon değerlerinin ne kadar çeşitli olacağı açıktır. Bu çalışmanın, havayolu işletmelerine yakıt tüketimi ve emisyon kriterleri doğrultusunda filo planlaması konusunda yol göstermesi amaçlanmaktadır. Elde edilen bulguların, havayollarının filo tercihlerini yalnızca operasyonel ihtiyaçlara göre değil, aynı zamanda yakıt verimliliği ve çevresel maliyetler gibi unsurları da

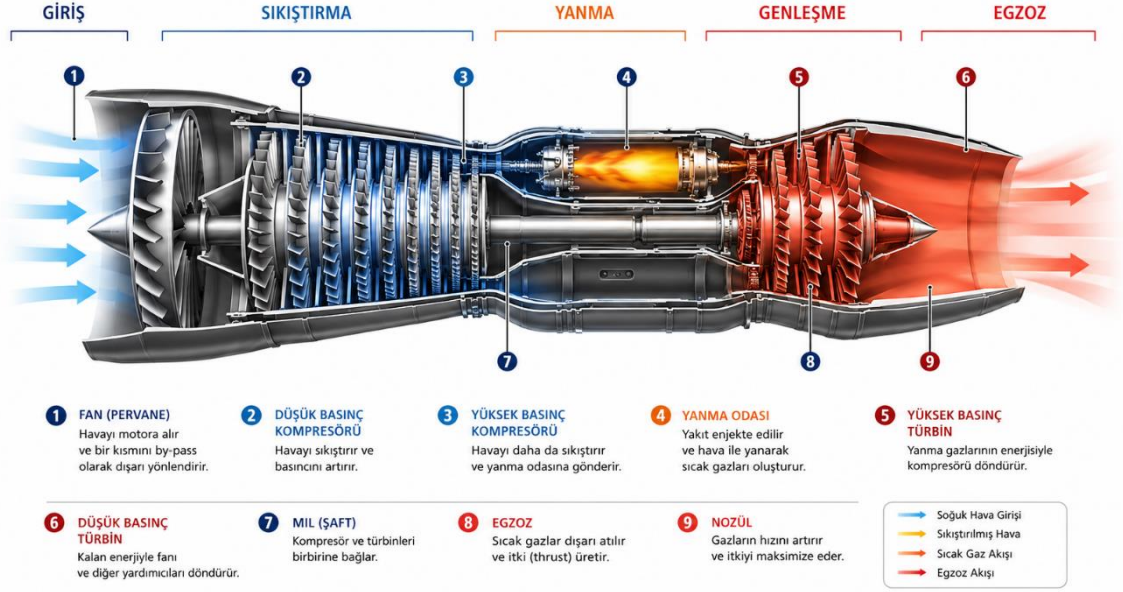
dikkate alarak şekillendirmelerine katkı sağlaması beklenmektedir. Araştırma kapsamında, uçak/motor kombinasyonuna dayalı olarak yolcu uçaklarının yakıt tüketimi ve emisyon değerleri, kapsamlı bir bilgisayar simülasyon yöntemi kullanılarak tutarlı biçimde analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, araştırmacılar, akademisyenler, havayolu işletmecileri, politika yapıcılar ve karar vericiler için sistematik bir uçak/motor seçimi çerçevesi sunarken, aynı zamanda ilgili uçakların yakıt tüketimi ve emisyon karakteristiklerinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tez çalışmasında uçak/motor önerileri yapılırken kısa mesafeli bir uçuş olan Ankara-Trabzon uçuşu seçilmiştir (yaklaşık 584 km). Bu çalışmada LTO emisyonları yani sadece iniş ve kalkış aşamalarından salınan emisyonlar incelenecektir. Yapılan çalışma akademik bilginin pratik uygulamaya dönüştürülebileceği çalışmalardan biridir.

1.2. Gaz Türbinli Motorlar

Havacılık sektöründe uçuş trafiğinin artmasıyla birlikte, gaz türbinli uçak motorlarından kaynaklanan emisyonların çevresel etkileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Gaz türbinli motorlar, yüksek itki üretme kabiliyetleri ve operasyonel güvenilirlikleri nedeniyle modern ticari havacılığın temel itki sistemini oluşturmaktadır; ancak yanma süreci sonucunda atmosfere çeşitli kirletici gazlar ve partikül maddeler salmaktadır. Bu emisyonlar başlıca karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve partikül maddeler (PM) olarak sınıflandırılmaktadır (Kılıç, 2023).

Gaz türbinli motor emisyonlarının miktarı; motor tipi, bypass oranı, yanma odası tasarımı, yakıt tipi, periyodik bakımlar, motor güç seviyesi ve uçuş fazına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek bypass oranlı turbofan motorlar, daha yüksek itki verimi ve daha düşük özgül yakıt tüketimi sayesinde birim yolcu-kilometre başına düşen CO₂ emisyonlarını azaltmaktadırlar. Bununla birlikte, artan basınç oranları ve yüksek türbin giriş sıcaklıkları NO_x oluşumunu sınırlama açısından önemli bir tasarım problemi oluşturmaktadır. Turbofan motorlar, modern ticari hava taşımacılığında kullanılan en yüksek verimli gaz türbini motorlarıdır. Bu motorlar, temel olarak Brayton çevrimi prensibine göre çalışan, ön tarafta büyük bir fan ile hem bypass akımı hem de çekirdek akışı oluşturan, çok kademeli sıkıştırma ve genişlemeye dayalı gelişmiş sistemlerdir (Soares, 2015).

Şekil 1 de bir turbofan motorun ana bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Turbofan Motorun Parçaları (El-Sayed, 2017)

a) Fan (Ön Fan Ünitesi)

Fan, turbofan motorun karakteristik olarak en büyük bileşenidir ve toplam itkinin büyük bölümünü üretir. Bypass oranı, özellikle turbofan uçak motorlarında, motorun fan kısmından geçerek yanma odasına girmeden dışarı atılan havanın (bypass havası), motor çekirdeğinden (yanma odasından) geçen havaya oranıdır. Yüksek bypass oranlı motorlarda itkinin %80'e yakını fandan elde edilmektedir. Fan kanatları tarafından hızlandırılan hava iki akıma ayrılır:

- Bypass akımı: Motor çekirdeğine girmeden fan kanalından akarak itki üretir.
- Çekirdek akımı: Motorun kompresör, yanma odası ve türbin bölümlerinden geçer.

Fan, motorun toplam verimliliğini artıran en kritik bileşendir çünkü büyük miktarda havayı düşük enerji seviyesinde hızlandırarak daha efektif itki oluşturur (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

b) Düşük Basınç Kompresörü (DBK)

Fanın hemen arkasında yer alan düşük basınç kompresörü, çekirdek akımının ilk sıkıştırma aşamasını gerçekleştirir. Çok kademeli rotor–stator yapısından oluşur ve havayı yüksek basınç kompresörüne hazırlayarak toplam sıkıştırma oranının önemli bir bölümünü sağlar. DBK'nın verimi, motorun özgül yakıt tüketimi (SFC) ve yanma verimi üzerinde belirleyicidir (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

c) Yüksek Basınç Kompresörü (YBK)

Modern turbofan motorlarda YBK, motor çekirdeğinin en karmaşık ve yüksek mühendislik isteyen bölümüdür. Hava, bu kompresörde 25–50 bar seviyelerine kadar sıkıştırılır. Sıkıştırma oranındaki artış motorun termodinamik verimini doğrudan yükseltir. Yüksek basınç kompresörü aynı zamanda motorun kararlılığını etkileyen stall ve surge davranışlarını kontrol eden önemli bir unsurdur (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

d) Yanma Odası (Combustion Chamber)

Sıkıştırılmış hava, yanma odasında yakıt ile karıştırılır ve sürekli yanma prensibiyle yüksek sıcaklıkta genişletilerek ivmelendirilir ve türbinin ihtiyaç duyduğu sıcak gaz akışı sağlanır. Yanma odasının tasarım hedefleri şunlardır:

- Yüksek yanma verimi (%98'e kadar),
- Tam ve kararlı yanma,
- Düşük NO_x, CO ve kurum emisyonu,
- Çıkışta uniform sıcaklık dağılımı,
- Türbin giriş sıcaklığının kontrol edilmesi (1400–1700°C).

Literatür, modern motorlarda “lean-burn” ve “rich-quench-lean” gibi emisyon azaltıcı yanma teknolojilerinin yaygınlaştığını göstermektedir (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

e) Yüksek Basınç Türbini (YBT)

Yüksek basınç türbini, yanma odasından çıkan yüksek enerjili gaz akışını kullanarak iş üretir ve yüksek basınç kompresörünü tahrik eder. Türbin kanatlarında kullanılan süper alaşımlar, tek kristalli malzemeler ve termal bariyer kaplamaları sayesinde 1500°C üzerindeki operasyonlar mümkün olmaktadır. Brayton çevriminin verimi sıcaklıkla arttığından YBT'nin verimi, motorun termal verimliliğini doğrudan etkiler (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

f) Düşük Basınç Türbini (DBT)

Düşük basınç türbini, fanın ihtiyaç duyduğu ve düşük basınç kompresöründen alınması gereken gücü sağlar. Özellikle yüksek bypass oranlı motorlarda DBT çok kademeli bir yapıya sahiptir. DBT tarafından çekilen güç, motor tasarımında en büyük güç gereksinimlerinden biridir. Bypass itkisinin fazla olduğu motorlarda DBT'nin mekanik verimi motorun genel veriminde kritik rol oynar (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

g) Nozül (Egzoz Çıkışı)

Nozül, türbin çıkışındaki gaz akışını hızlandırarak nihai itkinin oluşmasını sağlar. Jet akımının hızlandırılması Newton'un üçüncü yasasına göre itki üretir. Nozül tasarımının hedefleri şunlardır:

- Egzoz çıkışında akışı ses hızına kadar hızlandırmak,
- Basınç kayıplarını azaltmak,
- Gürültüyü azaltmak.

Modern turbofan motorlarında bazı nozüller değişken geometrilidir (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

Uçak motorları, havacılık sistemlerinin performans, verimlilik ve çevresel etkiler açısından en kritik bileşenlerinden biridir. Özellikle motor tasarımı ve motor tipi, yakıt tüketimini ve buna bağlı olarak atmosfere salınan emisyon miktarlarını doğrudan belirlemektedir. Günümüzde sivil ve askeri havacılıkta yaygın olarak kullanılan motor tipleri; turbojet, turbofan, turboprop ve pistonlu motorlar olup, bu motorların her biri farklı çalışma prensiplerine ve emisyon karakteristiklerine sahiptir (Mattingly v.d., 2002). Motor analizi, bir uçak motorunun itki üretimi, özgül yakıt tüketimi (SFC), termal verim, yanma verimi ve emisyon çıktılarının değerlendirilmesini kapsayan çok disiplinli bir süreçtir.

Motor emisyon analizi kapsamında genellikle aşağıdaki parametreler dikkate alınır:

- Yakıt debisi
- Yanma odası sıcaklığı ve basıncı
- Hava-yakıt oranı
- Motor by-pass oranı
- Uçuş fazı (taksi, kalkış, tırmanış, seyir)

Bu parametreler, motorun hem performansını hem de CO₂, NO_x, CO, HC ve partikül madde (PM) emisyonlarını belirleyen temel unsurlardır (ICAO, 2026).

1.3. Kirletici Emisyonların Tanımı ve Çevreye Etkileri

Havacılık faaliyetleri sırasında jet motorlarında gerçekleşen kerosen yanması, atmosferde hem küresel hem de yerel ölçekte etkileri bulunan çeşitli kirleticilerin ortaya çıkmasına neden olur. Uçak motoru emisyonları yalnızca CO₂ ve su buharı gibi temel yanma ürünleriyle sınırlı değildir; aynı zamanda azot oksitleri (NO_x), kükürt oksitleri (SO_x), karbon monoksit (CO),

yanmamış hidrokarbonlar (HC), formaldehit gibi toksik bileşikleri ve çok ince partikül maddeleri (PM_{2.5} ve PM_{0.1}) de kapsamaktadır. Bu emisyon türleri, kimyasal yapıları ve atmosferik davranışları nedeniyle iklim değişikliği, hava kirliliği ve insan sağlığı açısından ciddi riskler taşır (Kılıç, 2023). Uçak emisyonlarının etkileri iki temel başlık altında değerlendirilir; küresel iklim sistemi üzerindeki etkiler ve yerel hava kalitesi üzerindeki etkiler. Yüksek irtifalarda yayılan CO₂, H₂O ve NO_x gibi emisyonlar iklim zorlaması yoluyla iklim değişikliğini hızlandırırken; düşük irtifalarda salınan CO, HC ve PM türü kirleticiler doğrudan şehir merkezlerine taşınarak insan sağlığını etkiler. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), PM_{2.5} için yıllık güvenli sınır değerini 5 µg/m³ olarak belirlemiş olsa da havalimanına yakın bölgelerde bu sınır çoğu zaman aşılmaktadır (WHO, 2021). Yerel hava kirliliği açısından, LTO döngüsünde motorun düşük güç ayarlarında ürettiği CO ve HC emisyonlarının yanı sıra tam güç kalkış sırasında üretilen NO_x emisyonları, havalimanı çevresindeki popülasyon için sağlık açısından kritik riskler oluşturmaktadır. NO_x emisyonlarının havalimanı çevresinde ozon oluşumunu artırarak astım ve solunum yolu hastalıklarının yaygınlaşmasına yol açabileceği belirtilmektedir. Partikül madde (PM_{2.5} ve PM_{0.1}) ise, motor yanma verimine bağlı olarak oluşan kurumsu yapıları nedeniyle hem akciğer hem de kardiyovasküler sistem üzerinde toksik etkilere sahiptir (Stettler v.d., 2011).

Yakıt bileşimi ve motor teknolojisi de hava kirliliği üzerinde belirleyici faktörlerdir. Yüksek aromatik içerikli jet yakıtlarının daha fazla partikül madde üretimine yol açtığı ve bu durumun hem sağlık riski hem de contrail oluşum ihtimalini artırdığı rapor edilmektedir. Ayrıca yeni nesil motorlarda kullanılan lean-burn combustor teknolojilerinin NO_x emisyonlarını azaltmada etkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (EASA, 2022). Son yıllarda sürdürülebilir havacılık literatürü, SAF (Sustainable Aviation Fuel) kullanımının hava kirliliği üzerindeki etkilerini incelemeye yönelmiştir. %50 SAF karışımı kullanılan uçuşlarda partikül madde emisyonlarının %50'den fazla azalabildiği gösterilmiş ve bunun uzun vadede hem hava kalitesi hem de iklim etkileri açısından önemli bir iyileştirme sağlayabileceği belirtilmiştir (Moore v.d., 2017). Genel olarak literatür, havacılığın hava kirliliği üzerindeki etkisinin çok boyutlu olduğunu ve hem yerel hava kalitesini hem de küresel iklim sistemini etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle havacılık sektöründe emisyon azaltım stratejileri, hava kalitesi yönetimi, alternatif yakıtlar, yeni nesil motor teknolojileri ve operasyonel iyileştirmeler güncel araştırmaların odak noktasını oluşturmaktadır.

Aşağıda uçak motorlarında oluşan ve ICAO-EEDB ile bu çalışmada incelenen başlıca emisyon türleri ve bunların bilimsel olarak belirlenmiş çevresel etkileri özetlenmiştir.

a) Azot Oksitler (NO_x)

Yüksek sıcaklıklarda azot ve oksijenin birleşmesiyle oluşur. LTO döngüsünde kalkış ve tırmanış sırasında motorlar yüksek termodinamik yük altında çalışır; bu koşullarda türbin giriş sıcaklıkları yükselir ve Zeldovich mekanizmasına göre NO_x oluşumu hızlanır (Tokuşlu, 2021). Yakıtın içeriğindeki azot ve alev cephesindeki fazla yakıt (zengin karışım) da NO_x oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle LTO fazı NO_x üretimi açısından yoğun olmakla birlikte, atmosferik ömrün kısa olması sebebiyle etkisi lokal düzeyde kalır.

Zararları:

- Troposferde ozon (O₃) üretimini artırarak güçlü bir sera etkisi oluşturur.
- Solunum yolu hastalıklarını tetikleyen ozon ve smog (dumanlı sis) oluşumunu hızlandırır.
- Asit yağmurlarına neden olabilir.
- Özellikle kalkış ve tırmanış sırasında şehir merkezlerine yakın alanlarda yerel hava kalitesini hızla bozabilir (Kılıç, 2023).

b) Karbon Monoksit (CO)

Eksik yanma sonucu açığa çıkan toksik bir gazdır. CO eksik yanma ürünüdür ve düşük sıcaklık–düşük türbülans koşullarında üretilir. LTO döngüsünün idle ve approach gibi düşük güç fazlarında CO emisyonu belirgindir; bunun temel nedeni düşük yanma verimidir (Lin v.d., 2025). CO'nun çevresel etkisi daha çok yerel hava kalitesi ile ilişkilidir.

Zararları:

- Kandaki hemoglobinle bağlanarak oksijen taşınmasını engeller.
- Havalimanı ve çevresindekiler için ciddi zehirlenme riski oluşturur.
- Düşük irtifada hızla birikerek yerel hava kalitesini bozar (Kılıç, 2023).

c) Hidrokarbonlar (HC)

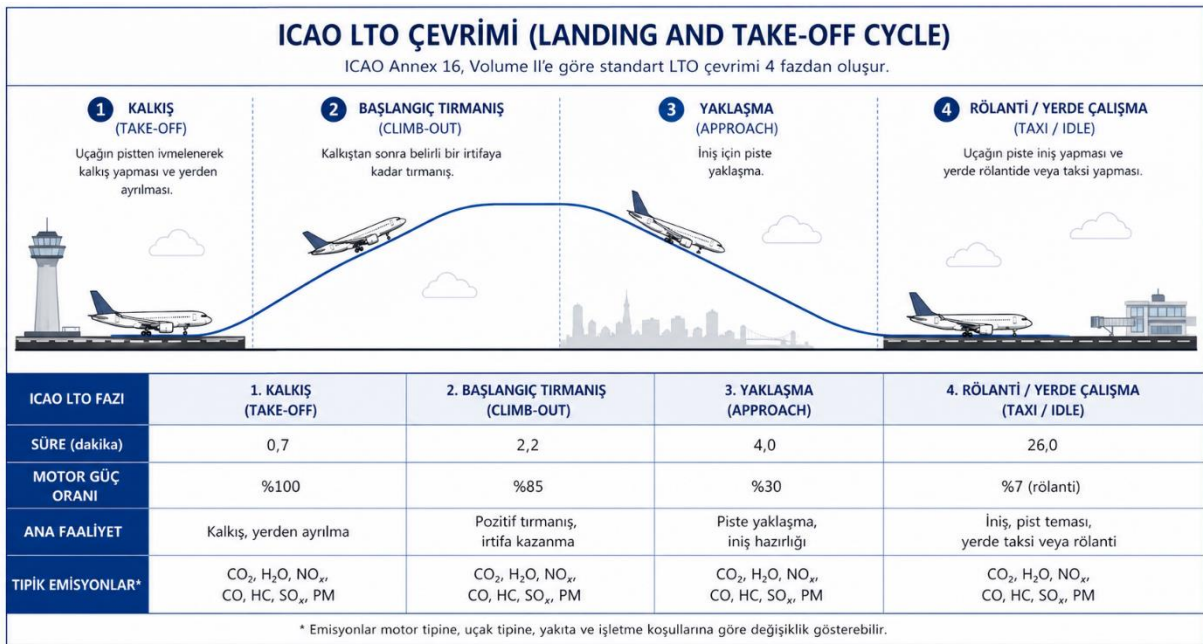
Yanmanın tam gerçekleşmediği durumlarda atmosfere geçer. HC de CO gibi eksik yanma sonucunda ortaya çıkar. LTO sırasında düşük güçte çalışan motorlarda HC emisyonunun arttığı çeşitli çalışmalar tarafından doğrulanmıştır (Lin v.d., 2025). Bu bileşikler volatil organik bileşikler (VOC) olarak yer seviyesinde ozon oluşumuna katkı sağlayabilir.

Zararları:

- Foto-kimyasal sis (smog) oluşumuna neden olur.
- Yer seviyesi ozonunu artırarak astım ve bronşit gibi rahatsızlıkları artırır (Kılıç, 2023).

1.4. LTO Uçuş Fazlarında Emisyon

LTO (Landing and Take-Off) fazları, uçakların iniş ve kalkış döngüsü içindeki belirli operasyonel modları ifade eder. LTO döngüsünde motorun farklı güç ayarlarında çalışması, yanma sıcaklığı, hava–yakıt oranı ve yanma verimi gibi parametreleri değiştirerek emisyon türleri üzerinde belirgin etkiler oluşturur. Bu nedenle, LTO fazları boyunca emisyonların nasıl değiştiğinin anlaşılması hem çevresel düzenlemeler hem de motor teknolojilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu fazlar, uçak motorlarının farklı güç seviyelerinde çalışması nedeniyle emisyon profillerinde belirgin değişikliklere neden olur. Genellikle uluslararası sivil havacılık otoriteleri (ICAO gibi) tarafından tanımlanan LTO döngüsü dört ana fazdan oluşur. ICAO Annex 16 Volume II ve ICAO Engine Emissions Databank’a (EEDB) göre LTO döngüsü, yer seviyesinden 3000 ft AGL (Above Ground Level)’ye kadar olan bölgedeki dört motor çalışma aşamasını içerir. Şekil 2 de bu uçuş fazları verilmiştir.



Şekil 2. Uçuş Fazları (Ekici v.d., 2023)

Tablo 1 de uçuş fazlarına göre motor güçleri ve süreleri verilmiştir.

Tablo 1. ICAO-EEDB LTO Güç ve Süre Değerleri (EASA, 2026)

Faz	Motor Yüğü (Yaklaşık)	Süre (ICAO standardı)	Tipik Kullanım
Take-off	% 100 (Max Thrust)	0,7 dakika	Kalkış ivmesi
Climb-out	% 85	2,2 dakika	3000 ft'e kadar tırmanış
Approach	% 30	4,0 dakika	İniş yaklaşması
Taxi/Idle	% 7	26 dakika	Taksi ve yerde çalışma

Bu fazlara bağılı olarak, kompresör basınç oranı, hava-yakıt karışım oranı, yanma sıcaklığı, yanma verimi gibi parametreler değışir dolayısıyla NO_x, CO ve HC gibi emisyonlar fazlar arasında önemli ölçüde farklılaşırlar. Bu çalışmada havalimanı çevresini en çok kirleten kalkış ve yaklaşma aşamaları incelenecektir.

- a) Kalkış (Take-Off):** Bu fazda motorlar tam güce yakın çalışır ve uçağın yerden havalanmasını sağlar. Bu, en yüksek yakıt tüketimi ve dolayısıyla en yüksek emisyonların (özellikle NO_x ve CO₂) salındığı fazdır. Motorlar maksimum itme kuvveti için tasarlandığından, bu güç seviyesinde yanma sıcaklıkları ve basınçları en yüksek seviyededir. Bu motor çalışma ortamında NO_x çok yüksek, CO ve HC düşüktür. Kalkış fazında NO_x'in toplam LTO emisyonlarının %40'ına kadar çıkabildiğı gösterilmiştir (Kilic, 2023).
- b) Yaklaşma (Approach):** Uçağın havalimanına yaklaşma fazıdır. Motor gücü, iniş için gereken itiş sağlamak üzere daha düşük seviyelerde çalışır. Bu fazda yakıt tüketimi ve emisyonlar tırmanış fazına göre daha da azalır. Düşük güç seviyelerinde yanma verimi düştüğünden, özellikle CO (karbonmonoksit) ve HC (hidrokarbonlar) emisyonları, NO_x emisyonlarına kıyasla nispeten artış gösterebilir. Bu fazda NO_x salınımı azalırken CO ve HC seviyeleri yükselir. Düşük güçte hava yakıt/karışım kalitesi düşer (enjektörler yakıtı etkili bir şekilde atomize edemezler, kompresörden yanma odasına giren havanın basıncı dolayısıyla swirl vane'lerden geçen havanın miktarı ve türbülans seviyesi düşer – hava ve yakıt düzgün bir şekilde karışmaz) ve sonuç olarak yanma sıcaklığı düşer. Ayrıca, yanma kararsızlıkları da oluşabilir. Bu nedenle tam yanma gerçekleşmez ve eksik yanma ürünleri olan CO ve HC artar. Düşük yüklerde yanma verimsizliği nedeniyle CO ve HC emisyonlarının belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir (Kilic, 2023).

Uçak motoru emisyonlarının LTO (Landing–Take-Off) döngüsü boyunca gösterdiği değişim, motor yükü, yanma sıcaklığı ve hava–yakıt oranındaki farklılıkların bir sonucudur. Kalkış ve tırmanış fazlarında motorun yüksek güçte çalışması, türbin giriş sıcaklığını ve kompresör basınç oranını artırarak NO_x oluşumunu maksimum seviyelere çıkarır; bu nedenle LTO döngüsündeki toplam NO_x emisyonlarının büyük bölümünün bu iki fazda gerçekleştiği literatürde açıkça belirtilmiştir (ICAO, 2026). NO_x emisyonları, motor güç oranı ve yakıt akış miktarındaki artışla birlikte belirgin şekilde artmaktadır. Bu durum, yüksek güç seviyelerinde yanma odası sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak termal NO_x oluşumunun artmasıyla açıklanmaktadır (bu güç seviyelerinde O₂ kullanılabilirliği de yüksektir) (Lefebvre ve Ballal, 2010). Buna karşılık CO ve HC emisyonlarının düşük güç oranlarında daha yüksek seviyelerde olduğu, yüksek güç koşullarında ise belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Düşük güç rejimlerinde tam yanmanın sağlanamaması ve yanma veriminin düşmesi bu eğilimin temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Düşük güç seviyelerinin hâkim olduğu yaklaşma ve taksi/approach fazlarında ise yanma sıcaklıklarının düşmesi ve karışım kalitesinin zayıflaması nedeniyle eksik yanma ürünleri olan CO ve HC emisyonları önemli ölçüde artmaktadır (Turns ve Haworth, 2021). Özellikle idle fazında düşük türbülans ve yanma verimsizliği sonucu CO ve HC'nin LTO döngüsü içindeki en yüksek seviyelerine ulaştığı rapor edilmektedir (Stettler v.d., 2011). Partikül madde (PM) emisyonları ise motor mimarisi ve güç ayarına bağlı bir davranış sergilemekte olup, yüksek güç koşullarında kurum bazlı PM oluşumu artarken, düşük güç koşullarında uçucu organik partikül bileşenlerinin yükseldiği gösterilmiştir (Lobo v.d., 2011). Bu nedenle literatür, LTO fazlarının emisyon karakteristiklerinin belirgin şekilde farklılaştığını ve havaalanı çevresel etki analizlerinde her faza özgü motor davranışlarının mutlaka dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (ICAO, 2026). Sonuç olarak; LTO döngüsü boyunca uçak motoru emisyonları, motorun güç ayarına bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Yüksek güç gerektiren kalkış ve tırmanış fazlarında NO_x oluşumu baskınken, düşük güçte gerçekleşen yaklaşma ve taksi/approach fazlarında CO, HC ve uçucu PM emisyonlarının arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar, LTO fazlarının emisyon karakteristiklerinin birbirinden keskin biçimde ayrıştığını göstermekte olup havaalanı çevresel etki modellemelerinde ve emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesinde faza özgü motor davranışlarının dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Literatür genel olarak LTO fazlarının havaalanı çevresindeki hava kalitesine etkisinin motor güç profili ile doğrudan ilişkili olduğunu ve bu nedenle emisyon kontrol politikalarının motor çalışma koşullarına göre farklılaştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. ICAO'nun tanımladığı LTO çevrimi, motor tiplerinin havaalanı çevresindeki emisyon etkilerini karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (ICAO,

2026). Uçak motor analizi, motor tipinin emisyonlar üzerindeki etkisini anlamada kritik bir araçtır. Turbojet motorlar yüksek emisyon karakteristiğine sahipken, yüksek by-pass oranlı turbofan ve turboprop motorlar daha düşük özgül emisyon değerleri sunmaktadır. Motor tasarımındaki teknolojik gelişmeler, havacılığın çevresel etkilerini azaltmada temel rol oynamakta olup, sürdürülebilir havacılık yakıtları ve yeni yanma teknolojileri bu süreci desteklemektedir.

1.5. Emisyon Salınımına Etki Eden Parametreler

Havacılık kaynaklı emisyonlar, yalnızca motor teknolojisine bağlı olmayıp; uçuşun çevresel ve operasyonel koşulları tarafından da güçlü biçimde belirlenmektedir. Literatürde özellikle atmosferik sıcaklık, uçuş hızı, uçak ağırlığı (kütle) ve irtifa, gaz türbinli motorların yanma karakteristiklerini, özgül yakıt tüketimini ve oluşan kirletici türlerini ve miktarlarını belirleyen temel parametreler olarak tanımlanmaktadır. Bu parametreler, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkilere sahiptir (IPCC, 2021).

a) Motor Tasarım Parametrelerinin Emisyonlara Etkisi

Motor tipinden bağımsız olarak, belirli tasarım parametreleri emisyonları doğrudan etkiler. By-pass oranının artması, CO₂, H₂O ve yakıt tüketimini azaltır. Yanma odası tasarımında lean-burn (yavan yanma) yanma odaları NO_x'i azaltır. Basınç oranı belirlenmesinde yüksek basınç oranı verimi artırırken NO_x oluşumunu yükseltebilir. Bu nedenle modern motor tasarımlarında performans-emisyon dengesi temel tasarım kriteri olarak ele alınmaktadır (Rolls-Roys, 1986).

b) Sıcaklığın Uçak Emisyonlarına Etkisi

Atmosferik sıcaklık, motor performansı ve emisyonlar üzerinde doğrudan etkilidir. Sıcaklık arttıkça hava yoğunluğu azalır, bu da motorların aynı itkiyi sağlamak için daha fazla yakıt yakmasına neden olur. Yüksek sıcaklık aynı zamanda yanma odası sıcaklığını artırabilir, bu da NO_x emisyonlarının artmasına yol açar (termal NO_x mekanizması). Düşük sıcaklıklarda ise eksik yanma ürünleri (CO, HC) artabilir, çünkü yakıt-hava karışımı tam yanmayabilir. Yüksek sıcaklığın NO_x üretimini pozitif yönde etkilediği ve CO/HC emisyonlarının düşük sıcaklıklarda artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Atmosferik sıcaklık, motor girişindeki hava yoğunluğunu ve yanma odasındaki alev sıcaklığını doğrudan etkiler. Bu durum, özellikle kalkış ve tırmanma fazlarında CO₂ emisyonlarının artmasıyla sonuçlanır (Lefebvre ve Ballal, 2010).

Sıcaklığın emisyonlar üzerindeki en kritik etkisi NO_x oluşumu üzerindedir. Yanma odasındaki yüksek sıcaklıklar, termal NO_x mekanizmasını (Zeldovich mekanizması) hızlandırarak NO ve NO_2 emisyonlarını artırır. Bu nedenle sıcak iklim koşullarında ve yüksek itki ayarlarında NO_x emisyonlarının belirgin biçimde yükseldiği birçok çalışmada rapor edilmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda ise yanma veriminin azalmasına bağlı olarak CO ve HC emisyonlarında artış gözlemlenebilir. Bu etki özellikle taksi ve rölanti gibi düşük güç ayarlarında baskındır (Turns ve Haworth, 2021).

c) Uçuş Hızının Emisyonlara Etkisi

Uçuş hızı, motorun itki gereksinimini belirleyen temel parametrelerden biridir. Artan hız, sürüklenme kuvvetini artırmakta ve motorun daha yüksek itki üretmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durum, yakıt debisinin yükselmesine ve dolayısıyla CO_2 emisyonlarının artmasına yol açmaktadır (Mattingly v.d., 2002). Özellikle yüksek Mach sayılarında (cismin hızı/ortamda sesin yayılma hızı) yanma sıcaklığı artar, NO_x oluşumu hızlanır, partikül madde (PM) emisyonları yükselir. Bu nedenle kalkış, hızlanma ve tırmanma fazları, birim zaman başına emisyon yoğunluğunun en yüksek olduğu uçuş bölümleri olarak tanımlanmaktadır (EASA, 2022). Düz uçuş fazında hız genellikle yakıt verimliliği açısından optimize edilse de uzun süreli uçuş nedeniyle toplam salınan emisyon miktarı önemli düzeylere ulaşabilmektedir (Lee v.d., 2021).

d) Uçak Ağırlığının (Kütlenin) Emisyonlara Etkisi

Uçak ağırlığı, emisyonlar üzerinde en doğrudan etkiye sahip operasyonel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Daha ağır uçaklar (uçanın ağırlığına eşit veya daha fazla bir taşıma kuvvetinin kanatlarda oluşması ileri yönlü hareketle mümkün olduğundan):

- Daha yüksek kalkış itkisinin kullanılması,
- Daha uzun tırmanma süreleri,
- Daha fazla yakıt tüketimi gerektirmektedir.

Bu durum, özellikle kalkış ve tırmanma fazlarında CO_2 ve NO_x emisyonlarının belirgin biçimde artmasına neden olmaktadır (IPCC, 2021). Ağırlığın artması aynı zamanda uçağın optimum irtifaya ulaşmasını geciktirir ve düz uçuş fazında motorun daha yüksek güç ayarlarında çalışmasına yol açar. Literatürde, uçak ağırlığındaki her artışın özgül yakıt tüketimini ve buna bağlı emisyonları doğrusal veya doğrusal olmayan biçimde artırdığı gösterilmiştir (Lee v.d., 2009). Bu nedenle yük optimizasyonu, yakıt planlaması ve hafifletilmiş yapısal tasarımlar, emisyon azaltım stratejilerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır.

e) İrtifanın Uçak Emisyonlarına Etkisi

İrtifa hem motor performansını hem de emisyonların atmosferdeki çevresel etkisini belirleyen kritik bir parametredir. Yüksek irtifalarda:

- Hava yoğunluğu azalır,
- Motor daha düşük yakıt akışıyla çalışır,
- Yanma verimi iyileştiğinden CO ve HC emisyonları azalır.

Buna karşın, motor bazında NO_x emisyonları artış gösterebilir. Ancak irtifanın en önemli etkisi, salınan emisyonların iklim üzerindeki etkisinin artmasıdır. Üst troposfer ve alt stratosferde salınan NO_x:

- Ozon oluşumunu artırır,
- Metan ömrünü azaltır,
- Net pozitif iklim zorlaması oluşturur (IPCC, 2021; Lee v.d., 2009).

Literatür bulguları, uçak emisyonlarının yalnızca motor teknolojisine değil; sıcaklık, hız, ağırlık ve irtifa gibi operasyonel parametrelerin bütüncül etkileşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, yakıt tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle güncel akademik çalışmalarda, uçuş profili optimizasyonu, ağırlık azaltımı, operasyonel iyileştirmeler ve alternatif yakıt kullanımını emisyon azaltım stratejilerinin temel unsurları olarak ele alınmaktadır.

f) Havalimanı Altyapı Özelliklerinin Etkisi

Havalimanı altyapı özellikleri, uçak emisyonları üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Pist tasarımı ve uzunluğu, taksi yolu planlaması, apron düzeni, kapasite ve trafik yönetimi gibi fiziksel ve operasyonel unsurlar, uçakların motor çalışma sürelerini belirleyerek hem motor performansını hem de kirletici salınımlarını etkiler. Bu bağlamda havalimanı altyapısının optimize edilmesi, sadece emisyonların azaltılması açısından değil, aynı zamanda yerel hava kalitesi ve operasyonel verimlilik açısından da kritik önem taşımaktadır. Özellikle aşağıdaki unsurlar etkilidir: Pist Yapısı ve Kapasite, Havalimanı Trafik Yoğunluğu, Yer Hizmetleri ve Taksi Yönetimi, Havalimanı Yükseklik ve İklimi, Havalimanı Rakımının (Yüksekliğinin) Etkisi, Kalkış Performansı, İklim Koşullarının Etkisi, Nem, Rüzgâr ve Diğer Meteorolojik Etkiler (EUROCONTROL, 2021).

1.6. Uçuş Mesafeleri Bilgisi

a) Kısa Mesafe Uçuşlar

Kısa mesafe operasyonlarında: LTO döngüsü toplam emisyonun büyük kısmını oluşturur. LTO birçok düşük irtifa-yüksek güç-düşük verim rejimini içerdiğinden bu fazda CO, HC ve CO₂ salınımları yüksektir. Kısa mesafeli uçuşlarda düz uçuş süresi kısa olduğundan düz uçuş emisyonlarının toplam içindeki payı sınırlıdır. Bu nedenle kısa mesafe uçuşlarda birim mesafe başına emisyonlar (g/km) genellikle daha yüksektir ve özellikle CO ve HC gibi düşük güçte yanma ürünleri belirginleşir (EASA, 2022).

b) Orta ve Uzun Mesafe Uçuşlar

Orta ve uzun mesafe uçuşlarında düz uçuş fazı toplam uçuşun daha büyük bölümünü oluşturur. Düz uçuş fazında motor, termodinamik olarak daha verimli çalıştığı için CO ve HC azalır, ancak CO₂ ve su buharı büyük miktarda oluşur. Yüksek irtifada NO_x'in iklim üzerindeki etkisi yer seviyesinden daha güçlüdür (IPCC, 2021). Kısa ve orta mesafeli uçuşların toplam operasyonlar içerisindeki yüksek payı, uçakların seyir fazında daha kısa süre kalmasına karşın, yüksek güç gerektiren kalkış ve tırmanış fazlarının sık tekrarlanması anlamına gelmektedir. Literatürde bu tür operasyonel profillerin, özellikle NO_x emisyonlarının toplam emisyon içindeki payını artırdığı, CO ve HC emisyonlarının ise düşük motor güç rejimlerinin yoğun olduğu taksi ve rölanti safhalarında öne çıktığı belirtilmektedir (Lee v.d., 2010).

Tablo 2 de tüm uçuş mesafelerinin bilgisi verilmiştir.

Tablo 2. Uçuş Mesafeleri (CND/CODA, 2011)

Rota Türü	Tanım	Km Aralığı
Kısa Mesafe (Short-haul)	1500 km'den kısa tüm uçuşlar	0 – 1500 km
Orta Mesafe (Medium-haul)	1500–4000 km arasındaki uçuşlar	1500 – 4000 km
Uzun Mesafe (Long-haul)	4000 km'den uzun uçuşlar	4000 km üzeri
Mixed SH–MH	Hem kısa hem orta menzilli hatlarda görev yapan uçaklar	0 – 4000 km
Mixed MH–LH	Hem orta hem uzun menzilli hatlarda görev yapan uçaklar	1500 km – 4000+ km

Mixed SH–LH	Hem kısa hem uzun menzilli hatlarda görev yapan uçaklar	0–1500 km ve 4000+ km
Mixed SH–MH–LH	Kısa, orta ve uzun menzil uçuşlarının hepsinde görev yapan uçaklar	Tüm aralıklar (0–1500 / 1500–4000 / 4000+ km)

Tablo 2. (Devamı)

1.7. Havalimanları Bilgisi

a) Ankara Esenboğa Uluslararası Havalimanı (ESB/LTAC)

Ankara Esenboğa Havalimanı, Türkiye'nin başkenti Ankara'ya hizmet veren ve hem iç hem de dış hat uçuşlarını kapsayan önemli bir uluslararası havalimanıdır. Havalimanı, yolcu ve uçak trafiği açısından ülke genelinde stratejik bir konuma sahiptir. Havalimanı terminali, 2006 yılında hizmete giren İç ve Dış Hatlar Terminali ile yaklaşık 182.000 m² büyüklüğünde bir alan üzerine kurulmuştur. Terminalin yıllık yolcu kapasitesi yaklaşık 10 milyon olarak belirtilmektedir. Günlük operasyonel veriler incelendiğinde, Esenboğa Havalimanı'nda günde ortalama 175 uçak iniş-kalkışı gerçekleşmekte ve yaklaşık 21.000 yolcuya hizmet verilmektedir. Bu değerler, havalimanının orta–yüksek yoğunlukta bir trafik yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Ankara Esenboğa Havalimanı'nda toplam dört adet apron bulunmakta olup bu apronlar, terminale bitişik köprülü park alanları ile terminalden bağımsız açık park alanlarından oluşmaktadır. Köprülü park alanları yolcu konforu ve operasyonel verimlilik sağlarken, açık park alanları yoğun saatlerde kapasite artışı ve operasyonel esneklik sunmaktadır (Gedik v.d., 2013).

Ankara Esenboğa Havalimanı; çoklu apron yapısı, yüksek günlük uçuş sayısı, köprülü park alanlarının ağırlıklı kullanımı ve yoğun iç hat trafiği ile Türkiye'deki büyük ölçekli havalimanları arasında yer almaktadır. Bu özellikler, havalimanını hem operasyonel optimizasyon hem de emisyon, yakıt tüketimi ve çevresel etki analizleri açısından önemli bir çalışma alanı hâline getirmektedir (Gedik v.d., 2013). Şekil 3 de Ankara Esenboğa Havalimanı görülmektedir.



Şekil 3. Ankara Esenboğa Uluslararası Havalimanı

Ankara Esenboğa Uluslararası Havalimanı, Türkiye'nin başkenti Ankara'nın yaklaşık 28 km kuzeydoğusunda yer alan önemli bir sivil ve ticari havalimanıdır. Başkent'in ana havacılık altyapısı olarak iç ve dış hat uçuşlarına hizmet vermektedir (Skybrary, 2026b).

- **IATA Kodu:** ESB
- **ICAO Kodu:** LTAC
- **Açılış:** 1955
- **İşletici / Sahibi:** TAV Airports Holding (Devlet Hava Meydanları İşletmesi yetkiyle)

Esenboğa Havalimanı'nın deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 953 metre (3125 ft) olup, bu yükseklik Türkiye ortalamasına göre yüksektir. Yüksek rakım, uçak performansı ve motor çalışma rejimleri üzerindeki etki açısından önemli bir parametredir. Havalimanında iki adet paralel pist bulunmaktadır. Bu pistler, geniş gövdeli ve dar gövdeli ticari uçakların operasyonunu destekler ve yüksek trafik hacimlerini karşılayacak kapasitededir. Tablo 3 de pist bilgileri görülmektedir.

Tablo 3. Esenboğa Havalimanı Pist Bilgileri (Skybrary, 2026b).

Pist Kodu Boyut (m) Yüzey

03R/21L 3750 × 60 Asfalt

03L/21R 3750 × 45 Asfalt

Esenboğa Havalimanı çevresi orta kara iklimi (continental / Csa tipi) etkisi altındadır. Yazlar sıcak ve kurak; kışlar soğuk ve zaman zaman karlı geçmektedir. Ortalama sıcaklıklar yaz aylarında ~30 °C'ye kadar ulaşabilir. Kış aylarında ılımlı düşük sıcaklıklar gözlenir (0–10 °C civarında). Bu değişken iklim koşulları, uçuş planlaması ve motor envanteri üzerinde performans ve emisyon açısından etkilidir (hava yoğunluğu, kalkış gücü gereksinimi vs.) (Skybrary, 2026b).

Esenboğa, Türkiye'nin iç hat ve dış hat bağlantılarını güçlü tutan bir merkez olarak yaklaşık 88 direkt destinasyon ile hizmet vermektedir. Havalimanı aynı zamanda AJet ve diğer büyük havayolu operatörleri için ana merkezlerden biridir (Airport Information, 2026a).

Esenboğa Havalimanı'nın rakımı, iklimi ve altyapısı hem uçak performansı hem de emisyon profili açısından değerlendirilebilir. Yüksek rakım, sıcaklık ve operasyon yoğunluğu motor yakıt tüketimi ve NO_x/CO₂ gibi emisyonlar üzerinde potansiyel etki yaratır (özellikle kalkış ve tırmanma fazlarında). Bu nedenle havalimanı özelliklerinin çevresel değerlendirme modellerinde dikkate alınması gerekmektedir. Esenboğa Havalimanı'nın yaklaşık 950 m rakıma sahip olması, motorların kalkış esnasında daha yüksek itki üretmesini gerektirmekte; bu durum yakıt tüketimini ve buna bağlı olarak NO_x emisyonlarını artırıcı bir etki oluşturmaktadır. Yüksek irtifalı havalimanlarında daha düşük hava yoğunluğu nedeniyle motor performansının düşmesi (deniz seviyesindeki bir piste göre eşit miktarda thrust üretimi için daha fazla yakıt tüketimi, eşit miktarda taşıma kuvveti elde edip kalkış yapabilmek için daha fazla pist kullanımı), literatürde iyi bilinen bir emisyon artırıcı faktör olarak tanımlanmaktadır (ICAO, 2020).

2025 yılı DHMİ iç hat istatistikleri değerlendirildiğinde, Ankara Esenboğa Havalimanı'nın ticari hava taşımacılığı açısından yüksek iç hat ağırlıklı bir operasyon yapısına sahip olduğu görülmektedir. İç hat yolcu sayısının toplam yolcu trafiği içerisindeki baskın payı, Esenboğa'nın Türkiye içi hava ulaşımında bölgesel ve ulusal bir merkez (hub) rolü üstlendiğini göstermektedir (DHMİ, 2026). 2025 yılında Esenboğa Havalimanı'ndaki iç hat uçuşlarının büyük bölümü ticari tarifeli seferlerden oluşmaktadır. Bu uçuşlar ağırlıklı olarak dar gövdeli jet uçakları (A320, B737 ailesi), ile gerçekleştirilmektedir. İç hat ticari uçuş sayısının yüksek olması, Esenboğa'da kalkış–iniş döngülerinin (LTO çevrimi) toplam operasyonlar içinde önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, havalimanının çevresel etkileri ve emisyon profili açısından özellikle önemlidir; çünkü kısa ve orta mesafeli uçuşlarda toplam

yakıt tüketiminin ve emisyonların büyük bir bölümü LTO fazında gerçekleşmektedir (DHMİ, 2026).

2025 yılı iç hat yolcu verileri, Esenboğa Havalimanı'nda milyonlar seviyesinde iç hat yolcusunun taşındığını ve günlük yolcu yoğunluğunun yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. İç hat yolcu talebinin yüksek olması, uçuş başına taşınan yolcu sayısının da ticari uçak kapasitesine yakın değerlerde seyrettiğini göstermektedir.

İç hat uçuşları için yapılan hesaplamalar ve DHMİ eğilimleri dikkate alındığında:

- Uçak başına ortalama yolcu sayısının yaklaşık 160-180 yolcu/uçuş aralığında olduğu,
- Bu değerlerin dar gövdeli ticari uçakların tipik doluluk oranlarıyla uyumlu olduğu söylenebilir.

Bu durum, Esenboğa'da iç hat uçuşlarının büyük ölçüde yüksek koltuk doluluk oranlarıyla gerçekleştirildiğini ve yolcu talebinin operasyonel kapasiteyi etkin şekilde kullandığını göstermektedir.

İç hat ticari uçuşların ve yolcu trafiğinin yoğunluğu, Esenboğa Havalimanı'nda:

- Günlük çok sayıda kalkış ve iniş,
- Kısa bekleme sürelerine rağmen yüksek taksi trafiği,
- Yerde motor çalıştırma sürelerinin toplam emisyonlar üzerindeki etkisinin artması gibi sonuçlar doğurmaktadır.

Özellikle iç hat uçuşlarının kısa menzilli olması nedeniyle, uçak başına düşen CO₂ emisyonu nispeten düşük, ancak uçuş sayısının fazla olması nedeniyle toplam emisyon miktarı yüksek olabilmektedir. Bu durum, Esenboğa Havalimanı için emisyon analizlerinde uçuş sayısı ve frekansın, tekil uçuş mesafesinden daha belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir (DHMİ, 2026).

Genel Değerlendirme

Sonuç olarak, 2025 yılı iç hat verilerine göre Ankara Esenboğa Havalimanı:

- Ticari uçak trafiği açısından yüksek frekanslı iç hat operasyonlarına sahiptir,
- Uçak başına taşınan yolcu sayısı bakımından verimli bir doluluk oranı sergilemektedir,
- İç hat ağırlıklı yapısı nedeniyle emisyonların büyük bölümü LTO çevrimi ve yer operasyonları kaynaklıdır.

Bu özellikler, Esenboğa Havalimanı'nı iç hat emisyonlarının azaltılmasına yönelik operasyonel iyileştirmeler (tek motorlu taksi, apron optimizasyonu, zamanında kalkış uygulamaları vb.) açısından öncelikli bir çalışma alanı haline getirmektedir.

Ankara Esenboğa Havalimanı (ESB) ve Emisyon İlişkisi

Ankara Esenboğa Havalimanı, Türkiye'nin başkentinde yer alan ve iç hat ağırlıklı, orta–yüksek yoğunluklu bir havalimanı olarak uçak kaynaklı emisyonların önemli olduğu merkezlerden biridir. Havalimanı kaynaklı emisyonlar esas olarak LTO (Landing and Take-Off) döngüsü sırasında oluşmakta olup, bu emisyonların büyüklüğü uçuş sıklığı ve operasyonel özelliklere bağlıdır. Esenboğa Havalimanı'nın yüksek rakımı (~950 m), motor performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yüksek rakımda hava yoğunluğunun azalması, kalkış sırasında motorların daha yüksek güç oranlarında çalışmasına neden olmakta; bu durum özellikle NO_x emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Buna karşılık, havalimanındaki taksi sürelerinin büyük hub havalimanlarına kıyasla daha sınırlı olması, CO ve HC emisyonlarının görece düşük kalmasını sağlamaktadır. Genel olarak Esenboğa Havalimanı'nda emisyon oluşumu; yüksek rakım – motor güç ihtiyacı – NO_x ağırlıklı emisyon profili ile karakterize edilmektedir (ICAO, 2020; Skybrary, 2026b).

b) Trabzon Havalimanı (TZX / LTCH)

Trabzon Havalimanı, Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde Trabzon iline hizmet veren uluslararası havalimanıdır. 1957 yılında açılmış olup gerek iç hatlar gerekse dış hatlar uçuşlarına açıktır ve bölgenin hava ulaşım altyapısında önemli bir işlev görür (Airport Information, 2026b). Şekil 4 de Trabzon Havalimanı görülmektedir.



Şekil 4. Trabzon Havalimanı

- **IATA Kodu:** TZX
- **ICAO Kodu:** LTCG
- **Konum:** Trabzon, Türkiye
- **Statü:** Sivil, iç/dış hat operasyonları (DHMI)

Havalimanı, Karadeniz'in doğal coğrafi özellikleri nedeniyle turizm ve ekonomik bağlantı açısından bölgesel havacılığın merkezi konumundadır. Trabzon Havalimanı'nda hava trafik hizmetleri hem VFR (görerek) hem de IFR (aletli) operasyonlarla verilmektedir. Pist yapısı tek bir ana pistten oluşur. Pist 11/29: Uzunluk: 2 640 m × 45 m, Yüzey: Asfalt / beton. Bu pist uzunluğu, dar gövdeli ticari uçaklar ile orta menzil uçuşlar için yeterli olup iç ve dış hatlarda geniş bir uçuş ağını desteklemektedir. Yer seviyesine göre yaklaşık 32 m (104 ft) yükseklikte konumlanan Trabzon Havalimanı, motor performansı ve pist gereksinimleri açısından Türkiye ortalamasına yakın seviyededir (Skybrary, 2026c).

DHMI verilerine göre havalimanı terminal binası toplamda 23.745 m² büyüklükte olup, iç hat ve dış hat yolcu trafiğini karşılayacak kapasitededir. Terminalde yolcu işlemleri, bagaj hizmetleri, ticari alanlar ve bekleme salonları gibi temel hizmetler sunulmaktadır. Trabzon (TZX), Türkiye'de orta büyüklükte bir havaalanıdır. Tarifeli yolcu seferlerinde 16 havayolu şirketiyle 32 noktaya hizmet vermektedir. Bu altyapı, özellikle yüksek sezonda artan turist talebini karşılamak üzere tasarlanmıştır ve bölgedeki hizmet kalitesine olumlu katkı sağlamaktadır (Airport Information, 2026b).

2023'te Trabzon Havalimanı toplamda 3.499.592 yolcuya hizmet vermiştir (iç hatlarda ~2.668.282, dış hatlarda ~831.310). Bu rakamlar, önceki yıl ile karşılaştırıldığında hem iç hatlarda (%8) hem dış hatlarda (%18) artış göstermiştir. 2023'te toplam 26.750 uçak hareketi gerçekleştirilmiştir (iç hat ~19.015, dış hat ~7.735). 2025 Ocak–Kasım döneminde toplam yolcu ~3.632.640 olarak raporlanmıştır; iç hat ~2.808.174, dış hat ~824.466 seviyesindedir. Aynı dönemde 23.247 uçak hareketi gerçekleştirilmiştir (DHMI, 2026).

Genel Değerlendirme

Trabzon Havalimanı, Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde yer alan bölgesel bir sivil havalimanıdır. 2025 verilerine göre havalimanında 18.430 ticari iç hat uçuşu ve 3.031.199 iç hat yolcu trafiği gerçekleştirilmiştir (DHMI, 2026). Bu yoğun trafik yapısı, emisyon üretimi açısından önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

Trabzon Havalimanı ve Emisyonlar İlişkisi

Uçak motorları tarafından üretilen emisyonlar büyük ölçüde LTO döngüsü sırasında ortaya çıkar. LTO döngüsü; taksi-in/taksi-out, kalkış, tırmanış ve yaklaşma/iniş fazlarını içerir ve bu fazlarda motor farklı güç ayarlarında çalışır (ICAO, 2020). LTO döngüsünde;

- Kısa menzilli iç hat uçuşları nedeniyle kalkış ve tırmanma fazlarının toplam uçuş süresine oranı daha yüksek olur,
- Taksi ve yaklaşma fazları düşük motor güç rejimiyle gerçekleştiğinden CO ve HC emisyonları artar,
- Kalkış ve tırmanış fazları yüksek güç istendiği için NO_x ve CO₂ emisyonları baskın hale gelir.

Bu bağlamda Trabzon Havalimanı'nda günlük ortalama yaklaşık 50 ticari iç hat uçuşu olması, LTO fazı kaynaklı emisyonların yıl boyunca tekrarlanarak birikip yerel hava kalitesi ve iklim çıktıları üzerinde belirleyici bir etki yaratabileceğini göstermektedir.

2025 yılında Trabzon Havalimanı'nda uçak başına ortalama ≈165 yolcu taşınmıştır (DHMI, 2026). Bu yüksek doluluk oranı iç hat uçuşlarında operasyonel bir verimlilik gösterse de uçuş frekansının yüksekliği toplam emisyon miktarını doğrudan artırmaktadır. Özellikle kısa menzilli iç hat uçuşlarında,

- Kalkış ve tırmanma fazlarında CO₂ ve NO_x üretimi birincil kirleticiler olurken,
- Taksi ve yaklaşma fazlarında CO ve HC emisyonlarının payı artmaktadır.

Bu emisyon profili, kısa/orta mesafe iç hat operasyonlarının küresel hava taşımacılığı emisyonları içindeki rolünü açıklayan literatürle uyumludur. Kısa menzilli operasyonların LTO fazı nedeniyle birim mesafe başına emisyonlarının daha yüksek olabildiği belirtilmektedir (ICAO, 2020; IPCC, 2021). Trabzon Havalimanı'nın yaklaşık 32 m rakımda bulunması, motor performansı açısından avantaj sağlar; hava daha yoğun olduğundan motorlar daha yüksek verimle çalışabilir ve dolayısıyla aynı güç çıktısı için daha düşük yakıt tüketimi ve emisyon üretilebilir. Ancak Karadeniz bölgesine özgü meteorolojik değişkenlikler (yağışlı ve rüzgârlı hava koşulları) taksi sürelerini ve bekleme sürelerini etkileyerek yer emisyonlarını artırabilir (ICAO, 2020).

Trabzon Havalimanı'nın 2025 iç hat uçuş verilerine göre, yüksek ticari uçuş sıklığı, günlük ortalama (≈ 50) ticari uçuş ve yüksek yolcu doluluğu mevcut emisyon üretimini önemli düzeyde etkilemektedir. Bu durum, özellikle LTO döngüsü sırasında NO_x , CO_2 , CO ve HC emisyonlarının birikmesine neden olur. Bu nedenle Trabzon Havalimanı, yerel hava kalitesi değerlendirmeleri, emisyon azaltım stratejileri ve sürdürülebilir havacılık politikalarının geliştirilmesi açısından öncelikli araştırma alanlarından biri olarak ele alınmalıdır. 2025 yılında Trabzon Havalimanı'nda iç hatlarda 18.430 ticari uçuş gerçekleştirilmiş ve bu uçuşlarla 3.031.199 yolcu taşınmıştır. Günlük ortalama 50,5 ticari iç hat uçuşu ve uçuş başına yaklaşık 165 yolcu değeri, havalimanının yüksek doluluk oranına sahip yoğun bir iç hat operasyonu yürüttüğünü göstermektedir (DHMİ, 2026). Bu yapı, operasyonel verimliliği artırırken LTO fazı kaynaklı emisyonların yerel hava kalitesi üzerindeki etkisini de belirgin kılmaktadır.

1.8. Literatür Taraması

Öztürk (2011), Kayseri Erkilet Havaalanı'nda 2008–2010 yılları arasında iniş-kalkış (LTO) sürecinde uçaklardan kaynaklanan NO_x , CO ve HC emisyonlarını hesaplamayı amaçlamıştır. Çalışmada DHMİ'den temin edilen uçuş verileri ile ICAO Emisyon Veri Bankası'ndan alınan motor emisyon indeksleri ve yakıt debileri kullanılmış; ICAO'nun standart LTO faz süreleri esas alınarak yıllık emisyon envanteri oluşturulmuştur. Bulgulara göre en yüksek toplam emisyon 2010 yılında (177,94 ton/yıl), en düşük değer ise 2008 yılında (138,71 ton/yıl) gerçekleşmiştir. Emisyonların yaklaşık %70'inin iç hat uçuşlarından kaynaklandığı belirlenmiş; taksi süresindeki 4 dakikalık artışın toplam LTO emisyonlarını yaklaşık %15,3 oranında artırdığı tespit edilmiştir (Öztürk, 2011).

Yılmaz ve İlbaş (2012), gaz türbinli uçak motorlarından kaynaklanan kirletici emisyonları (NO_x , CO ve HC) ICAO Emisyon Veri Bankası verilerini kullanarak incelemiştir. Çalışmada General Electric, CFM International, Rolls-Royce, Pratt & Whitney ve IAE üretimi farklı turbofan motorlarının rölanti (%7), yaklaşma (%30), tırmanma (%85) ve kalkış (%100) güç oranlarındaki emisyon değişimleri karşılaştırılmıştır. Bulgulara göre motor gücü ve egzoz sıcaklığı arttıkça NO_x emisyonlarının arttığı; buna karşılık CO ve HC emisyonlarının düşük güç seviyelerinde daha yüksek, yüksek güç seviyelerinde ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Jet A yakıtına farklı oranlarda metil bütanol (biyodizel) ilavesinin emisyonları azalttığı ve saf biyodizelin Jet A'ya kıyasla daha düşük NO_x , CO ve HC salımı oluşturduğu tespit edilmiştir (Yılmaz ve İlbaş, 2012).

Özgünoğlu ve Uygur (2017), Kahramanmaraş Havalimanı'nda 2016 yılında uçakların LTO (Landing and Take-Off) safhasında oluşturduğu sera gazı (CO_2 , CH_4 , N_2O) ve hava kirleticileri (CO, NO_x , SO_2 , NMVOC) emisyonlarını IPCC (2006) kılavuzunda yer alan Tier 1 ve özellikle Tier 2 metodolojisine göre hesaplamıştır. Çalışmada DHMİ'den temin edilen 2015–2016 yıllarına ait LTO sayıları ve uçak tipleri kullanılmış; emisyon hesaplamaları IPCC emisyon faktörleri ve yakıt tüketim değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre 2016 yılında en fazla emisyonu Airbus A320 tipi uçak neden olmuş; bunun temel sebebinin emisyon faktöründen ziyade yüksek LTO sayısı olduğu belirlenmiştir. Emisyon türleri açısından CO_2 , NO_x , CO ve SO_2 değerlerinin CH_4 , N_2O ve NMVOC'a kıyasla daha yüksek konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir (Özgünoğlu ve Uygur, 2017).

Adolfo v.d. (2017), GE90-94B turbofan motorunun LTO (iniş–kalkış) çevrimindeki performans ve NO_x emisyonlarını ESMS modüler kodu ile termodinamik olarak modellemiştir. Önce seyir koşullarında tasarım analizi yapılmış, ardından LTO'nun dört fazı için off-design analiz gerçekleştirilerek itki, yakıt tüketimi ve temel termodinamik parametreler hesaplanmıştır. NO_x emisyonları, yanma odası giriş basıncı ve sıcaklığına dayalı korelasyon yöntemiyle tahmin edilmiş ve ICAO verileriyle karşılaştırılmıştır. Toplam LTO yakıt tüketimi 1124 kg, toplam NO_x emisyonu 30.831 g olarak bulunmuş; sonuçların ICAO ölçümleriyle %1'den küçük (NO_x) ve yaklaşık %6 (yakıt) hata ile uyumlu olduğu gösterilmiştir (Adolfo v.d., 2017).

Markowski v.d. (2017), küçük piston motorlu uçaklarda ICAO LTO prosedürlerinin uçuş safhasını kapsamadığı probleminden hareketle, uçuş boyunca egzoz emisyonlarının (CO, HC,

NO_x, CO₂) kütlesini tahmin etmeye yönelik bir matematiksel model geliştirmiştir. Model, özgül emisyon (g/kWh), maksimum efektif motor gücü, uçuş süresi, irtifa, tırmanma/alçalma hızları ve yer operasyon süresi parametrelerine dayandırılmış; uçuş fazları (tırmanış, seyir, alçalma, yer operasyonu) ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Cirrus SR20 uçağı üzerinde yapılan uçuş testleri ile model sonuçları karşılaştırılmış; model ile gerçek ölçümler arasında yaklaşık %40'a varan sapmalar tespit edilmiştir. Çalışma, küçük genel havacılık uçakları için uçuş fazını içeren bir emisyon kütle modeli önererek literatüre yönetsel katkı sunmuş, ancak modelin düzeltme katsayılarıyla iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Markowski v.d., 2017).

Markowski (2018), piston motorlu küçük uçaklarda uçuş sırasında oluşan CO, HC, NO_x ve CO₂ emisyonlarını hesaplamak için geliştirilen modeli düzeltmiş ve doğrulamıştır. Cirrus SR20 üzerinde yapılan uçuş testlerinde ilk modelde özellikle NO_x için yüksek sapmalar tespit edilmiş; bunun yakıt-hava karışım oranındaki (λ) değişimlerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Modele düzeltme katsayıları ($t\lambda$, $w\lambda$, kT) eklenmiş ve revize model ikinci uçuş verileriyle doğrulanarak ölçüm-model farkının %0,1–4,5 aralığına düşürüldüğü gösterilmiştir. Çalışma, küçük pistonlu uçaklar için uçuş koşullarını dikkate alan güvenilir bir emisyon kütle modeli önermektedir (Markowski, 2018).

Çarıkçı ve Öçal (2019), iç hat seferi yapan bir kargo uçağının emisyon maliyetlerini çevre muhasebesi perspektifiyle değerlendirmiştir. Çalışmada Isparta–İstanbul hattında tam kapasite yük taşıyan A330-200F tipi kargo uçağı örnek olay olarak ele alınmış; ICAO verileri kullanılarak uçuşa bağlı CO₂ emisyonu (35.676,6 kg) hesaplanmıştır. Emisyon maliyeti, Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi'nde 2019 yılı için belirlenen 22 €/tCO₂ bedeli esas alınarak çevresel maliyet formülüyle belirlenmiştir. Bulgulara göre tek yön uçuş için toplam çevresel maliyet 784,8852 Euro; taşınan bir ton yük başına çevresel maliyet ise 12,1725 Euro olarak hesaplanmıştır. Çalışma, havayolu kargo taşımacılığında çevre muhasebesini nicel bir hesaplama yaklaşımıyla uygulayarak literatüre yönetsel katkı sunmaktadır (Çarıkçı ve Öçal, 2019).

Nowacki ve Olejniczak (2019), LTO emisyon faktörlerini uçuş veri kaydedicisi (FDR) verileriyle birleştirerek irtifa değişiminin motor performansına etkisini içeren düzeltilmiş bir uçuş emisyon modeli geliştirmiştir. Boeing 787-9 (Trent 1000-G) için tırmanış, seyir ve yaklaşma fazları modellenmiş; irtifaya bağlı düzeltme katsayısı (0,38) uygulanmıştır. Toplam

yakıt tüketimi hesabında yaklaşık %5,6 hata elde edilmiş; HC'nin takside, NO_x ve PM'nin ise seyir fazında en yüksek olduğu gösterilmiştir (Nowacki ve Olejniczak, 2019).

Ekici ve Şöhret (2020), Isparta Süleyman Demirel Havalimanı'nda 2018 yılı ticari uçuşlarından kaynaklanan egzoz emisyonlarının çevresel etkilerini ve ekonomik maliyetini değerlendirmiştir. Çalışmada Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'ndan temin edilen gerçek zamanlı LTO (Landing and Take-Off) verileri kullanılmış; CO, CO₂, HC ve NO_x emisyonları için karbon ayak izi (CO₂e), çevresel etki (eco-indicator, mPts) ve çevresel maliyet (eco-cost, €) hesaplanmıştır. Bulgulara göre 2018 yılı toplam karbon ayak izi 5.695.140,933 kg CO₂e olarak belirlenmiş; toplam etkinin büyük kısmının NO_x (%61,82) ve CO₂ (%37,89) emisyonlarından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Aylık bazda çevresel etki ve maliyetin en yüksek olduğu dönem mart ayı olurken, yolcu başına en yüksek değerler mayıs ayında hesaplanmıştır (Ekici ve Şöhret, 2020).

Keskin ve Yalçın Erçoşkun (2021), Covid-19 pandemisinin havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar üzerindeki etkisini İzmir Adnan Menderes Havalimanı örneğinde incelemiştir. Çalışmada 05.11.2019 (pandemi öncesi) ve 05.11.2020 (pandemi sonrası) tarihlerinde gerçekleşen 24 saatlik uçuş verileri karşılaştırılmış; LTO (Landing and Take-Off) safhasında oluşan CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, CO, NMVOC ve SO₂ emisyonlarını IPCC (2006) Tier 1 ve Tier 2 metodolojileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bulgular, 2019 yılında 178 LTO gerçekleşirken 2020 yılında bu sayının 98'e düştüğünü; toplam yakıt tüketiminin 172.540 kg/LTO'dan 87.050 kg/LTO'ya gerilediğini göstermiştir. Buna paralel olarak tüm kirletici emisyonlarda belirgin azalış tespit edilmiştir. En fazla yakıt tüketimi ve emisyonu B738 uçak tipinin neden olduğu belirlenmiştir (Keskin ve Yalçın Erçoşkun, 2021).

Arter ve Arunachalam (2021), havalimanı kaynaklı uçak emisyonlarının (özellikle LTO çevrimi) hava kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiş ve kirleticilerin (NO_x, CO, PM vb.) mekânsal dağılımını modellemiştir. Çalışma, uçak operasyon yoğunluğu ile yerel kirletici konsantrasyonları arasında güçlü ilişki olduğunu göstermiş; özellikle taksi ve kalkış safhalarının yer seviyesi hava kirliliğine önemli katkı sağladığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, havalimanı çevresinde emisyon azaltım stratejilerinin gerekliliği vurgulanmıştır (Arter ve Arunachalam, 2021).

Genç (2022), Malatya Erhaç Havalimanı'nda 2016–2020 yılları arasında gerçekleşen ticari uçuşlardan kaynaklanan uçak emisyonlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) metodolojisi kapsamında Tier 2 yöntemi kullanılarak LTO (Landing and Take-Off) döngüsündeki CO₂, CO, NO_x, HC, SO_x, H₂O ve PM emisyonları hesaplanmıştır. Her yıl için uçak trafiği, yolcu sayıları, uçak tiplerine göre LTO sayıları, uçuş fazlarına göre emisyon dağılımları ve yakıt tüketimleri tablo ve grafiklerle analiz edilmiştir. Beş yıllık toplamda 66.331 ton CO₂, 288,99 ton NO_x ve 183,70 ton CO emisyonu hesaplanmıştır. Hesaplamalar yalnızca ticari uçuşların LTO safhalarını kapsamakta olup askeri uçuşlar analize dahil edilmemiştir (Genç, 2022).

Öz ve Yalçın Erçoşkun (2022), Covid-19 pandemisinin Ankara Esenboğa Havalimanı'ndaki hava trafiği ve LTO (Landing and Take-Off) safhasındaki uçak emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada DHMİ'den temin edilen 2019–2020 yıllarına ait uçuş verileri kullanılmış; emisyon hesaplamaları IPCC (2006) Tier 2 metodolojisine göre gerçekleştirilmiştir. Toplam 29 farklı uçak tipi için CO₂, NO_x, CO, CH₄, N₂O, NMVOC ve SO₂ emisyonları hesaplanmış; 2020 yılında uçuş sayısının %49,2 azalmasına paralel olarak CO₂ emisyonlarında yaklaşık %55,9 oranında düşüş tespit edilmiştir. Emisyonların büyük bölümünün B738-B739, A320 ve A321 tipi uçaklardan kaynaklandığı belirlenmiştir (Öz ve Yalçın Erçoşkun, 2022).

Lukačević v.d. (2022), Podgorica Havalimanı'nda LTO çevrimi kapsamındaki uçak emisyonlarını hesaplamak amacıyla Simulink/SimEvents tabanlı bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Modelde gerçek taksi süreleri, pist işgal süresi ve filo karışımı dikkate alınarak 15 Ağustos 2019 (pik gün) için yakıt tüketimi ve GHG emisyonları (sera gazı emisyonları) hesaplanmış; sonuçlar EUROCONTROL IMPACT modeli ile doğrulanmıştır. Bulgular, küçük havalimanlarında ICAO standart LTO taksi sürelerinin emisyonları önemli ölçüde fazla tahmin ettiğini ve gerçek operasyonel taksi sürelerinin kullanılmasının daha doğru sonuç verdiğini göstermektedir (Lukacevic v.d, 2022).

Cui v.d. (2022), COVID-19'un Güney Amerika'daki uluslararası uçuşlardan kaynaklanan CO₂, CO, HC, NO_x, SO₂ ve PM_{2.5} emisyonları üzerindeki etkisini 2019–2021 dönemi için analiz etmiştir. Çalışmada CCD (Climb-Cruise-Descent) aşaması için geliştirilen modifiye BFFM2-FOA-FPM yöntemi, LTO (Landing and Take-Off) aşaması için ise ICAO standart yöntemi kullanılmıştır. Bulgular, 2020'de rota sayısı, uçuş mesafesi ve filo yapısındaki değişimlere bağlı

olarak toplam emisyonların yaklaşık %80'e varan oranlarda azaldığını, 2021'de ise kısmi toparlanma görülmesine rağmen salgın öncesi seviyelere ulaşamadığını göstermektedir. Ayrıca CO₂'nin toplam emisyonlar içindeki baskın payını koruduğu vurgulanmıştır (Cui v.d., 2022).

Öz (2023), Covid-19 pandemisinin Türkiye'deki hava trafiği ve uçak emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, Türkiye hava trafiğinin yaklaşık %70'ini oluşturan dokuz uluslararası havalimanına ait 2019–2021 yılları verileri kullanılmıştır. Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) tarafından sağlanan iniş-kalkış istatistikleri temel alınarak, ICAO 9889 kılavuzuna göre LTO (İniş-Kalkış Döngüsü) safhasındaki CO₂, HC ve NO_x emisyonları hesaplanmıştır. Bulgular, 2020 yılında hava trafik sayılarında ve buna bağlı olarak emisyonlarda yaklaşık %50'ye varan düşüş yaşandığını, 2021 yılında ise kademeli toparlanma görüldüğünü göstermektedir. En yüksek emisyon ve yakıt tüketimi 2019 yılında gerçekleşmiş; B738-B739 uçak tiplerinin en fazla emisyonu neden olan uçaklar olduğu belirlenmiştir (Öz, 2023).

Kılıç (2023), bölgesel jet (regional jet) ve dar gövdeli yolcu uçaklarını yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada Erzincan Yıldırım Akbulut Havalimanı–Ankara Esenboğa Havalimanı (302,41 NM) hattı örnek alınmış; EUROCONTROL tarafından geliştirilen IMPACT platformu kullanılarak uçuş fazlarına (LTO ve CCD) göre yakıt tüketimi ile CO₂, H₂O, SO_x, NO_x, CO, HC ve PM_{2.5} dâhil 11 farklı emisyon türü hesaplanmıştır. Bulgulara göre dar gövdeli uçak (Turbofan 1) toplam 2.140,7 kg yakıt tüketirken, bölgesel jet (Turbofan 2) 1.686,9 kg yakıt tüketmiştir. Toplam emisyonlar sırasıyla 9.459,5 kg ve 7.446,5 kg olarak hesaplanmıştır. Yıllık trafik dikkate alındığında bölgesel jet kullanımının yaklaşık 982 ton daha az yakıt ve 4,36 kton daha az toplam emisyon ürettiği belirlenmiştir. Ayrıca NO_x emisyonları dar gövdeli uçakta 36,02 kg, bölgesel jette ise 20,03 kg olarak bulunmuştur. Çalışma, yolcu yoğunluğu düşük havalimanlarında (örneğin Erzincan) daha düşük MTOW (Maximum Take-Off Weight) ve koltuk kapasitesine sahip bölgesel jetlerin çevresel açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koyarak filo seçiminde emisyon parametrelerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Kılıç, 2023).

Inoue v.d. (2023), uçakların iniş-kalkış (LTO) çevrimi boyunca CO₂ emisyonlarını yerinde ve doğrudan görüntülemek amacıyla 4.2–4.4 µm dar bant geçişli orta dalga kızılötesi (IR) kamera kullanmıştır. Fukuoka Uluslararası Havalimanı'nda gerçekleştirilen saha çalışmasında Boeing

787, 777 ve Airbus A350 uçaklarının motor egzozları gerçek zamanlı olarak izlenmiş; yöntem, CO₂'yi su buharı ve diğer yanma ürünlerinden seçici biçimde ayırt edebilmiştir. Elde edilen yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüklü görüntüler, LTO fazlarında yoğun CO₂ akışının motorun sıcak bölümünde (core engine) oluştuğunu ve bypass akımı ile karışarak ortam havasına yayıldığını göstermiştir. Çalışma, havalimanı ölçeğinde doğrudan ve temassız CO₂ izleme tekniğinin uygulanabilirliğini ortaya koyarak çok ölçekli emisyon izleme sistemlerine yöntemsel katkı sunmaktadır (Inoue v.d., 2023).

Bajgai ve Shrestha (2023), Tribhuvan Uluslararası Havalimanı'nda (TIA) 2000–2019 dönemine ait LTO çevrimi emisyonlarını emisyon faktörü (Tier 1) yöntemiyle hesaplamış ve bu emisyonların Kathmandu Vadisi hava kalitesine etkisini WRF ve AERMOD dağılım modelleriyle değerlendirmiştir. Çalışmada NO_x, CO, HC, VOC, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} ve BC emisyonları nicel olarak belirlenmiş; toplam LTO emisyonlarının yıllar içinde artış gösterdiği ve emisyonların %79'unun iç hat uçuşlarından kaynaklandığı saptanmıştır. Modelleme sonuçları, özellikle NO_x'in baskın kirletici olduğunu ve 24 saatlik ortalama NO_x konsantrasyonunun ulusal sınır değerleri aştığını göstermiştir. Bulgular, LTO emisyonlarının Kathmandu kent hava kalitesine anlamlı düzeyde katkısı olduğunu ortaya koymaktadır (Bajgai ve Shrestha, 2023).

Öztürk ve Taştan (2024), Muğla ilinde Dalaman ve Milas-Bodrum havalimanlarında 2015–2021 yılları arasında LTO (Landing and Take-Off) döngüsü sırasında B737-800 ve A320 tipi uçaklardan kaynaklanan NO_x, CO ve HC emisyonlarını gerçek zamanlı verilerle hesaplamıştır. Çalışmada DHMİ'den temin edilen uçuş verileri ile ICAO ve Motor Emisyon Veri Bankası'ndan alınan yakıt debileri ve emisyon indeksleri kullanılmış; hesaplamalar IPCC Tier 2 metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Bulgular, NO_x emisyonlarının en çok tırmanış fazında, CO ve HC emisyonlarının ise ağırlıklı olarak taksi fazında yoğunlaştığını göstermiştir. Her iki havalimanında da en yüksek toplam emisyon değerleri 2019 yılında, en düşük değerler ise pandemi etkisiyle 2020 yılında gerçekleşmiştir (Öztürk ve Taştan, 2024).

Timuralp ve Mercan (2024), Eskişehir Hasan Polatkan Havalimanı'nda 2023 yılı uçuş verilerine dayanarak uçaklardan kaynaklanan karbon ayak izini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada IPCC tarafından önerilen Tier 1 ve özellikle Tier 2 metodolojisi kullanılarak LTO (Landing and Take-Off) ve seyir safhalarındaki CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Analizlerde 51 farklı uçak tipine ait toplam 5.725 uçuş verisi değerlendirilmiştir. Bulgulara göre 2023 yılı

toplam CO₂ emisyonu 6.893,160 kg olarak hesaplanmış; en yüksek emisyonun uçuş sayısına bağlı olarak C172, TB20 ve B738 uçak tiplerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Özellikle eğitim uçuşlarının yoğunluğu, toplam emisyon dağılımında belirleyici olmuştur (Timuralp ve Mercan, 2024).

Abrantes v.d. (2024), devrimsel uçak tasarımlarının küresel havacılık CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini filo düzeyinde değerlendirmek amacıyla Fleet System Dynamics Model (FSDM) kullanarak 2050 perspektifli senaryo analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada Blended Wing Body, Strut-Braced Wing, Double-Bubble gövde, Open Rotor ve elektrikli/hibrit uçak konseptleri farklı giriş tarihi (EIS) ve üretim kapasitesi varsayımları altında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yalnızca teknolojik gelişmelerle karbon-nötr büyümenin sağlanamadığını; ancak radikal motor tasarımları (özellikle open rotor) ve elektrikli tahrik senaryolarında 2050 yılına kadar filo düzeyinde yaklaşık %18–20 emisyon azaltım potansiyeli bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca üretim kapasitesindeki %15 artışın ek %1–2,6 emisyon azaltımı sağlayabildiği belirlenmiştir. Çalışma, emisyon azaltımında en kritik parametrelerin teknoloji giriş yılı, üretim kapasitesi ve uçak taşıma kapasitesi olduğunu ortaya koyarak, 2050 hedefleri için yalnızca evrimsel değil, yapısal dönüşüm gerektiren çözümlere ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır (Abrantes v.d., 2024).

Baumeister v.d. (2024), Avrupa merkezli bir iş jet operatörüne ait 2021 yılı verilerini (1.076 uçuş) kullanarak Cessna 525 ve 560XL uçaklarının tamamen elektrikli Eviation Alice ile değiştirilmesi durumundaki emisyon azaltım potansiyelini incelemiştir. 400–1.000 km menzil senaryolarında yapılan analizde, IPCC GWP100 katsayıları ve ülke elektrik karbon yoğunluğu esas alınmıştır. Bulgular, 1.000 km'ye kadar tüm uçuşların elektrikli uçakla yapılması halinde yıllık emisyonların yaklaşık %93 oranında azalabileceğini göstermektedir. Ancak daha düşük seyir hızı nedeniyle uçuş sürelerinde 10–41 dakikalık artış tespit edilmiştir. Çalışma, kısa-orta menzilli iş havacılığında elektrikli uçakların yüksek karbonsuzlaşma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Baumeister v.d., 2024).

Ayvaz (2025), çalışmasında çevre vergileri, hava taşımacılığı, fosil yakıt tüketimi, turizm ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi 1995–2021 döneminde 25 Avrupa ülkesi için analiz etmiştir. Araştırmada değişkenler arasındaki dinamik ve karşılıklı etkileşimleri incelemek amacıyla Panel Vektör Otoregresyon (PVAR) yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, mevcut çevre vergilerinin CO₂ emisyonlarını azaltmada yeterince etkili olmadığını

göstermektedir. Ayrıca fosil yakıt tüketimi, turizm ve hava taşımacılığının CO₂ emisyonlarını artırıcı yönde etkilediği tespit edilmiştir. Granger nedensellik analizleri ise CO₂ emisyonları ile çevre vergileri ve hava taşımacılığı arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunduğunu ortaya koymaktadır (Ayvaz, 2025).

Göçmen (2025), havalimanı karbon emisyonlarının yalnızca uçuş operasyonlarından değil, yolcu erişiminde kullanılan ulaşım modlarından da kaynaklandığını vurgulayarak Amsterdam Schiphol Havalimanı örneğinde kara tarafı (landside) yolcu taşımacılığının karbon emisyonlarına etkisini analiz etmiştir. Çalışmada ikincil veri analizi yöntemi kullanılmış; yolcu erişim modlarının oranları, ortalama mesafeler ve kişi-km başına emisyon faktörleri dikkate alınarak toplam erişim kaynaklı CO₂ emisyonu hesaplanmıştır. 2024 yılı verilerine göre havalimanına erişimden kaynaklı yaklaşık 206 bin ton CO₂ emisyonu oluştuğu; özel araç kullanımının yolcu payı daha düşük olmasına rağmen toplam emisyonların yaklaşık %71'ini oluşturduğu belirlenmiştir. Buna karşılık yolcuların yaklaşık %50'sini taşıyan elektrikli trenlerin toplam emisyon içindeki payının %11 seviyesinde kaldığı tespit edilmiştir (Göçmen, 2025).

Karaman (2025), sivil havacılık sektöründe emisyon hesaplama yöntemlerini Trabzon, Rize-Artvin ve Ordu-Giresun havalimanları örneğinde incelemiştir. Çalışmada 2019–2023 yılları arasındaki iç hat ticari uçuş verileri (DHMİ) kullanılmış; en sık kullanılan uçak tipleri (B737-800, A321, A320) için LTO (Landing and Take-Off) döngüsüne bağlı emisyonlar IPCC Tier 2 metoduna göre hesaplanmıştır. CO₂ başta olmak üzere NO_x, CO, CH₄, N₂O, NMVOC ve SO₂ emisyonları ICAO/IPCC emisyon faktörleri kullanılarak belirlenmiş; özellikle pandemi döneminde (2020–2021) uçuş sayılarındaki düşüşe paralel olarak emisyonlarda azalma, 2023 yılında ise yeniden artış eğilimi tespit edilmiştir. Bulgular, LTO sayılarının emisyon değerlerini doğrudan etkilediğini ve en yüksek payın CO₂ kaynaklı olduğunu göstermektedir (Karaman, 2025).

Çil ve Tangöz (2025), Airbus A320 ve Boeing 737 uçaklarında kullanılan sekiz farklı turbofan motor tipinin (V2500-A1, CFM56 serisi, LEAP-1A24, LEAP-1B23, PW1133G-JM, JT8D-7) LTO (Landing and Take-Off) döngüsündeki emisyon ve yakıt performanslarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Çalışmada ICAO Motor Emisyon Veri Bankası verileri kullanılmış; kalkış, tırmanış, yaklaşma ve taksi modları için HC, CO ve NO_x emisyonları ile yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Analizler ICAO'nun standart LTO süreleri (toplam 32,9 dakika) esas alınarak

gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre toplam LTO emisyonlarının yaklaşık %70–90'ı taksi modunda üretilmektedir. Taksi süresinin 8 dakika azaltılması, toplam LTO emisyonlarında ortalama %23'e, yakıt tüketiminde ise yaklaşık %13'e varan azalış sağlamaktadır. Motor karşılaştırmalarında yeni nesil LEAP serisi motorların genel olarak daha düşük emisyon ve daha yüksek yakıt verimliliği sunduğu; eski nesil motorların (özellikle CFM56-5B4 ve V2500-A1) daha yüksek NO_x ve CO emisyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir (Çil ve Tangöz, 2025).

Dineri ve Güngör Parlakyiğit (2025), 1997–2018 döneminde dünya CO₂ emisyonlarının yaklaşık üçte ikisini üreten 18 ülkede hava taşımacılığı talebinin çevresel bozulma üzerindeki etkisini panel veri analiziyle incelemiştir. Çalışmada STIRPAT modeli çerçevesinde iki ayrı model kurulmuş; bağımlı değişken olarak kişi başına CO₂ ve toplam sera gazı (GHG) emisyonları kullanılmıştır. Uzun dönem katsayı tahminleri PMG-ARDL yöntemiyle, nedensellik ilişkileri ise Dumitrescu-Hurlin (D-H) panel nedensellik testiyle analiz edilmiştir. Bulgulara göre ekonomik büyüme, enerji yoğunluğu, hava yolcu taşımacılığı ve hava yük taşımacılığı hem CO₂ hem de GHG emisyonlarını pozitif ve anlamlı biçimde artırmaktadır. Buna karşılık yenilenebilir enerji tüketimi ve kentsel nüfus değişkenleri emisyonlar üzerinde negatif ve anlamlı etkiye sahiptir. Nedensellik analizi sonuçları, hava taşımacılığı talebi ile çevresel bozulma arasında çift yönlü nedensellik ilişkisi bulunduğunu göstermektedir (Dineri ve Güngör Parlakyiğit, 2025).

Shoukat ve Redondi (2025), konvansiyonel, elektrikli, hibrit, biyoyakıtlı ve hidrojenli uçak teknolojilerinin doğrudan ve dolaylı sera gazı (GHG) emisyonlarını bölgesel (≤ 400 km) ve orta–uzun menzilli (≤ 4500 km) uçuşlar için karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Çalışmada EEA Tier 3 metodolojisi temel alınarak yakıt tüketimi ve CO₂, CH₄, N₂O emisyonları hesaplanmış; sonuçlar GWP100 katsayıları kullanılarak CO₂-eşdeğeri cinsine dönüştürülmüştür. Elektrikli uçaklarda dolaylı emisyonlar elektrik üretim karışımına göre; hidrojenli uçaklarda ise hidrojenin üretim yöntemine (SMR ve yenilenebilir kaynaklı elektroliz) göre değerlendirilmiştir. Bulgulara göre bölgesel uçuşlarda hibrit (%50 DoH) uçaklar doğrudan emisyonları yaklaşık %15 azaltırken, biyoyakıt (JSPK) yaklaşık %7 azaltım sağlamaktadır. Elektrikli uçaklar toplam emisyonlarda %87'ye, yenilenebilir kaynaklı hidrojen ise %96–99'a varan azalma potansiyeli göstermektedir. Ancak hidrojenin doğal gazdan SMR yöntemiyle üretilmesi durumunda dolaylı emisyon avantajı önemli ölçüde azalmaktadır (Shoukat ve Redondi, 2025).

Bernardo ve Fageda (2025), 2017–2023 döneminde küresel uçak–havayolu–hat düzeyinde veri kullanarak (RDC Aviation), yeni nesil A320neo ve B737 MAX uçaklarının toplam CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada propensity score matching ve yüksek boyutlu sabit etkiler modeli uygulanmış; yeni uçakların emisyon yoğunluğunu yaklaşık %20 azalttığı, ancak arz artışı (uçuş ve koltuk sayısındaki artış) nedeniyle toplam emisyonlardaki net azalmanın yalnızca %5–9 aralığında kaldığı bulunmuştur. Sonuçlar, özellikle düşük gelirli bölgelerde ve düşük maliyetli taşıyıcılarda “arz artışı (rebound) etkisinin” daha güçlü olduğunu ve yeni uçakların küresel ölçekte tek başına yeterli bir karbonsuzlaşma aracı olmadığını göstermektedir (Bernardo ve Fageda, 2025).

Xue v.d. (2025), uzay havası kaynaklı GNSS (uydu navigasyon) arızalarının uçuş mesafesi, yakıt tüketimi, emisyonlar ve ekonomik kayıplar üzerindeki etkilerini simülasyon temelli olarak incelemiştir. Dijkstra algoritması ile yer istasyonlarına dayalı alternatif rotalar tasarlanmış; yakıt tüketimi BADA modeli, emisyonlar ise ICAO EEDB verileri kullanılarak hesaplanmıştır. 11.037 ABD uçuşu üzerinden yapılan analizde, bir günlük GNSS kesintisinin uçuş mesafesini 2,37 milyon km, yakıt tüketimini 7.176 ton ve CO₂ emisyonunu 22.604 ton artırabileceği gösterilmiştir. Ekonomik analizde ise yeniden yönlendirmenin (rerouting) genellikle en düşük maliyetli strateji olduğu, iptallerin ise en yüksek kayba yol açtığı belirlenmiştir (Xue v.d., 2025).

Rezo v.d. (2025), uçak yakıt tüketimi ve buna bağlı CO₂ ve CO dışı emisyonların otomatik ve bütüncül raporlanmasını sağlamak amacıyla Aircraft Engine Emissions Reporting Information System (AERIS) adlı web tabanlı bir bilgi sistemi geliştirmiştir. Sistem; uçuş izleme, veri toplama, yakıt tüketimi hesaplama ve ICAO Emisyon Veri Bankası ile diğer literatür temelli emisyon faktörlerini entegre ederek çok sayıda kirleticiyi (CO₂, NO_x, SO_x, PM_{2.5}, BC, NMVOC vb.) hesaplamaktadır. AERIS, Great Circle Distance yaklaşımı ve aktivite verisi temelli metodoloji ile otomatik raporlama ve görselleştirme sunmakta; ISO 14064-3 doğrulama ilkeleriyle uyumlu çalışmaktadır. Çalışma, yalnızca CO₂'ye odaklanan mevcut hesaplayıcılardan farklı olarak CO₂ dışı emisyonları da kapsayan kapsamlı ve ölçeklenebilir bir emisyon raporlama çerçevesi önermektedir (Rezo v.d., 2025).

Özfırat (2025), Diyarbakır Havalimanı'nda Ocak 2022–Mart 2024 döneminde gerçekleşen uçuşlardan kaynaklanan LTO (iniş-kalkış) emisyonlarını belirlemek ve bu emisyonları yapay zekâ yöntemleriyle tahmin etmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada

DHMI'den temin edilen uçak tescil bilgileri kullanılarak motor tipleri belirlenmiş; ICAO Uçak Motor Emisyonları Veri Bankası (EEDB) ve EUROCONTROL taksi süreleri esas alınarak taksi fazındaki yakıt tüketimi ile CO, HC ve NO_x emisyonları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler üzerinde lineer, Lasso, Ridge regresyon, Destek Vektör Regresyonu ve LSTM modelleri uygulanmış; sonuçta en yüksek tahmin performansının LSTM yöntemi ile elde edildiği ortaya konmuştur (Özfirat, 2025).

Dissanayaka v.d. (2026), uçakların taksi (taxi-in/taxi-out) safhasındaki hava kirleticisi emisyonlarını daha doğru tahmin etmek amacıyla ICAO emisyon envanteri yöntemini havaalanı ve uçak tipine özgü ortalama taksi süreleriyle geliştirmiştir. Avustralya'daki bir havalimanında bir yıllık operasyonel veri kullanılarak üç yöntem karşılaştırılmıştır: (i) gerçek taksi süresine dayalı referans hesaplama, (ii) ICAO'nun sabit 7/19 dk taksi süreleri, (iii) uçak tipine özgü ortalama taksi süreleri. CO, HC, NO_x ve SO_x emisyonları yolcu başına hesaplanmış; önerilen modelin (Yöntem 3) MAPE (<%20) ve R² değerleri açısından ICAO standart yöntemine kıyasla belirgin biçimde daha düşük hata ve daha yüksek uyum sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca genel havacılık uçaklarının taksi fazında yolcu başına özellikle CO ve HC emisyonlarının ticari uçuşlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma, taksi süresinin uçak tipine göre modellenmesinin havaalanı emisyon envanterlerinin doğruluğunu artırdığını ortaya koymaktadır (Dissanayaka v.d., 2026).

Bu çalışmanın literatürdeki benzer araştırmalardan temel farkı, uçak emisyonlarını yalnızca motor tipi veya yalnızca uçak modeli üzerinden değerlendirmek yerine, uçak ve motorun birlikte oluşturduğu uçak/motor kombinasyonunu esas alarak analiz etmesidir. Literatürde yaygın olarak kullanılan ICAO Motor Emisyonları Veri Tabanı (ICAO-EEDB) ve Tier1/Tier2 yöntemleri çoğunlukla motor bazlı değerlendirmeler yapmakta ve motorun farklı uçak platformları üzerindeki operasyonel etkilerini sınırlı biçimde ele almaktadır. Bu tez çalışmasında ise EUROCONTROL IMPACT programı kullanılarak motorların uçağa bütünleşmiş şekilde, yani belirli bir uçak ağırlığı, operasyon profili ve uçuş performansı altında değerlendirilmesi sağlanmıştır. Böylece, aynı uçak modeli üzerinde kullanılan farklı motor tiplerinin yakıt tüketimi ve emisyon karakteristikleri daha gerçekçi ve karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmiştir. Ayrıca çalışma, Türkiye'de iç hatlarda yoğun kullanılan yolcu uçaklarını esas alması, kısa mesafeli Ankara–Trabzon hattını örnek uygulama olarak seçmesi ve yalnızca havalimanı çevresindeki çevresel etkilerin en yoğun olduğu LTO fazına odaklanması bakımından da özgünlük taşımaktadır. Bu yönüyle araştırma, yalnızca teorik bir emisyon

değerlendirmesi sunmakla kalmayıp, havayolu işletmelerinin filo planlaması, sürdürülebilirlik stratejileri ve çevresel maliyet analizlerinde doğrudan kullanılacak uygulamalı ve karar destek odaklı bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü-Uçak Motoru Emisyon Veri Bankası

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından yönetilen Uçak Motoru Emisyon Veri Bankası (ICAO Aircraft Engine Emissions Databank-EEDB), sivil havacılıkta çevresel sürdürülebilirlik çalışmalarının temel veri kaynağını oluşturmaktadır. Bu veri bankası, uçak motorlarının sertifikasyon süreçlerinde elde edilen emisyon değerlerini içeren kapsamlı bir teknik kaynaktır (EASA, 2026).

a) ICAO-EEDB'nin Tanımı ve Amacı

ICAO-EEDB, sivil havacılık operasyonlarında kullanılan turbojet ve turbofan motorların (özellikle itki gücü 26,7 kN'den büyük olanlar) egzoz emisyonlarının kayıt altına alındığı ana veri merkezidir. Veri bankasının temel amacı, uçak motorlarının ICAO Annex 16 Cilt II'de belirlenen çevresel standartlara uygunluğunu belgelemek ve araştırmacılara, politika yapıcılara ve havalimanı işletmecilerine emisyon hesaplamaları için standartlaştırılmış veriler sunmaktır (Özfirat, 2025).

b) Kapsanan Emisyon Türleri ve Parametreler

Veri bankası, motorların farklı operasyonel safhalardaki performansını temel alan üç ana kirletici ve yakıt tüketim verilerini içerir.

- **Azot Oksitler (NO_x):** Yüksek yanma sıcaklıklarında oluşan bu gazlar, özellikle kalkış ve tırmanış gibi yüksek itki gerektiren safhalarda maksimum seviyeye ulaşır.
- **Karbon Monoksit (CO) ve Hidrokarbonlar (HC):** Düşük yanma verimliliğinin olduğu taksi (rölanti) modunda daha yoğun salınırlar.
- **Yakıt Akış Hızı (Fuel Flow):** Her mod için kg/saniye cinsinden tüketilen yakıt miktarını belirtir ve toplam emisyon yükünün hesaplanmasında temel çarpanıdır (Çil ve Tangöz, 2025).

c) Referans İniş ve Kalkış (LTO) Döngüsü

ICAO-EEDB'deki tüm emisyon indeksleri (EI), standart bir LTO (Landing and Take-Off) döngüsü parametrelerine göre düzenlenmiştir. Bu döngü, yer seviyesinden 3000 ft (yaklaşık 914 metre) yüksekliğe kadar olan operasyonları kapsar ve şu dört ana modu içerir: Kalkış (Take-Off), Tırmanış (Climb-Out), Yaklaşma (Approach) ve Taksi/Rölanti (Taxi/Idle) (ÖZTÜRK, 2011).

d) Akademik ve Operasyonel Kullanımı

- **Emisyon Envanterleri:** Havalimanı çevresindeki hava kalitesini analiz eden çalışmalarda (Tier 2 ve Tier 3 yöntemleri), uçak tiplerine göre motor eşleştirilmesi yapılarak bu veri bankasındaki indeksler kullanılır.
- **Teknolojik Karşılaştırma:** Yeni nesil motorların (örneğin LEAP serisi), eski nesil motorlara (örneğin CFM56 serisi) göre yakıt verimliliği ve düşük emisyon performansları EEDB verileri üzerinden kıyaslanmaktadır.
- **Model Doğrulama:** Termodinamik analiz programları (ESMS vb.) ile yapılan simülasyon sonuçlarının doğrulanmasında ICAO-EEDB verileri referans kabul edilir.

Tablo 4 de bu çalışmada kullanılan, ICAO-EEDB dan alınan motor tipleri ve uyumlu olduğu uçak tipleri verilmiştir.

Tablo 4. ICAO-EEDB Motor Bilgileri (EASA, 2026).

Uçak Tipi	Motor Üreticisi	Motor Modeli	ICAO Kodu	Bypass Oranı	Basınç Oranı	Nominal İtki (kN)
A320	International Aero Engines	V2525-D5	11A002	4,8	27,2	111,2
	International Aero Engines	V2527-A5	11A003	4,8	27,2	111,2
	International Aero Engines	V2522-A5	31A006	4,9	25,6	102,7
	CFM International	CFM56-5B4/P	3CM026	5,9	27,7	120,1
	CFM International	CFM56-5B5/P	3CM027	5,9	23,3	97,9
	CFM International	CFM56-5B6/P	3CM028	6,0	24,6	104,5

Uçak Tipi	Motor Üreticisi	Motor Modeli	ICAO Kodu	Bypass Oranı	Basınç Oranı	Nominal İtki (kN)
A320Neo	CFM International	LEAP-1A26/26E1	17CM082	11,1	33,4	120,6
	Pratt & Whitney	PW1124G-JM	18PW119	12,7	28,8	107,8
	Pratt & Whitney	PW1127G-JM	18PW122	12,3	31,7	120,4
A321	International Aero Engines	V2530-A5	11A005	4,5	32,1	133,4
	International Aero Engines	V2533-A5	31A008	4,5	33,4	140,6
	CFM International	CFM56-5B3/P	3CM025	5,6	32,8	142,4
	CFM International	CFM56-5B4/P	3CM026	5,9	27,7	120,1
	CFM International	CFM56-5B5/P	3CM027	5,9	23,3	97,9
A321Neo	CFM International	LEAP- 1A35A/33/33B2/32/30	17CM083	10,5	38,6	143,1
	Pratt & Whitney	PW1130G-JM	18PW124	11,6	38,1	147,3
	Pratt & Whitney	PW1133G-JM	18PW126	11,6	38,1	147,3
B737-800	CFM International	CFM56-7B24	3CM032	5,2	25,8	107,7
	CFM International	CFM56-7B26	3CM033	5,1	27,6	117,0
	CFM International	CFM56-7B27	3CM034	5,0	28,6	121,4
B737 MAX	CFM International	LEAP-1B28	18CM084	8,6	41,5	130,4

	CFM International	LEAP-1B27	18CM086	8,5	39,9	124,7
Uçak Tipi	Motor Üreticisi	Motor Modeli	ICAO Kodu	Bypass Oranı	Basınç Oranı	Nominal İtki (kN)
B737-900	CFM International	CFM56-7B24	3CM032	5,2	25,8	107,7
	CFM International	CFM56-7B27	3CM034	5,0	28,6	121,4
	CFM International	CFM56-7B27E	11CM077	5,1	29,0	121,4

Tablo 4. (Devamı)

Motor bilgi formunda yer alan kavramlar aşağıda yeniden ifade edilmiştir.

Bypass Oranı: Gaz türbinli bir motorda, çekirdek (core) içerisinde geçen hava kütlelerine kıyasla fan tarafından bypass edilen (çekirdek dışından geçen) hava kütlelerinin oranını ifade eder. Bu oran genellikle deniz seviyesi ve standart atmosfer koşullarında maksimum değer üzerinden tanımlanır. Fanın dakikadaki devir sayısı, motorun içinden geçen havanın kütlesiyle orantılı bir değerdir. Bazı motor üreticileri için motorun ürettiği thrust'ın dolaylı bir göstergesidir.

Basınç Oranı: Kompresöre giren hava basıncı ile kompresörden çıkan hava basıncı arasındaki oran olarak tanımlanır ve motorun sıkıştırma performansını (Brayton çevriminin verimini) gösteren temel parametrelerden biridir.

Nominal İtki: Motorun standart çalışma koşulları altında ürettiği itki kuvvetini ifade eder ve genellikle kiloNewton (kN) birimi ile belirtilir (Lefebvre ve Ballal, 2010; Soares, 2015).

Çalışmada kullanılan uçak tiplerine ait bazı bilgiler Tablo 5 ve Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmada Kullanılan ve Airbus Firmasına Ait Bazı Uçak Bilgileri (Skybrary, 2026a)

Uçak Modeli	A320	A320Neo	A321	A321Neo
ICAO Uçak Arkası	M	M	M	M
Türbülansı (WTC)				
Yaklaşma Hızı (APC)	C	C	C	C
Gövde Tipi	Dar Gövde	Dar Gövde	Dar Gövde	Dar Gövde
Hizmet Tavanı (ft)	41.000	39.000	41.000	39.000
Maksimum Menzil (NM)	2.700	3.500	3.300	3.500
Maksimum Kalkış Ağırlığı (MTOW) [kgs]	73.500	73.500	89.000	93.500
Motor Sayısı	2	2	2	2
Nominal İtki (kN)	97,9-120,1	107,8-120,6	97,9-142,4	143,1-147,3

Tablo 6. Çalışmada Kullanılan ve Boeing Firmasına Ait Bazı Uçak Bilgileri (Skybrary, 2026a)

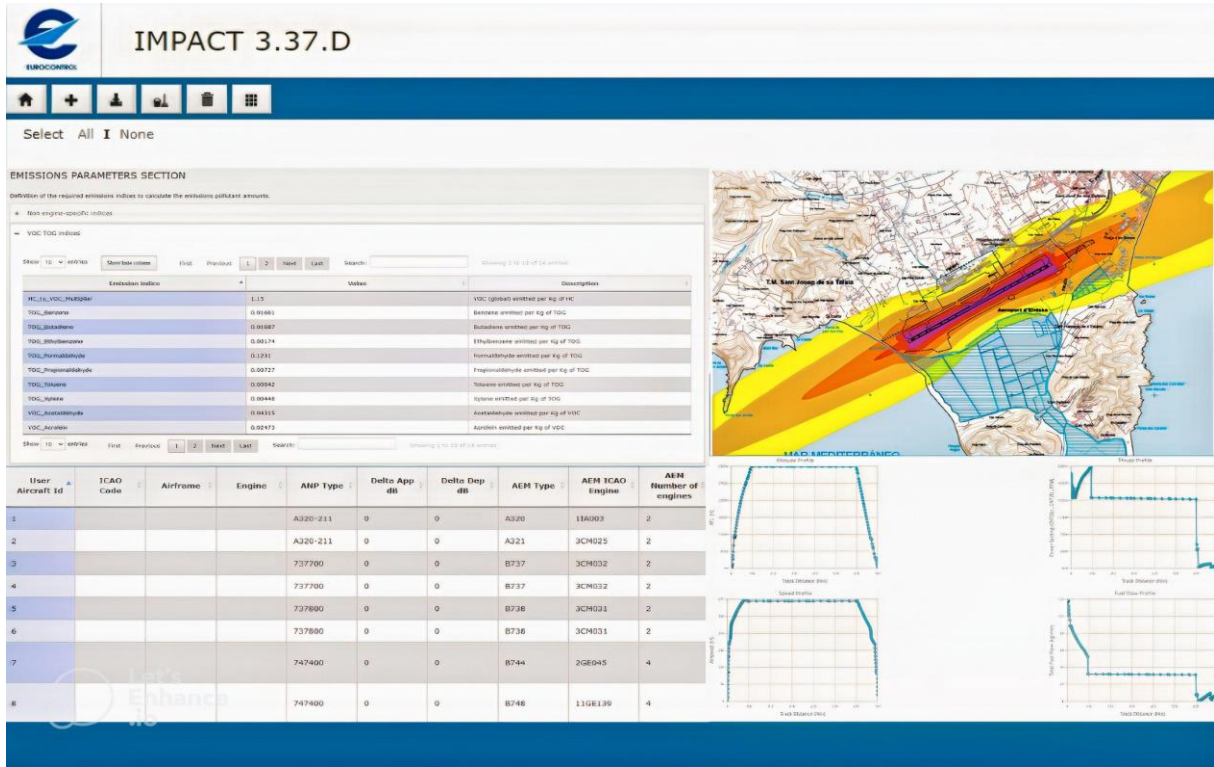
Uçak Modeli	B737-800	B737 MAX	B737-900
ICAO Uçak Arkası	M	M	M
Türbülansı (WTC)			
Yaklaşma Hızı (APC)	C	C	C
Gövde Tipi	Dar Gövde	Dar Gövde	Dar Gövde
Hizmet Tavanı (ft)	41.000	41.000	41.000
Maksimum Menzil (NM)	2.000	3.550	2.745
Maksimum Kalkış Ağırlığı (MTOW) [kgs]	70.530	82.191	79.015
Motor Sayısı	2	2	2
Nominal İtki (kN)	107,7-121,4	124,7-130,4	107,7-121,4

ICAO WTC (Wake Turbulence Category), ICAO model uçuş planı formuna göre bir türbülans kategorisi göstergesidir (uçakların içinden geçtikleri atmosfer tabakalarında oluşturdukları kısa süreli türbülanslar) ve MTOW'a göre atanır. Tablolardan görülebileceği gibi, verilen tüm uçaklar için Orta (M) tip kategorisindedir (136.000 kg'dan az ve 7.000 kg'dan fazla ağırlığa sahip uçak tipleri). APC, yaklaşma hızına göre uçakların sınıflandırılmasıdır. Tablolardan görülebileceği gibi, verilen tüm uçak tipleri C (VAT: 121-140 knot) kategorisinde sınıflandırılmıştır (VAT: pist eşiğindeki gösterge hızı). Uçaklar için hayati önem taşıyan parametrelerden biri olan her bir motorun nominal çıkış gücü değerleri dikkate alındığında, bu değerler 97,9 kN ile 147,3 kN arasında değişmektedir.

2.2. EUROCONTROL IMPACT Modelleme Platformu

EUROCONTROL IMPACT, havacılık faaliyetlerinin çevresel etkilerini (gürültü, yakıt tüketimi ve gaz emisyonları) hem yerel (havalimanı çevresi) hem de küresel ölçekte analiz etmek amacıyla geliştirilmiş, web tabanlı bütünleşmiş bir modelleme platformudur. Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) ve Avrupa Sivil Havacılık Konferansı (ECAC) standartlarıyla tam uyumlu olan bu araç, havacılıkta sürdürülebilirlik analizleri için kullanılmaktadır. EUROCONTROL tarafından geliştirilen IMPACT platformu, en güncel Uçak Gürültüsü ve Performans Verilerini (Aircraft Noise and Performance – ANP), ICAO Uçak Motoru Emisyonları Veri tabanına (AEED) dayanan Gelişmiş Emisyon Modelini (Advanced Emissions Model – AEM) ve Uçak Verileri Tabanını (Base of Aircraft Data – BADA) içermektedir. BADA ve ANP den elde edilen veriler rota hesaplayıcısı tarafından işlenirken, ICAO motor emisyonları veri tabanlarından elde edilen veriler emisyon hesaplama modülü tarafından işlenir. Rota hesaplayıcısı üç boyutlu hız, itki ve yakıt akışı hesaplamaları yapar ve bunları emisyon hesaplama modülüne gönderir. IMPACT platformu, ilgili veri tabanlarını ve kullanıcı girdilerini kullanarak her bir uçuş safhası için yakıt tüketimini, CO₂, H₂O ve diğer gaz emisyonları (NO_x, SO_x, CO, yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonlar, kurum ve diğer iz bileşikler) ile uçak gürültüsünü hesaplamaktadır. Platform, gerçek zamanlı ve model tabanlı simülasyon verilerini desteklemekte olup, uçuş parametrelerinin teorik olarak seçilmesine imkân tanımaktadır. Web tabanlı bir modelleme platformu olan IMPACT'e, OneSky Online üzerinden erişilebilmekte olup, EUROCONTROL tarafından Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi için akademik site lisansı tanımlanmıştır. Yakıt/emisyon ve gürültüyü hesaplayan IMPACT, ICAO Havacılık Çevre Koruma Komitesi'nin (CAEP) Modelleme ve Veri tabanı Grubu (MDG) tarafından onaylanmış modellerden biridir. IMPACT, EUROCONTROL Gelişmiş Emisyon Modeli'ne (AEM) göre yakılan yakıttan kaynaklanan

emisyonları hesaplar. AEM modeli de CAEP MDG tarafından onaylanmış bir modeldir. Şekil 5 de IMPACT platformu verilmiştir.



Şekil 5. IMPACT Platformu (Ekici v.d., 2023)

a) Temel Bileşenler ve Veri Kaynakları

IMPACT, hesaplamalarını gerçekleştirmek için dünyaca kabul görmüş birkaç temel veri tabanını ve metodolojiyi kullanır.

- **BADA (Base of Aircraft Data):** BADA EUROCONTROL tarafından hava trafik yönetimi göz önünde bulundurularak, uçuş simülasyonu ve tahmin algoritmalarının kullanımına dayalı olarak geliştirilen bir uçak performans modelidir. IMPACT, uçak performans modelleri için EUROCONTROL'un BADA (özellikle en güncel versiyonlar olan v4.2 veya v3.x) veri tabanını kullanır. Bu veri tabanı, uçağın ağırlığı, hızı ve irtifasına bağlı olarak gerekli itki kuvvetini ve yakıt akış hızını hesaplar. IMPACT platformu, itme kuvveti ve yakıt akışı da dahil olmak üzere şehirler arası tüm uçuş rotaları için emisyonları ve gürültüyü hesaplamak üzere Uçak Veri Tabanı (BADA) ve ilgili BADA referans verilerini kullanır. IMPACT, hem BADA 3 hem de BADA 4 modellerine dayalı uçak performans modelleme yetenekleri sunar ve hangi modelin seçileceği uygulama üzerinden belirlenebilir.

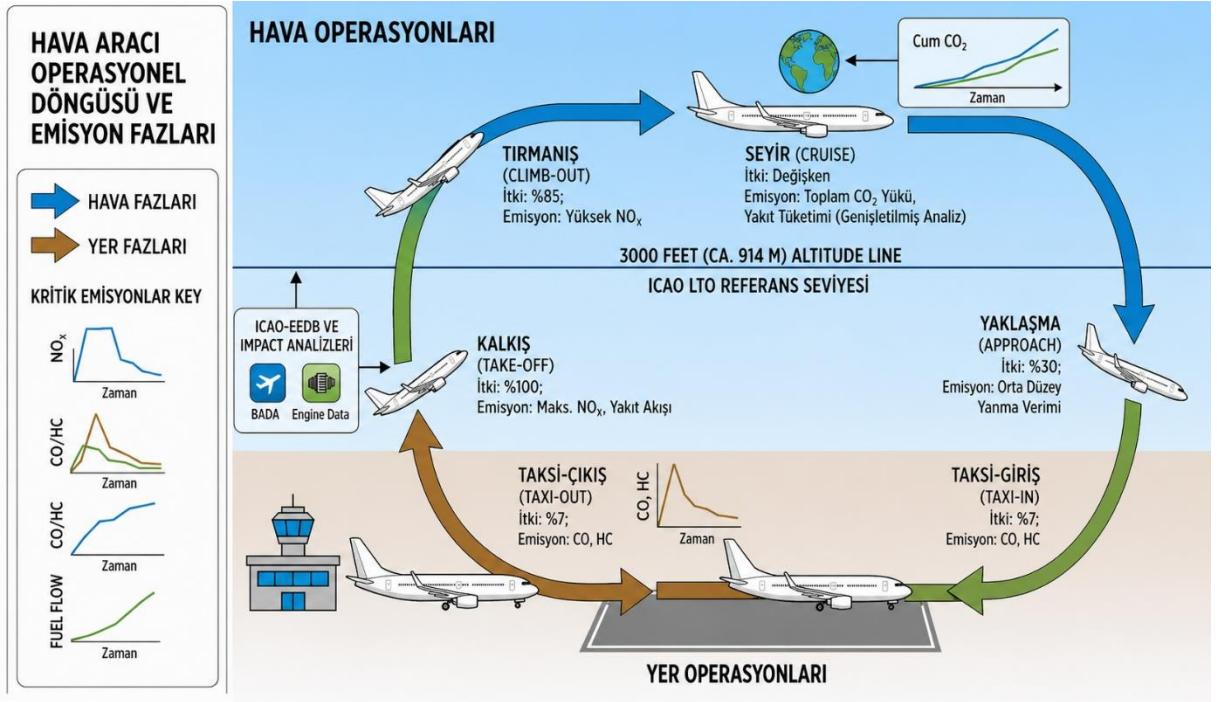
- **ICAO EEDB (Engine Emissions Databank):** Motor bazlı emisyon indeksleri (NO_x , CO, HC), ICAO'nun sertifikalandırılmış motor veri bankasından çekilir.
- **ANP (Aircraft Noise Performance):** Gürültü hesaplamaları için uçağın gürültü ve performans karakteristiğini tanımlayan ANP veri tabanı ile çalışır (Ekici v.d., 2023).

b) Emisyon Hesaplama Metodolojisi

Platform, uçuşun her bir safhası (taksi, kalkış, tırmanış, seyir, alçalış ve yaklaşma) için ayrıntılı hesaplama yapma yeteneğine sahiptir.

- **Yakıt Tüketimi:** BADA performans modellerini kullanarak uçuş yörüngesi boyunca yakıt tüketimini belirler.
- **Gaz Emisyonları:** Yakıt tüketim verileri temel alınarak CO_2 , H_2O ve SO_x gibi yakıtla doğrudan bağlı gazların yanı sıra; yanma sıcaklığı ve basınca duyarlı olan NO_x , CO ve uçucu olmayan partikül maddeler (nvPM) ICAO'nun gelişmiş metodolojileriyle hesaplanır.
- **Hava Kalitesi ve İklim Etkisi:** IMPACT, sadece LTO (Landing and Take-Off) döngüsünü değil, 3000 ft üzerindeki seyir (cruise) safhasını da kapsayarak tam bir uçuş profili analizi sunar.

Şekil 6 da IMPACT platformu ve ilişkili uçuş fazları gösterilmiştir.



Şekil 6. IMPACT Platformu ve İlişkili Uçuş Fazları (Ekici v.d., 2023)

c) Kullanım Alanları ve Avantajları

Literatürde IMPACT'in tercih edilme nedenleri şu başlıklar altında toplanmaktadır:

- **Uçak ve Motor Karşılaştırması:** Aynı rota ve doluluk oranında farklı uçak-motor kombinasyonlarının çevresel performansını kıyaslamak için sistematik bir karar mekanizması sunar.
- **Filo Planlaması ve Politika Analizi:** Havayolu operatörleri ve politika yapıcılar için daha yeşil filo seçimleri ve emisyon vergisi gibi stratejik kararların analizinde kullanılır.
- **Sürdürülebilir Ulaşım Analizi:** Yüksek hızlı tren (HSR) ile uçak emisyonlarının karşılaştırıldığı intermodal taşımacılık çalışmalarında hassas veri sağlar (Ekici v.d., 2023).

d) Teknik Standartlar ve Güvenilirlik

IMPACT, ICAO'nun Havacılık Çevre Koruma Komitesi (CAEP) tarafından onaylanmış bir araçtır. Platform, havalimanı çevresindeki yerel hava kalitesi (LAQ) değerlendirmelerinde ICAO Doc 9889 ile uyumlu sonuçlar üretirken, gürültü analizlerinde ECAC Doc 29 standartlarını baz alır. IMPACT, ilgili referans verilerini (BADA ve ANP) ve kullanıcı tanımlı uçak operasyon girdilerini kullanarak uçuşun ayrıntılı 4 boyutlu yörüngelerini hesaplar. IMPACT'te bulunan giriş veri formatları, modellere dayalı gerçek zamanlı simülasyonlardan, teorik çalışmalardan ve gerçek radar izlerinden elde edilen verilere olanak tanır. IMPACT, giriş verilerinde yer alan ve en az bir uçuş hareketi bulunan her havaalanı (bir veya daha fazla piste sahip) çevresinde yakıt/emisyon ve gürültü değerlendirmesi yapabilir (Ekici v.d., 2023).

Bu çalışmada yöntem olarak bilgisayar tabanlı simülasyon ve emisyon hesaplama yaklaşımı kullanılmıştır. Analizler, EUROCONTROL tarafından geliştirilen Entegre Uçak Gürültüsü ve Emisyon Modelleme Platformu (IMPACT) üzerinden gerçekleştirilmiş olup, Türkiye'de iç hat uçuşlarında yaygın olarak kullanılan yolcu uçaklarının farklı uçak/motor kombinasyonları değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen Ankara–Trabzon uçuş rotası için uçakların LTO (Landing and Take-Off) fazındaki yakıt tüketimi ile CO₂, NO_x, CO ve HC emisyon değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, çevresel etkisi daha düşük ve yakıt verimliliği daha yüksek uçak/motor kombinasyonları belirlenerek karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

3. BULGULAR

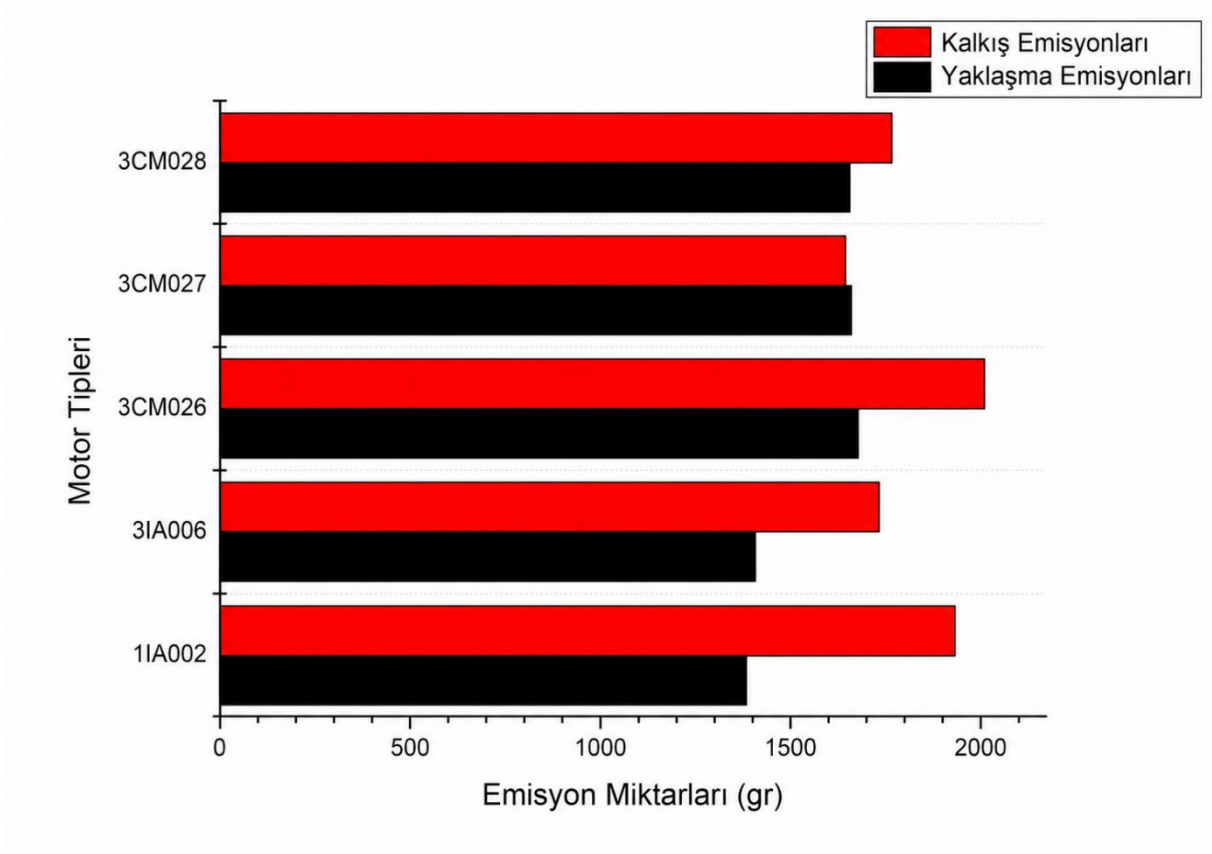
Çalışma kapsamında ICAO-EEDB ve IMPACT platformu ile analizler yapılmıştır. Burada A320 uçağı için 1IA002, 1IA003, 3IA006, 3CM026, 3CM027 ve 3CM028 kodlu motorlar, A320Neo uçağı için 17CM082, 18PW119 ve 18PW122 kodlu motorlar, A321 uçağı için 1IA005, 3IA008, 3CM025, 3CM026 ve 3CM027 kodlu motorlar, A321Neo için 17CM083, 18PW124 ve 18PW126 kodlu motorlar, B737-800 uçağı için 3CM032, 3CM033 ve 3CM034 kodlu motorlar, B737 MAX uçağı için 18CM084 ve 18CM086 kodlu motorlar ve B737-900 uçağı için ise 3CM032, 3CM034 ve 11CM077 kodlu motorlar incelenmiştir. Analiz sonuçları Tablo 7, Tablo 8, Tablo 9, Tablo 10, Tablo 11, Tablo 12 ve Tablo 13 de verilmiştir. Ayrıca her bir uçak ve motor için kalkış ve yaklaşma emisyonlarının karşılaştırması da Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13 de verilmiştir. Tablolar ve Şekiller birlikte ele alındığında, farklı motor tiplerinin kalkış (take-off, T.O) ve yaklaşma (approach, App.) fazlarındaki emisyon karakteristikleri hem nicel hem de karşılaştırmalı olarak ortaya konmaktadır. Bulgular, uçuş fazı ve motor teknolojisinin emisyon oluşumu üzerindeki belirleyici rolünü açık biçimde göstermektedir.

Tablo 7. A320 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
1IA002/1IA003	HC	1,76	3,08	4,59	7,75
	CO	23,43	39	186	420
	NO _x	1172	1890	681	956
	Toplam	1197,19	1932,08	871,59	1383,75
3IA006	HC	1,63	2,9	4,47	7,7
	CO	23,24	40	194	450
	NO _x	999	1689	650	949
	Toplam	1023,87	1731,9	848,47	1406,7

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
3CM026	HC	9,5	14,5	37,44	103
	CO	42,78	65,3	172,22	497
	NO _x	1331,23	1930	748,8	1077
	Toplam	1383,51	2009,8	958,46	1677
3CM027	HC	7,78	15	43,68	101
	CO	33,67	67,5	212,16	493
	NO _x	819,5	1562	542,8	1066
	Toplam	860,95	1644,5	798,64	1660
3CM028	HC	8,07	15	39,6	97,4
	CO	36,32	67,5	191,4	479
	NO _x	952,5	1683	607,2	1080
	Toplam	996,89	1765,5	838,2	1656,4

Tablo 7. (Devami)



Şekil 7. A320 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

Tablo 7 ve Şekil 7 incelendiğinde, ilk olarak, tüm motor tiplerinde kalkış fazına ait toplam emisyonların yaklaşma fazına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, kalkış sırasında motorların yüksek itki seviyelerinde çalışması, yanma odası sıcaklıklarının artması ve buna bağlı olarak özellikle termal NO_x oluşumunun hızlanması ile açıklanabilir. Nitekim tabloda sunulan değerler incelendiğinde, toplam emisyon yükünün baskın bileşeninin NO_x olduğu ve bu bileşenin toplam emisyonlar içerisindeki payının oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Yaklaşma fazında ise daha düşük güç ayarları nedeniyle NO_x emisyonları azalırken, buna karşılık eksik yanma ürünleri olan CO ve HC emisyonlarında görece artış eğilimi gözlenmektedir. Motor tipleri arasındaki farklılıklar değerlendirildiğinde, 3CM026, 3CM027 ve 3CM028 motorlarının genel olarak daha yüksek emisyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle 3CM026 motoru hem kalkış hem de yaklaşma fazlarında en yüksek toplam emisyon değerlerini üretmektedir (IMPACT T.O \approx 2009,8 g; IMPACT App. \approx 1677 g). Bu durum, ilgili motor serisinin yanma verimi, tasarım karakteristikleri ve muhtemelen daha eski nesil teknolojilere dayanmasıyla ilişkilendirilebilir. Buna karşın, 1IA002/1IA003 ve 3IA006 motorlarının daha düşük toplam emisyon değerleri sergilediği ve bu bağlamda daha çevreci bir performans sunduğu görülmektedir. ICAO veri seti ile IMPACT model çıktılarının

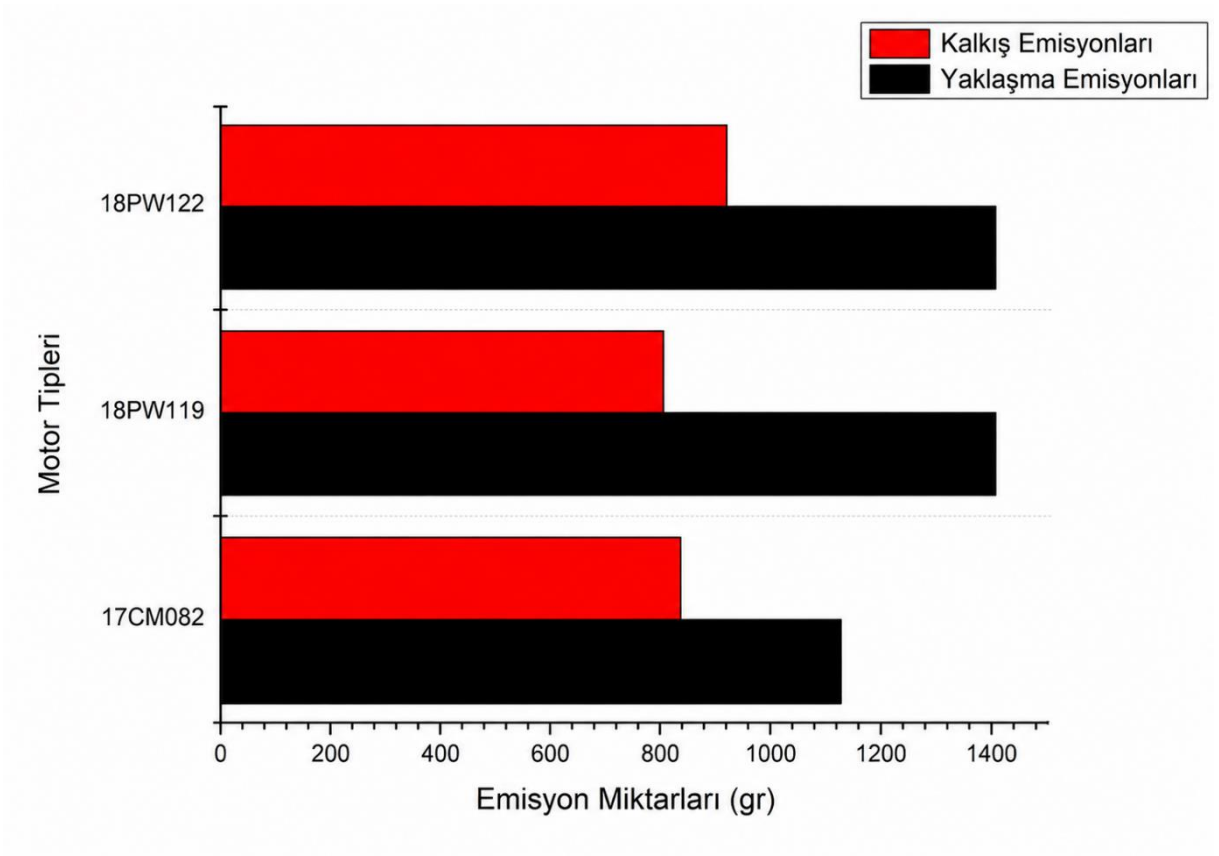
karşılaştırılması, modelleme yaklaşımının emisyon tahminleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. IMPACT modelinin tüm motor tipleri ve emisyon bileşenleri için daha yüksek değerler öngördüğü görülmektedir. Bu farkın özellikle CO ve HC emisyonlarında belirginleşmesi, modelin gerçek operasyonel koşulları (motor aşınması, bakım durumu, çevresel faktörler ve güç ayarı değişkenlikleri gibi) daha kapsamlı biçimde temsil ettiğini düşündürmektedir. Buna karşılık, NO_x emisyonlarında iki yöntem arasındaki farkın daha sınırlı olması, bu bileşenin daha çok termodinamik parametreler tarafından belirlenmesi ve model belirsizliklerine daha az duyarlı olmasıyla açıklanabilir. Şekilsel analiz de sayısal bulguları desteklemektedir. Kalkış emisyonlarını temsil eden çubukların beş motor tipinde daha yüksek olması, uçuş fazına bağlı emisyon değişimini açıkça ortaya koyarken; motorlar arasındaki farkların özellikle yüksek güç rejimlerinde daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Bu durum, motor tasarımındaki farklılıkların yüksek yük koşullarında daha kritik hale geldiğini göstermektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular hem motor tipinin hem de operasyonel fazın emisyon oluşumunda kritik belirleyiciler olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek itki gerektiren kalkış fazı ile görece yüksek emisyon profiline sahip motor tipleri (özellikle 3CM serisi) çevresel etki açısından öncelikli değerlendirme alanlarıdır. Bu çerçevede, düşük emisyonlu yeni nesil motor teknolojilerinin kullanımı ve operasyonel optimizasyon stratejilerinin (örneğin güç yönetimi ve kalkış profili iyileştirmeleri) uygulanması, havacılık kaynaklı emisyonların azaltılmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

Tablo 8. A320Neo için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
17CM082	HC	0,71	0,983	2,32	5,7
	CO	7,9	11,55	159,1	412
	NO _x	674	808	503,5	725
	Toplam	682,61	820,5	664,92	1142,7
18PW119	HC	2,98	4,92	1	7,6

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
	CO	7,75	12	322	606
	NO _x	491	770	449,5	796
	Toplam	501,73	786,92	772,5	1409,6
18PW122	HC	0,672	1	1,11	6
	CO	7,39	11	298,4	626
	NO _x	632,35	878	505	780
	Toplam	640,4	890	804,5	1412

Tablo 8. (Devamı)



Şekil 8. A320Neo için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

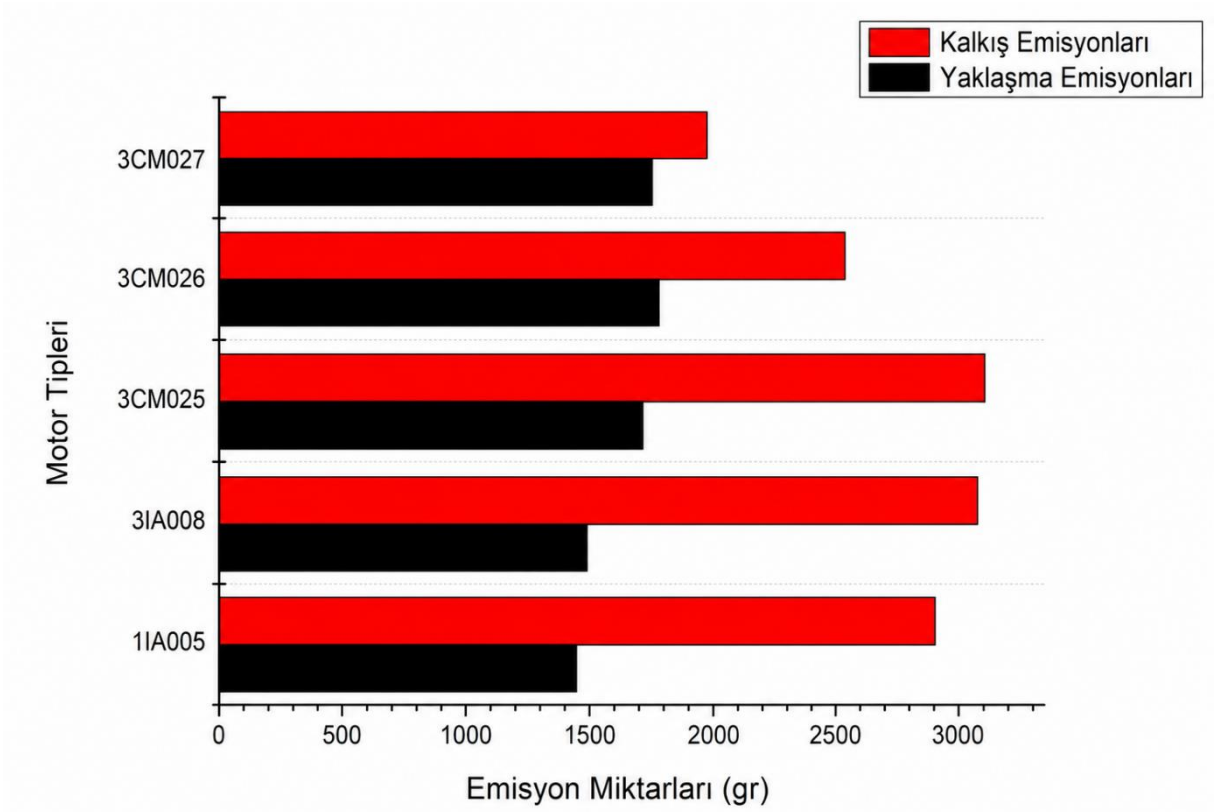
Tablo 8 ve Şekil 8 incelendiğinde ilk olarak dikkat çeken husus, motor tiplerinde yaklaşma fazı emisyonlarının kalkış fazı emisyonlarını aşmasıdır. Özellikle 18PW119 ve 18PW122 motorlarında yaklaşma fazına ait toplam emisyon değerleri, kalkış fazına kıyasla belirgin şekilde daha yüksektir (örneğin 18PW122 için IMPACT App. ≈ 1412 g, IMPACT T.O ≈ 890 g). Bu durum, düşük güç ayarlarında gerçekleşen yanma verimsizlikleri sonucu CO ve HC emisyonlarında meydana gelen artış ile açıklanabilir. Nitekim tabloda, yaklaşma fazında CO emisyonlarının yükseldiği ve toplam emisyon içerisindeki payının ciddi ölçüde arttığı görülmektedir. Motor tipleri arasında karşılaştırma yapıldığında, 17CM082 motorunun toplam emisyon açısından en düşük değerlere sahip olduğu ve daha dengeli bir emisyon profili sergilediği görülmektedir (IMPACT T.O $\approx 820,5$ g; IMPACT App. $\approx 1142,7$ g). Buna karşılık, 18PW119 ve 18PW122 motorlarının özellikle yaklaşma fazında yüksek emisyon değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu motorlarda CO emisyonlarının çok yüksek seviyelere çıkması (örneğin 18PW122 için IMPACT App. CO ≈ 626 g), toplam emisyon artışının temel belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır. NO_x emisyonları ise bu motor grubunda kalkış ve yaklaşma fazları arasında daha sınırlı değişim göstermekte olup, toplam emisyon üzerindeki baskın rolünü korumakla birlikte göreceli etkisi CO artışı nedeniyle azalmaktadır. ICAO ve IMPACT veri setlerinin karşılaştırılması, bu motor grubunda da benzer bir eğilimi ortaya koymaktadır. IMPACT modelinin tüm motor tipleri ve emisyon bileşenleri için daha yüksek değerler tahmin ettiği görülmektedir. Bu fark özellikle yaklaşma fazındaki CO ve HC emisyonlarında oldukça belirgindir. Bu durum, modelin gerçek operasyonel koşulları ve düşük güç rejimlerinde ortaya çıkan yanma kararsızlıklarını daha iyi temsil ettiğini göstermektedir. Şekilsel analiz de bu bulguları desteklemektedir. Yaklaşma emisyonlarını temsil eden siyah çubukların, özellikle 18PW serisi motorlarda kalkış emisyonlarını temsil eden kırmızı çubuklardan daha uzun olması, fazlar arası emisyon davranışındaki farklılaşmayı açık biçimde ortaya koymaktadır. Buna karşın 17CM082 motorunda bu farkın daha sınırlı olduğu ve daha dengeli bir dağılım sergilendiği görülmektedir. Sonuç olarak, bu motor grubunda emisyon oluşumu yalnızca yüksek itki koşullarıyla değil, aynı zamanda düşük güç rejimlerinde ortaya çıkan yanma verimsizlikleri ile de güçlü biçimde ilişkilidir. Özellikle 18PW119 ve 18PW122 motorlarında yaklaşma fazında gözlenen yüksek CO emisyonları, operasyonel ve tasarımsal iyileştirmelere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, düşük güç koşullarında yanma verimini artırmaya yönelik teknolojik geliştirmeler ve operasyonel optimizasyon stratejileri, toplam emisyonların azaltılmasında kritik öneme sahiptir.

Tablo 9. A321 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
1IA005	HC	2,79	3,9	5,42	7,7
	CO	25,1	41,6	163,7	330
	NO _x	1889,42	2841	913,8	1147
	Toplam	1917,31	2886,5	1082,92	1484,7
3IA008	HC	2,99	4,15	4,68	7,4
	CO	27,54	45	154,4	310
	NO _x	2184,78	2969	1013,68	1200
	Toplam	2215,31	3018,15	1172,76	1517,4
3CM025	HC	6	13,8	43,92	91,2
	CO	48	78,4	149,3	369
	NO _x	2238	3004	983,8	1289
	Toplam	2292	3096,2	1177	1749,2
3CM026	HC	9,5	18,4	37,44	85,2
	CO	42,78	82,9	172,2	409,2
	NO _x	1331	2453	748,8	1307
	Toplam	1383,28	2554,3	958,44	1801,4
3CM027	HC	7,48	17,9	43,68	83,4
	CO	33,67	80,6	212,16	405

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
	NO _x	819,54	1864	542,88	1289
	Toplam	860,69	1962,5	798,72	1777,4

Tablo 9. (Devamı)



Şekil 9. A321 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

Tablo 9 ve Şekil 9 incelendiğinde, tüm motor tiplerinde kalkış fazı toplam emisyonlarının yaklaşma fazına göre belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir. Tabloda yer alan veriler, kalkış fazında toplam emisyon yükünün büyük ölçüde NO_x bileşeninden kaynaklandığını açıkça göstermektedir. Yaklaşma fazında ise motorların düşük güç rejiminde çalışması sonucu NO_x emisyonlarında azalma gözlenirken, buna karşılık CO ve HC gibi eksik yanma ürünlerinde artış meydana gelmektedir. Motor tipleri arasında yapılan karşılaştırmada, 3CM025 ve 3IA008 motorlarının en yüksek toplam emisyon değerlerine sahip olduğu dikkat

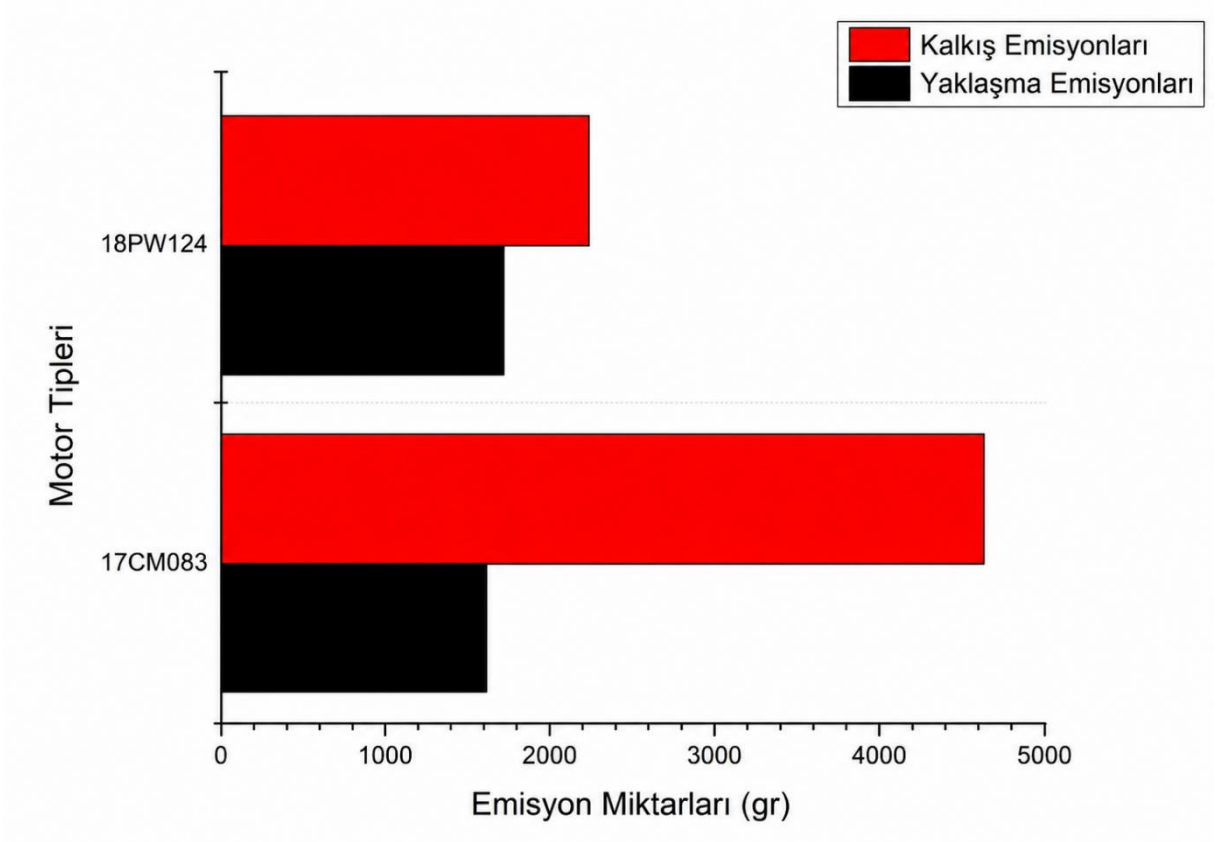
çekmektedir. Özellikle 3CM025 motoru toplamda (IMPACT T.O \approx 3096,2 g; IMPACT App. \approx 1749,2 g) en yüksek emisyon seviyesine ulaşmaktadır. 3IA008 motoru ise buna oldukça yakın değerler sergileyerek ikinci sırada yer almaktadır. Buna karşılık, 3CM027 ve kısmen 3CM026 motorlarının daha düşük toplam emisyon değerleri ürettiği, özellikle 3CM027'nin kalkış fazında görece daha düşük bir emisyon profiline sahip olduğu görülmektedir. 1IA005 motoru ise yüksek NO_x üretimi nedeniyle kalkış fazında önemli bir emisyon yükü oluşturmakla birlikte, genel sıralamada orta seviyede konumlanmaktadır. ICAO ve IMPACT veri setlerinin karşılaştırılması, bu motor grubunda da tutarlı bir biçimde IMPACT modelinin daha yüksek emisyon tahminleri ürettiğini göstermektedir. Bu fark özellikle CO ve HC emisyonlarında belirginleşirken, NO_x emisyonlarında da önemli ancak nispeten daha dengeli bir artış söz konusudur. Şekilsel değerlendirme, sayısal bulguları destekler niteliktedir. Kalkış emisyonlarını temsil eden çubukların tüm motor tiplerinde yaklaşma emisyonlarından daha uzun olması, fazlar arası farkın belirginliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca motorlar arasındaki farkların özellikle kalkış fazında daha keskin hale geldiği gözlenmektedir; bu da motorlarda yanma odası tasarımının, alevin sıcak bölgede kalma zamanının, seyreltme delikleri konumu ve sayısının ve oksijen kullanılabilirlik düzeyinin yüksek güç rejimlerinde daha belirleyici olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu motor grubunda emisyon oluşumu büyük ölçüde yüksek itki koşullarına bağlı NO_x üretimi tarafından domine edilmektedir. Özellikle 3CM025 ve 3IA008 motorlarının yüksek emisyon profili, bu motorların çevresel etkiler açısından öncelikli değerlendirme kapsamına alınması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 10. A321Neo için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
17CM083	HC	2,2	4,48	2,7	5,75
	CO	13,3	26,88	125,88	262,8
	NO _x	2404,9	4608	664,6	1346
	Toplam	2420,4	4639,3	793,18	1614,55
18PW124/18PW126	HC	0,859	1,84	1,33	4,63

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
	CO	9,88	21,2	229,5	412
	NO _x	1093,9	2231	627	1315,3
	Toplam	1104,63	2254,4	857,83	1731,9

Tablo 10. (Devamı)



Şekil 10. A321Neo için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

Tablo 10 ve Şekil 10 incelendiğinde, her iki motor tipinde de kalkış fazı toplam emisyonlarının yaklaşma fazına kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın özellikle 17CM083 motorunda oldukça belirgin olduğu dikkat çekmektedir (IMPACT T.O \approx 4639,3 g; IMPACT App. \approx 1614,55 g). Tabloda görüldüğü üzere, toplam emisyonların büyük kısmı NO_x bileşeninden kaynaklanmaktadır. Bu motor tipinde NO_x emisyonlarının diğer tüm bileşenlere

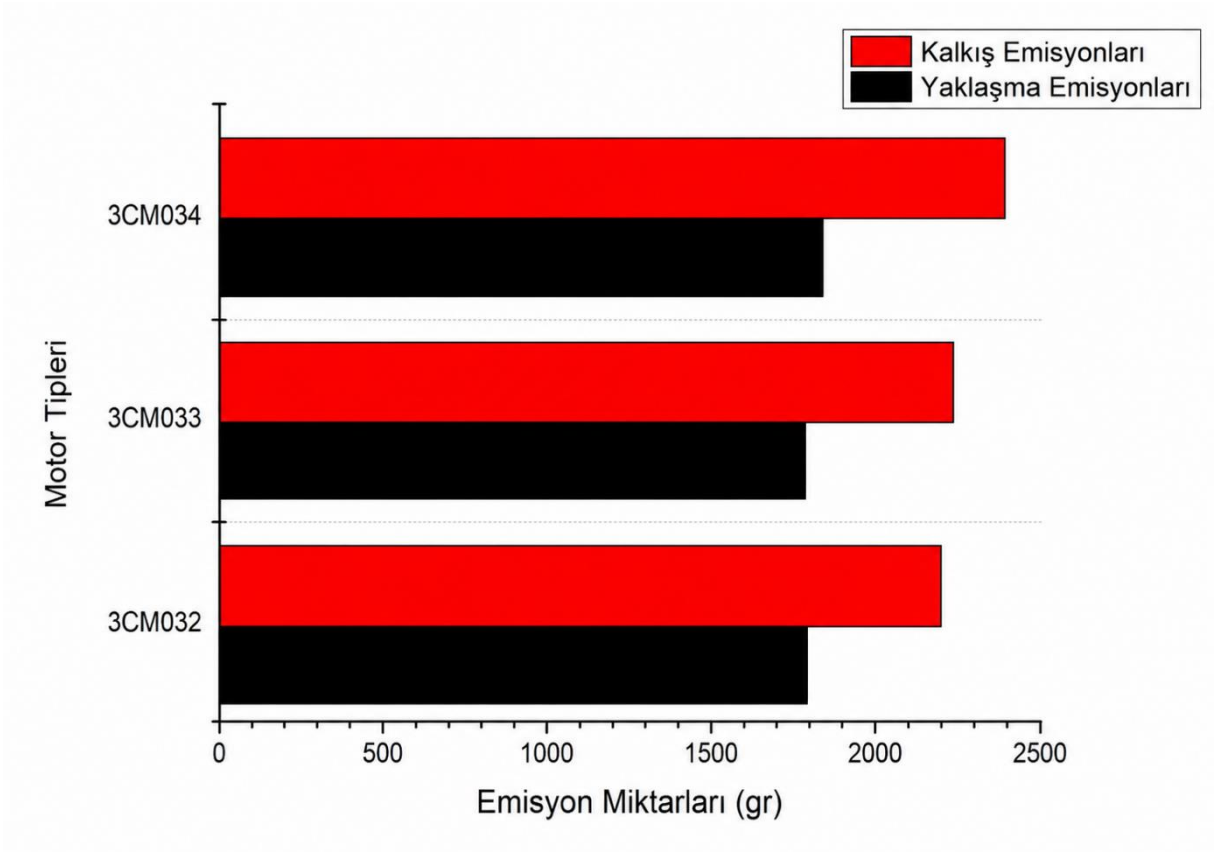
kıyasla baskın olması, yüksek sıcaklık rejimlerinde çalışan yanma sisteminin karakteristik bir sonucudur. Motorlar arası karşılaştırmada, 17CM083 motorunun açık ara en yüksek emisyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle kalkış fazında ürettiği NO_x miktarı (IMPACT \approx 4608 g), toplam emisyon yükünü belirleyen temel faktördür. Buna karşılık, 18PW124/18PW126 motorları daha düşük emisyon seviyeleri sergilemekle birlikte, yaklaşma fazında CO emisyonlarının belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir (IMPACT App. CO \approx 412 g). ICAO ve IMPACT veri setleri karşılaştırıldığında, önceki motor gruplarında olduğu gibi burada da IMPACT modelinin sistematik olarak daha yüksek emisyon tahminleri sunduğu görülmektedir. CO ve HC emisyonlarında da benzer bir artış eğilimi bulunmakla birlikte, toplam emisyon üzerindeki belirleyici etki NO_x üzerinden gerçekleşmektedir. Şekilsel analiz, sayısal bulguları güçlü biçimde desteklemektedir. 17CM083 motoruna ait kalkış emisyonlarını temsil eden çubuğun diğer tüm değerlere kıyasla oldukça uzun olması, bu motorun yüksek emisyon profilini görsel olarak da ortaya koymaktadır. Ayrıca her iki motor tipinde de kalkış ve yaklaşma fazları arasındaki farkın belirgin olması, uçuş fazının emisyon oluşumu üzerindeki kritik etkisini teyit etmektedir. Sonuç olarak, bu motor grubunda emisyon oluşumu büyük ölçüde yüksek sıcaklık kaynaklı NO_x üretimi tarafından domine edilmektedir. Özellikle 17CM083 motorunun yüksek emisyon profili, çevresel etkiler açısından kritik bir değerlendirme gerektirmektedir.

Tablo 11. B737-800 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
3CM032	HC	4,63	8,5	7,58	16,4
	CO	18,53	34	166,84	347
	NO _x	1172	2050	765,98	1378
	Toplam	1195,16	2092,5	940,4	1741,4
3CM033	HC	5,12	8,5	8,11	19,6
	CO	10,25	26	129,79	298

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
	NO _x	1476,86	2264	876	1396
	Toplam	1492,23	2298,5	1013,9	1713,6
3CM034	HC	5,39	8,5	8,37	21,1
	CO	10,78	29,8	117,26	285
	NO _x	1667	2286	921,3	1386,8
	Toplam	1683,17	2324,3	1046,93	1692,9

Tablo 11. (Devamı)



Şekil 11. B737-800 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

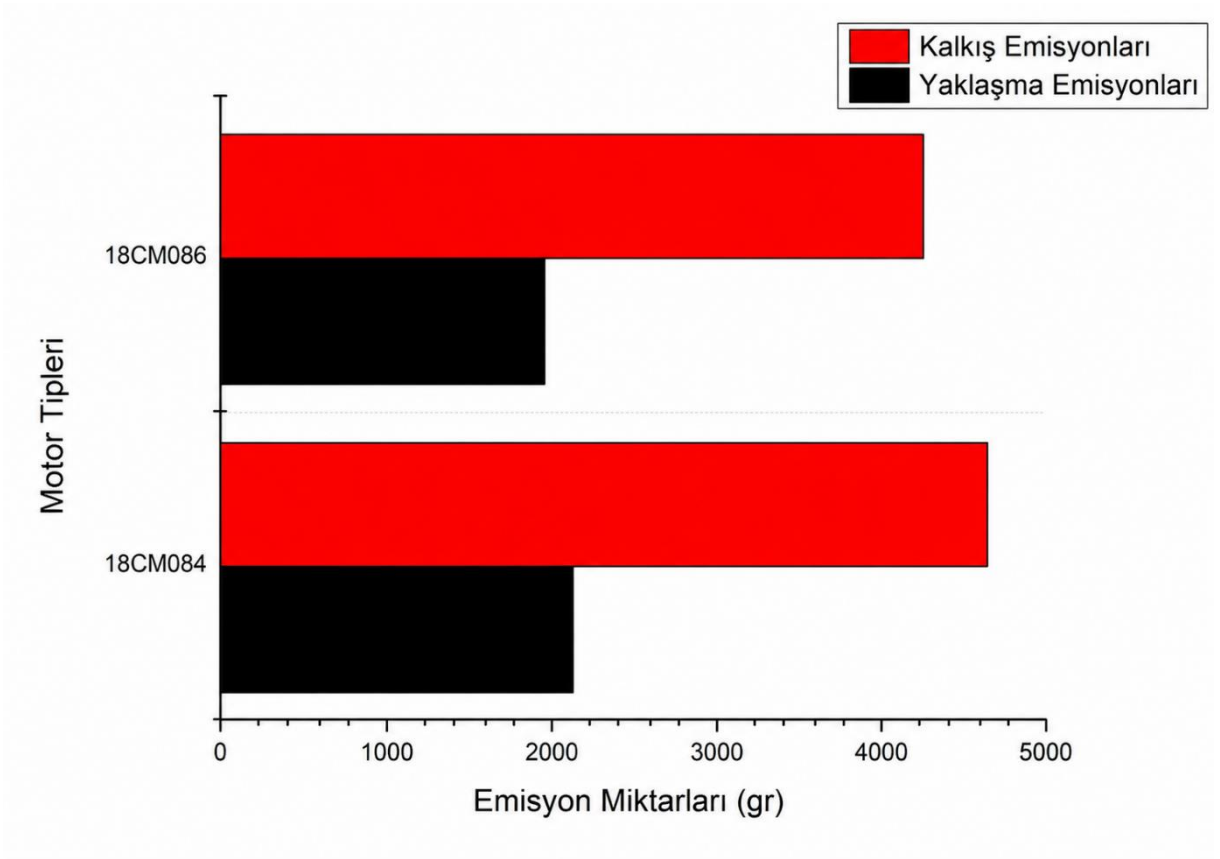
Tablo 11 ve Şekil 11 incelendiğinde, tüm motor tiplerinde kalkış fazı toplam emisyonlarının yaklaşma fazına kıyasla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Tablo verileri, her üç motor tipinde de toplam emisyon yükünün büyük ölçüde NO_x bileşeninden kaynaklandığını göstermektedir. Yaklaşma fazında ise düşük güç rejimi nedeniyle NO_x emisyonları azalırken, CO ve HC emisyonlarında artış gözlenmektedir. Motor tipleri arasındaki karşılaştırma, 3CM032'den 3CM034'e doğru kademeli bir emisyon artışı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 3CM034 motoru toplamda (IMPACT T.O ≈ 2324,3 g; IMPACT App. ≈ 1692,9 g) en yüksek emisyon değerine sahiptir. 3CM033 motoru orta seviyede yer alırken, 3CM032 motoru bu grup içerisinde en düşük emisyon değerlerine sahip motor olarak öne çıkmaktadır. Bu düzenli artış eğilimi, motor varyantları arasındaki tasarım farklılıklarının (örneğin yanma odası geometrisi, basınç oranı veya yakıt-hava karışım optimizasyonu) emisyon oluşumu üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. ICAO ve IMPACT veri setleri karşılaştırıldığında, önceki analizlerle uyumlu olarak IMPACT modelinin tüm motor tiplerinde daha yüksek emisyon tahminleri ürettiği görülmektedir. CO ve HC emisyonlarında da benzer bir artış eğilimi gözlenmekle birlikte, toplam emisyon üzerindeki belirleyici etki yine NO_x bileşenine aittir. Şekilsel analiz, bu bulguları desteklemektedir. Kalkış emisyonlarını temsil eden çubukların tüm motor tiplerinde daha uzun olması, uçuş fazının emisyon üzerindeki etkisini açıkça ortaya koyarken; motorlar arasındaki farkların da düzenli ve artan bir trend izlediği görülmektedir. Bu durum, motor tasarım parametrelerindeki değişimlerin emisyon performansına doğrudan yansıdığını göstermektedir. Sonuç olarak, 3CM03x motor ailesinde emisyon oluşumu büyük ölçüde yüksek itki koşullarına bağlı NO_x üretimi tarafından domine edilmekte olup, motor varyantları arasında belirgin bir artış eğilimi bulunmaktadır.

Tablo 12. B737 MAX için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
18CM084	HC	2,22	3,9	3,32	6,8
	CO	8,02	14,3	79,77	131,4
	NO _x	2703,5	4586,2	747,23	1806,7

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
	Toplam	2713,74	4604,4	830,32	1944,9
18CM086	HC	1,68	3,2	3,19	6,07
	CO	7,14	13,9	86,18	134,2
	NO _x	2242,8	4161,3	678,6	1732,3
	Toplam	2251,62	4178,4	767,97	1872,57

Tablo 12. (Devamı)

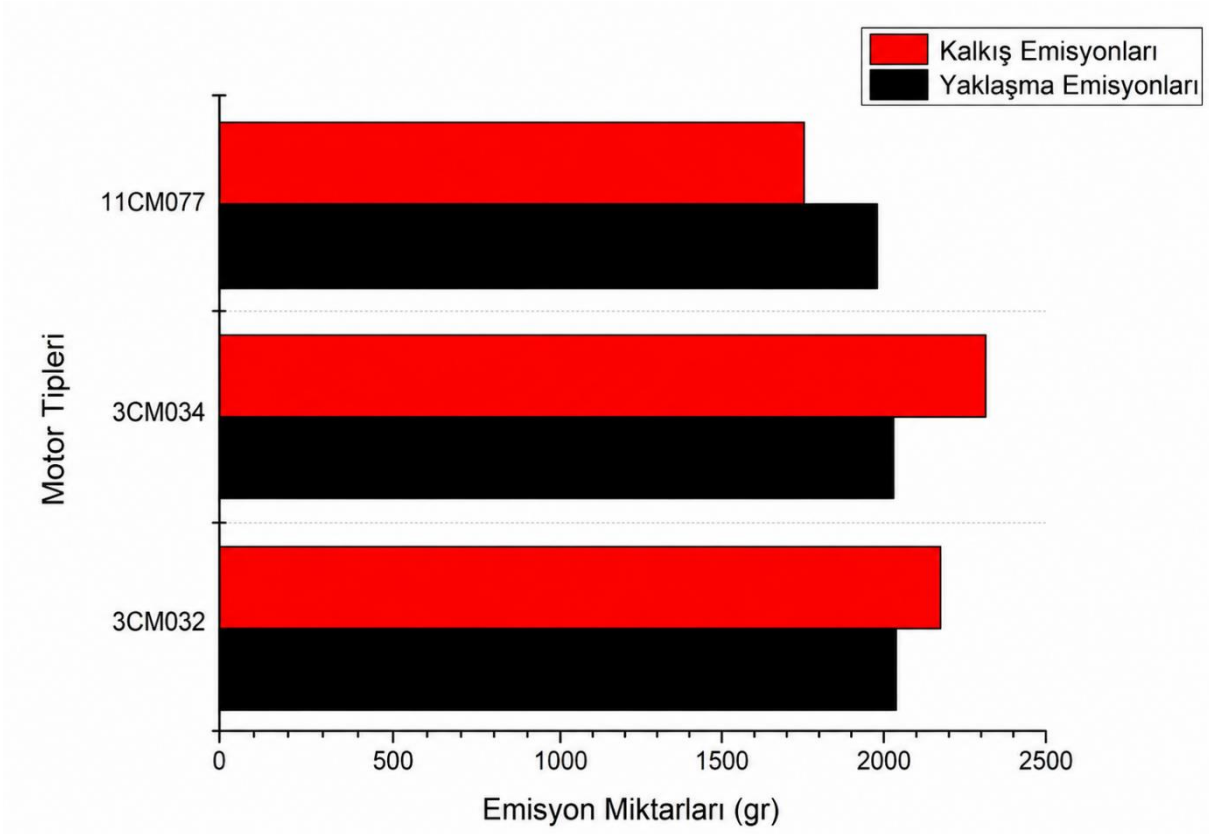


Şekil 12. B737 MAX için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

Tablo 12 ve Şekil 12 incelendiğinde, her iki motor tipinde de kalkış fazı toplam emisyonlarının yaklaşma fazına kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Tabloda sunulan veriler, toplam emisyon yükünün büyük ölçüde NO_x bileşeninden kaynaklandığını açıkça göstermektedir. Yaklaşma fazında ise düşük güç ayarları nedeniyle NO_x emisyonlarında azalma gözlenirken, CO ve HC gibi eksik yanma ürünlerinde artış meydana gelmektedir. Motor tipleri arasında karşılaştırma yapıldığında, 18CM084 motorunun hem kalkış hem de yaklaşma fazlarında daha yüksek emisyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir (IMPACT T.O ≈ 4604,4 g; IMPACT App. ≈ 1944,9 g). Özellikle kalkış fazında üretilen NO_x miktarı (IMPACT ≈ 4586,2 g), toplam emisyonun neredeyse tamamını oluşturarak bu motorun yüksek emisyon profilini belirleyen temel faktör olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, 18CM086 motoru daha düşük ancak yine de yüksek seviyede emisyon değerleri sergilemektedir (IMPACT T.O ≈ 4178,4 g; IMPACT App. ≈ 1872,57 g). Bu motor tipinde de benzer şekilde NO_x emisyonları baskın olup, iki motor arasındaki fark esas olarak NO_x üretim miktarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. ICAO ve IMPACT veri setleri karşılaştırıldığında, diğer motor gruplarında olduğu gibi burada da IMPACT modelinin sistematik olarak daha yüksek emisyon tahminleri ürettiği görülmektedir. CO ve HC emisyonlarında da benzer bir artış eğilimi mevcut olmakla birlikte, toplam emisyon üzerindeki belirleyici unsur NO_x olmaya devam etmektedir. Şekilsel analiz, bu bulguları destekler niteliktedir. Kalkış emisyonlarını temsil eden çubukların her iki motor tipinde de yaklaşma emisyonlarına göre oldukça uzun olması, uçuş fazının emisyon oluşumu üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca iki motor tipi arasındaki farkın sınırlı ancak tutarlı olması, benzer tasarım karakteristiklerine sahip bir motor ailesi içinde varyantlar arası performans farklarını işaret etmektedir. Sonuç olarak, 18CM08x motor ailesinde emisyon oluşumu büyük ölçüde yüksek sıcaklık kaynaklı NO_x üretimi tarafından domine edilmektedir. Özellikle kalkış fazında gözlenen yüksek emisyon seviyeleri, bu motor tiplerinin çevresel etkiler açısından kritik değerlendirme gerektirdiğini göstermektedir.

Tablo 13. B737-900 için ICAO ve IMPACT Hesaplamaları

Motor Kodu	Emisyon Tipi	ICAO T.O (gr)	IMPACT T.O (gr)	ICAO App. (gr)	IMPACT App. (gr)
3CM032	HC	4,63	8,2	7,58	15,6
	CO	18,53	34,52	166,84	327
	NO _x	1172	1946,8	765,98	1498,9
	Toplam	1195,16	1989,52	940,4	1841,5
3CM034	HC	5,39	8	8,37	19,5
	CO	10,78	28	117,26	266
	NO _x	1667	2064,8	921,3	1510
	Toplam	1683,17	2100,8	1046,93	1795,5
11CM077	HC	1,62	1,9	4,11	9,68
	CO	16,8	19,2	232	502,7
	NO _x	1300	1582,1	748	1275,5
	Toplam	1318,42	1603,2	984,11	1787,88



Şekil 13. B737-900 için Motorların Kalkış ve Yaklaşma Emisyonlarının Karşılaştırması

Tablo 13 ve Şekil 13 incelendiğinde, kalkış ve yaklaşma fazları arasındaki toplam emisyon farkının görece azaldığı dikkat çekmektedir. 3CM032 ve 3CM034 motorlarında kalkış emisyonları hâlâ yüksek olmakla birlikte, fark sınırlıdır. Buna karşılık, 11CM077 motorunda yaklaşma fazı toplam emisyonunun kalkış fazına oldukça yakınsadığı görülmektedir (IMPACT App. $\approx 1787,88$ g; IMPACT T.O $\approx 1603,2$ g). Bu durum, düşük güç rejimlerinde CO ve HC emisyonlarının artmasının toplam emisyon üzerindeki etkisini artırdığını göstermektedir. Emisyon bileşenleri açısından değerlendirildiğinde, kalkış fazında tüm motor tiplerinde NO_x emisyonlarının baskın bileşen olduğu görülmektedir. Ancak yaklaşma fazında bu durum kısmen değişmekte; özellikle CO emisyonlarında ciddi artışlar gözlenmektedir. Örneğin 11CM077 motorunda yaklaşma fazı CO emisyonu (IMPACT $\approx 502,7$ g), toplam emisyon içerisindeki payını önemli ölçüde artırmaktadır. Motor tipleri arasında karşılaştırma yapıldığında, 3CM034 motorunun kalkış fazında en yüksek emisyon değerine sahip olduğu (IMPACT T.O $\approx 2100,8$ g) görülmektedir. Buna karşın, yaklaşma fazında motorlar arasındaki farklar azalmaktadır. 3CM032 motoru ise her iki fazda da daha dengeli ve görece düşük emisyon değerleri ile öne çıkmaktadır. ICAO ve IMPACT veri setlerinin karşılaştırılması, bu motor grubunda da IMPACT modelinin daha yüksek emisyon tahminleri sunduğunu

göstermektedir. Bu fark özellikle yaklaşma fazında CO ve NO_x emisyonlarında belirginleşmektedir. Şekilsel analiz, bu bulguları desteklemektedir. Kalkış ve yaklaşma emisyonlarını temsil eden çubuklar arasındaki farkın önceki motor gruplarına kıyasla daha sınırlı olması, fazlar arası emisyon farkının azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca 11CM077 motorunda yaklaşma emisyon miktarının kalkış emisyon miktarına oldukça yakın olması, bu motorun düşük güç rejimlerinde daha yüksek emisyon üretme eğilimini görsel olarak da doğrulamaktadır. Sonuç olarak, bu motor grubunda emisyon oluşumu yalnızca yüksek itki koşullarına bağlı NO_x üretimi ile değil, aynı zamanda düşük güç rejimlerinde artan CO emisyonları ile de şekillenmektedir. Özellikle 11CM077 motorunun yaklaşma fazındaki yüksek emisyon profili, operasyonel ve yanma verimliliği açısından iyileştirme gereksinimini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda hem yüksek hem de düşük güç rejimlerini hedefleyen kapsamlı emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır.

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, havacılık sektöründe çevresel etkilerin önemli bir bileşeni olan uçak kaynaklı emisyonlar, özellikle iniş-kalkış (LTO) fazı kapsamında uçak/motor kombinasyonu temelli bir yaklaşımla detaylı olarak incelenmiştir. Artan hava trafiği, fosil yakıt bağımlılığı ve buna bağlı olarak yükselen sera gazı emisyonları, havacılık sektörünün sürdürülebilirlik açısından yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda çalışma, literatürde yaygın olarak kullanılan yalnızca motor temelli emisyon hesaplama yöntemlerinden farklı olarak, uçak ve motorun bütünleşmiş şekilde ele alındığı EUROCONTROL IMPACT modeli ile daha gerçekçi ve operasyonel koşullara yakın sonuçlar üretmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, aynı uçak tipi içerisinde farklı motor seçeneklerinin emisyon değerleri üzerinde oldukça belirgin farklılıklar oluşturduğu açıkça görülmüştür. Örneğin A320 platformu incelendiğinde, farklı motor kodlarına sahip konfigürasyonlar arasında hem kalkış (take-off) hem de yaklaşma (approach) fazlarında ciddi emisyon farkları ortaya çıkmaktadır. Özellikle 3CM026, 3CM027 ve 3CM028 motorlarının daha yüksek HC ve CO emisyonlarına sahip olduğu, buna karşılık bazı IA serisi motorların daha düşük toplam emisyon değerleri ürettiği görülmektedir. Bu durum, uçak tipi tek başına değerlendirilerek yapılacak çevresel analizlerin yetersiz kalabileceğini ve mutlaka motor varyantlarının da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde A320Neo ve A321Neo gibi yeni nesil uçaklarda kullanılan motor teknolojilerinin, genel olarak daha düşük emisyon değerleri sunduğu, ancak burada da motorlar arasında önemli farklar bulunduğu tespit edilmiştir. Özellikle Pratt & Whitney PW serisi motorlar ile CFM LEAP türevleri arasında NO_x ve CO emisyonları açısından belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu bulgu, yeni nesil uçakların her koşulda çevre açısından optimal olduğu yönündeki genel kabulün, motor seçimi dikkate alınmadan eksik kalabileceğini göstermektedir.

B737 ailesi kapsamında yapılan analizlerde de benzer bir eğilim dikkat çekmektedir. B737-800, B737 MAX ve B737-900 modellerinde kullanılan farklı motor varyantları arasında özellikle NO_x emisyonları açısından ciddi farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Örneğin B737 MAX modelinde yer alan motorların yüksek NO_x emisyon değerlerine ulaşabildiği, buna karşılık bazı

eski nesil motorların belirli operasyon koşullarında daha dengeli emisyon profili sergileyebildiği görülmüştür. Bu durum, teknolojik olarak daha yeni motorların her zaman tüm emisyon türleri açısından daha avantajlı olmadığını, emisyon türüne bağlı olarak değerlendirme yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın en önemli bulgularından biri de ICAO Emisyon Veri Tabanı (EEDB) ile IMPACT modeli sonuçları arasındaki farklardır. Tüm uçak ve motor kombinasyonlarında IMPACT ile hesaplanan emisyon değerlerinin ICAO referans değerlerine kıyasla anlamlı derecede daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu farkın özellikle NO_x ve CO emisyonlarında belirginleştiği ve bazı durumlarda %50'ye varan sapmaların oluşabildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, literatürde de vurgulanan şekilde ICAO verilerinin daha çok sertifikasyon koşullarını temsil ettiğini, gerçek operasyonel koşulları tam olarak yansıtmadığını doğrulamaktadır.

Bu bağlamda, havayolu işletmelerinin filo planlaması ve operasyonel karar alma süreçlerinde yalnızca ICAO veri tabanına dayalı değerlendirmeler yapmasının yanıltıcı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Daha doğru ve sürdürülebilir kararlar alınabilmesi için, gerçek uçuş koşullarını temsil eden simülasyon tabanlı modellerin (örneğin IMPACT gibi) kullanılması gerekmektedir. Özellikle yakıt tüketimi ile emisyonlar arasındaki doğrudan ilişki dikkate alındığında, doğru uçak/motor kombinasyonunun seçimi hem çevresel etkilerin azaltılması hem de operasyonel maliyetlerin düşürülmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

LTO fazının şehir merkezlerine yakın bölgelerde gerçekleşmesi nedeniyle bu fazda oluşan emisyonların insan sağlığı ve hava kalitesi üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Çalışmada elde edilen bulgular, özellikle CO, HC ve NO_x gibi kirleticilerin yaklaşma ve kalkış aşamalarında yoğunlaştığını ve bu durumun havaalanı çevresinde yaşayan nüfus için ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, sadece küresel ölçekte CO₂ emisyonlarına odaklanmak yerine, yerel hava kalitesi üzerindeki etkilerin de dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.

Tezin özgün katkılarından biri, Türkiye iç hat uçuşlarında yaygın olarak kullanılan uçak tipleri üzerinden somut bir uygulama yapılmasıdır. Ankara–Trabzon hattı gibi kısa mesafeli bir uçuşun seçilmesi, kısa mesafeli uçuşların toplam uçuşlar içerisindeki yüksek payı (%89,5) ve birim mesafe başına daha yüksek emisyon üretmeleri nedeniyle anlamlıdır. Bu kapsamda elde

edilen sonuçlar, kısa mesafeli uçuşlarda filo optimizasyonunun çevresel etkiler üzerinde daha da kritik olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymaktadır:

- Uçak emisyonlarının doğru analiz edilebilmesi için uçak ve motorun birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Aynı uçak tipi içerisinde motor varyantları emisyonlar üzerinde belirleyici bir etkendir.
- Yeni nesil uçaklar her zaman tüm emisyon türlerinde daha düşük değerler sunmamaktadır; motor seçimi kritik önemdedir.
- ICAO veri tabanı gerçek operasyonel koşulları tam olarak yansıtmayabilir; bu nedenle simülasyon tabanlı modeller tercih edilmelidir.
- LTO fazı, yerel hava kalitesi ve insan sağlığı açısından en kritik uçuş fazıdır.

Bu sonuçlar doğrultusunda, havayolu işletmeleri için bazı öneriler geliştirilmiştir. Öncelikle filo planlamasında yalnızca kapasite ve maliyet kriterleri değil, uçak/motor kombinasyonuna bağlı emisyon performansları da dikkate alınmalıdır. Ayrıca, özellikle yoğun trafik hacmine sahip havalimanlarında düşük emisyonlu motorların tercih edilmesi, yerel hava kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, operasyonel prosedürlerde (örneğin taksi sürelerinin azaltılması, optimize edilmiş iniş-kalkış profilleri) yapılacak iyileştirmeler de emisyonların azaltılmasında etkili olabilir.

Gelecek çalışmalar için ise gerçek uçuş verilerinin (ADS-B, FDR vb.) kullanılmasıyla model doğruluğunun artırılması, farklı havaalanları ve meteorolojik koşulların analize dahil edilmesi ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) emisyonlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, yalnızca LTO fazı değil, tüm uçuş profili boyunca oluşan emisyonların değerlendirilmesi, daha kapsamlı bir çevresel etki analizi sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu tez çalışması, havacılıkta emisyon analizine yönelik daha bütüncül ve gerçekçi bir yaklaşım sunarak hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de havayolu işletmeleri ve politika yapıcılar için uygulanabilir çıkarımlar ortaya koymaktadır. Sürdürülebilir havacılık hedeflerine ulaşılabilmesi için, bu tür bütüncül analizlerin karar alma süreçlerine entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

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. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119937>
- Adolfo, D., Bertini, D., Gamannossi, A., & Carcasci, C. (2017). Thermodynamic Analysis of an Aircraft Engine to estimate performance and emissions at LTO cycle. *Energy Procedia*, 126, 915–922. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.162>
- Airport Information. (2026a). *Ankara Esenboğa Airport (ESB)-Turkey's capital's airport*. <https://www.airportinformation.com/ESB>
- Airport Information. (2026b). *Trabzon airport information*. <https://www.airportinformation.com/TZX>
- Gedik, G., Begüm ÜNAL, G., Serkan TOKGÖZ, M., Nur KAYA, S., Kabadayi, T., Kuyzu, G., & Gültekin, H. (2013). *Endüstri Mühendisliği Dergisi ANKARA ESENBOĞA HAVALİMANI PARK ALANI ATAMA KARAR DESTEK SİSTEMİ TASARIMI*.
- Arter, C. A., & Arunachalam, S. (2021). Assessing the importance of nonlinearity for aircraft emissions' impact on O3 and PM2.5. *Science of the Total Environment*, 777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146121>
- Ayvaz, E. E. (2025). Çevre Vergileri, Hava Taşımacılığı ve CO2 Emisyonları İlişkisi: Avrupa Ülkeleri Üzerine Bir Çalışma. *Erzurum Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (21), 15–33. <https://doi.org/10.29157/etusbed.1436615>
- Bajgai, D. P., & Shrestha, K. L. (2023). Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan international airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal. *Atmospheric Environment: X*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100204>
- Baumeister, S. (2019). Replacing short-haul flights with land-based transportation modes to reduce greenhouse gas emissions: The case of Finland. *Journal of Cleaner Production*, 225, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.329>
- Baumeister, S., Krstić Simić, T., & Ganić, E. (2024). Emissions reduction potentials in business aviation with electric aircraft. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104415>
- Bernardo, V., & Fageda, X. (2025). The impact of new aircraft on carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104949>
- ÇARIKÇI, O., & ÖÇAL, B. (2019). İç Hat Seferi Yapan Bir Kargo Uçağının Emisyon Maliyetlerinin Çevre Muhasebesi Açısından Değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy*

- Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(2), 324–337.
<https://doi.org/10.31200/makuubd.617136>
- Çil, M. A., & Tangöz, S. (2025). Farklı LTO modlarının emisyon ve yakıt dağılımına etkisi: Taksi, tırmanma, yaklaşma ve kalkış karşılaştırması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1222–1233. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1703449>
- CND/CODA. (2011). *Study into the impact of the global economic crisis on airframe utilization*. <https://starcb.com/wp-content/uploads/2022/10/Eurocontrol-Study-into-the-impact-of-the-global-economic-crisis-on-airframe-utilifisation.pdf>
- 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).
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104865>
- DHMİ. (2026). *İstatistikler*. <https://dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>
- Dineri, E., & Güngör Parlakyiğit, M. (2025). Hava Taşımacılığı Talebinin Çevresel Bozulma Üzerindeki Etkisi. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 17(33), 1077–1093. <https://doi.org/10.20990/kilisiibfakademik.1655831>
- Dissanayaka, M., Ryley, T., Spasojevic, B., & Caldera, S. (2026). Modeling aircraft emissions during the taxiing phase to assess air quality impacts: An Australian airport case study. *Journal of Air Transport Management*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102918>
- EASA. (2022). *EUROPEAN AVIATION ENVIRONMENTAL REPORT 2022*.
https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/230217_EASA%20EAER%202022.pdf
- EASA. (2026). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*.
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
- Ekici, S., Ayar, M., Kilic, U., & Karakoc, T. H. (2023). Performance based analysis for the Ankara-London route in terms of emissions and fuel consumption of different combinations of aircraft/engine: An IMPACT application. *Journal of Air Transport Management*, 108, 102357. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102357>
- EKİCİ, S., & 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. <https://doi.org/10.21923/jesd.709428>
- El-Sayed, A. F. (2017). *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- EUROCONTROL. (2021). *Climate Change Risks for European Aviation 2021*.

- Genç, R. (2022). *MALATYA ERHAÇ HAVALİMANI İÇİN UÇAK EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE ÇEVREYE ETKİLERİ*. İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Göçmen, F. D. (2025). Havalimanlarında Yolcu Taşımacılığının Karbon Emisyonlarına Etkisi: Schiphol Havalimanı Örneği. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(5), 1514–1524. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1745277>
- ICAO. (2020). *Airport Air Quality Manual*. https://www.icao.int/sites/default/files/2025-04/9889_cons_en.pdf
- ICAO. (2026). *ICAO Environmental Report 2022*. <https://www.icao.int/icao-environmental-report-2022>
- IEA. (2018). *World Greenhouse Gas Emissions in 2016*. <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2016>
- Inoue, C., Higaki, S., Fujii, H., Ishikawa, N., & Ueda, Y. (2023). On-site direct imaging of carbon dioxide emissions from aircraft during landing and take-off cycle. *Environmental Advances*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100432>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Karaman, F. (2025). SİVİL HAVACILIK SEKTÖRÜNDE EMİSYON HESAPLAMA YÖNTEM VE YÖNETİMİ: TRABZON, RİZE-ARTVİN VE ORDU-GİRESUN HAVALİMANLARI ÖRNEĞİ. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(3), 799–813. <https://doi.org/10.34248/bsengineering>
- KESKİN, B. N., & YALÇINER ERCOŞKUN, Ö. (2021). Covid-19'un Havacılık Sektörüne Çevresel Etkisi: Adnan Menderes Havalimanı Örneği. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 74–86. <https://doi.org/10.51513/jitsa.880466>
- Kilic, U. (2023). A comparison of the environmental impact of turboprop and turbofan-powered aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(7), 1092–1098. <https://doi.org/10.1108/AEAT-10-2022-0296>
- Kılıç, U. (2023). A detailed emission analysis between regional jet and narrow-body passenger aircraft. *International Journal of Energy Studies*, 8(2), 201–213. <https://doi.org/10.58559/ijes.1270530>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., & Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22–23), 3520–3537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>

- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, *244*, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., Prather, M. J., Schumann, U., Bais, A., & Bernsten, T. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, *44*(37), 4678–4734. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>
- Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas Turbine Combustion*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420086058>
- Lin, C., Han, Y., Cao, C., Wang, Y., Zhang, R., He, X., Li, G., Zhang, Z., Liang, Z., Zhou, Z., Gu, T., Yun, L., Guo, P., Huang, B., Li, M., Zhu, L., & Shen, H. (2025). Assessing the Impacts of Aircraft Emissions on Air Quality in a Megacity Using High-Resolution Flight Tracking Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *130*(13). <https://doi.org/10.1029/2024JD042921>
- Lobo, P., Hagen, D. E., & Whitefield, P. D. (2011). Comparison of PM Emissions from a Commercial Jet Engine Burning Conventional, Biomass, and Fischer–Tropsch Fuels. *Environmental Science & Technology*, *45*(24), 10744–10749. <https://doi.org/10.1021/es201902e>
- Lukacevic, N., Mirkovic, B., Crossed D Signogatovic, M., & Ganic, E. (2022). Simulation model for estimation of aircraft emissions at Airport Podgorica. *Transportation Research Procedia*, *65*(C), 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.021>
- Markowski, J. (2018). Correction of the Model for Assessing the Emission of Harmful Exhaust Emissions from the Engine of a Small Aircraft during the Flight. *Transportation Research Procedia*, *35*, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.025>
- Markowski, J., Pielecha, J., & Jasiński, R. (2017). Model to Assess the Exhaust Emissions from the Engine of a Small Aircraft during Flight. *Procedia Engineering*, *192*, 557–562. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.096>
- Mattingly, J. D., Heiser, W. H., & Pratt, D. T. (2002). *Aircraft Engine Design, Second Edition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D’Ascoli, E., Kim, J., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Beaton, B., Beyersdorf, A. J., Barrick, J., Bulzan, D., Corr, C. A., Crosbie, E., Jurkat, T., Martin, R., Riddick, D., Shook, M., Slover, G., ... Anderson, B. E. (2017). Biofuel

- blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature*, 543(7645), 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature21420>
- Nowacki, M., & Olejniczak, D. (2019). Correction of the method of assessing exhaust emission during the flight of the aircraft, including impact of changes in flight altitude on engine performance parameters. *Transportation Research Procedia*, 43, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.012>
- ÖZ, E., & YALÇINER ERCOŞKUN, Ö. (2022). Covid-19 Pandemisinin Esenboğa Havalimanı hava trafiğine ve uçak emisyonlarına etkisi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(1), 45–59. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1069097>
- ÖZ, E. (2023). *COVID-19 PANDEMİSİNİN TÜRKİYE 'DEKİ HAVALİMANLARININ HAVA TRAFİĞİNE VE UÇAK EMİSYONLARINA ETKİSİ*. GAZİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Özfirat, E. (2025). *DİYARBAKIR HAVALİMANI İÇİN UÇAK GAZ EMİSYONLARININ YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ*. FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Özgünoğlu, K., & Uygur, N. (2017). Determination of Aircraft Emissions at Kahramanmaraş Airport. *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 20(3), 24–30.
- Öztürk, O. (2011). *KAYSERİ ERKİLET HAVAALANINDAKİ UÇAK EMİSYONLARININ İNCELENMESİ*. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Öztürk, O., & Taştan, M. (2024). 2015-2021 Yılları Arasında Muğla İlinde LTO Döngüsü Esnasında B737-800 ve A320 Tip Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonun Gerçek Zamanlı Hesaplanması. *Journal of Institute Of Science and Technology*, 40(1).
- Rezo, Z., Steiner, S., Tikvica, A., & Fikleš, D. (2025). Aircraft engine emissions reporting information system. *Transportation Research Procedia*, 83, 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.03.034>
- Rohacs, J., Kale, U., & Rohacs, D. (2022). Radically new solutions for reducing the energy use by future aircraft and their operations. *Energy*, 239, 122420. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122420>
- Rolls-Royce. (1986). *The JET engine*. Rolls Royce.
- Shoukat, R., & Redondi, R. (2025). GHG emissions evaluation of conventional, electric, hybrid, biofuel, and hydrogen aircraft. *Journal of the Air Transport Research Society*, 4, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2025.100067>
- Skybrary. (2026a). *Aircraft types*. <https://skybrary.aero/aircraft-types>
- Skybrary. (2026b). *Ankara/Esenboğa International Airport*. <https://skybrary.aero/airports/ltac>

- Skybrary. (2026c). *Trabzon Airport*. <https://skybrary.aero/airports/ltcg>
- Soares, Claire. (2015). *Gas Turbines: a Handbook of Air, Land and Sea Applications*. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.
- Stettler, M. E. J., Eastham, S., & Barrett, S. R. H. (2011). Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5415–5424. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>
- Timuralp, Ç., & Mercan, F. R. (2024). UÇAKLARDAN KAYNAKLANAN KARBON EMİSYONUNUN ESKİŞEHİR HASAN POLATKAN HAVALİMANI İÇİN BELİRLENMESİ. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 1335–1342. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1436058>
- Tokuşlu, A. (2021). Calculation of Aircraft Emissions during Landing and Take-Off (LTO) Cycles at Batumi International Airport, Georgia. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(2), 186–192. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.836780>
- Turns, S. R., & Haworth, D. Connell. (2021). *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. Victor. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey*. Elsevier Academic Press.
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Xue, D., Xu, Y., Yu, S., & Liu, Z. (2025). Exploring the effects of space weather-caused satellite navigation failure on fuel consumption and aircraft emissions: A simulated study. *Transport Economics and Management*, 3, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.team.2025.10.001>
- Yılmaz, İ., & İlbaş, M. (2012). GAZ TÜRBİNLİ UÇAK MOTORLARINDA KİRLETİCİ EMİSYONLARIN İNCELENMESİ. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 343–351.
- Young, T. M., Belobaba, Peter., & Young, T. M. /Seabridge, Alla. (2019). *Performance of the Jet Transport Airplane*.