



Farklı LTO modlarının emisyon ve yakıt dağılımına etkisi: Taksi, tırmanma, yaklaşma ve kalkış karşılaştırması

Effect of different LTO modes on emissions and fuel distribution: Taxi, climb, approach and take-off comparison

Mehmet Ali Çil^{1,*} , Selim Tangöz² 

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Gövde Motor ve Bakımı Anabilim Dalı, 38280, Kayseri Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakım Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, iniş ve kalkış döngüsündeki emisyonları ve yakıt tüketimi modlara göre analiz etmek ve havalimanı işletmecilerine ve karar vericilere çevresel sürdürülebilirlik açısından veriye dayalı iyileştirme önerileri sunmaktır. Bu çalışmada, Airbus A320 ve Boeing B737 uçaklarında yaygın olarak kullanılan sekiz farklı motor tipi için kalkış, tırmanış, yaklaşma ve taksi modlarında üretilen emisyonlar ile yakıt tüketimi sayısal olarak analiz edilmiştir. Her bir uçağın iniş ve kalkış döngüsündeki HC, CO ve NO_x emisyonları ile yakıt tüketimi modlara göre karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, en fazla emisyon ve yakıt tüketimi taksi modunda gerçekleşmekte olup, yeni nesil motorlar (LEAP-1A24, LEAP-1B23) eski nesil motorlara göre daha düşük emisyon üretmektedir. Ayrıca taksi süresinde 8 dakikalık bir azalma, toplam LTO (kalkış, tırmanış, yaklaşma ve taksi döngüsü) emisyonlarını %23'e kadar, yakıt tüketimini ise %13'e kadar azaltabilmektedir. Bu durum, çevresel etkileri azaltmada operasyonel iyileştirmelerin kritik rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Havacılık, LTO döngüsü, Turbofan motorlar, Emisyon, Yakıt

1 Giriş

Sivil havacılık sektörü, hızla artan hava taşımacılığı talebiyle birlikte çevresel etkileri bakımından küresel ölçekte dikkat çeken alanlardan biri haline gelmiştir. Ulaşım sektöründeki gelişmeler sivil hava ulaşımını da pozitif yönde etkilemektedir. Sivil hava ulaşımı, yolcu ve kargo taşımacılığı açısından dünya genelinde her geçen gün artış göstermektedir. Uluslararası yolcu trafiğinin 2042'ye kadar yıllık %4.3 olarak büyümesi beklenmektedir [1]. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'nin (IATA) raporuna göre, 2050 yılında 10 milyardan fazla yolcunun uçakla seyahat etmesi beklenmektedir [2].

Uçak motorlarının çalışması sırasında ortaya çıkan kirlenici emisyonlar, havacılık sektörünün çevresel sorunlarının başında gelmektedir. Özellikle iniş-kalkış döngüsü (landing and take-off (LTO)) sürecinde üretilen emisyonlar, havalimanlarının çevresindeki hava kalitesini

Abstract

The aim of this study is to analyze emissions and fuel consumption in the landing and take-off cycle by mode and to provide data-driven improvement recommendations to airport operators and decision makers in terms of environmental sustainability. This study, emissions and fuel consumption produced during take-off, climb-out, approach, and taxi modes were numerically analyzed for eight different engine types commonly used in Airbus A320 and Boeing B737 aircraft. and taxi modes. Each aircraft's contribution to HC, CO, and NO_x emissions within the landing and take-off cycle, as well as its fuel consumption, was compared by mode. The results show that taxi mode produces the highest emissions and fuel consumption, while new-generation engines (LEAP-1A24, LEAP-1B23) are more environmentally efficient than older ones. Furthermore, an 8-minute reduction in taxi time can reduce total LTO (take-off, climb, approach and taxi cycle) emissions by up to 23% and fuel consumption by up to 13%. These findings emphasize the importance of operational improvements in minimizing environmental impacts.

Keywords: Aviation, LTO cycle, Turbofan engines, Emission, Fuel

doğrudan etkilemektedir. Günümüz uçaklarında fosil yakıtlar çoğunlukla kullanılmaktadır. Fosil yakıtlarından çıkan kirlenici emisyonların insan sağlığı ve çevreye belli bir ölçüde zararı bulunmaktadır. Uçak motorundan kaynaklanan karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), yanmamış karbon (HC) azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x) gibi çeşitli emisyonlar üretir [3]. Uçaklardan kaynaklanan CO₂, CO, HC ve NO_x emisyonları iklim değişikliği etkileyen faktörlerdendir [4, 5]. Hava ulaşım sektörünün gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan kirlenici emisyonlarda artmakta ve bununla birlikte hava kirliliği de artmaktadır. LTO emisyonları, uçakların yer seviyesine yakın olduğu operasyonlardan kaynaklandığı için doğrudan havalimanı çevresindeki hava kalitesini etkiler. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), LTO döngüsünü; kalkış (take-off), tırmanış (climb-out), yaklaşma (approach) ve taksi (taxi/idle) olmak üzere dört ana mod altında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetali.cil20@hotmail.com (M. A. Çil)

Geliş / Received: 21.05.2025 Kabul / Accepted: 10.07.2025 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

doi: 10.28948/ngumuh.1703449

tanımlamaktadır. Bu modlar genellikle yer seviyesinden 3000 fit (yaklaşık 914 metre) yüksekliğe kadar olan uçuş operasyonlarını kapsamaktadır. ICAO bir uçağın standart bir LTO döngüsünde geçirdiği ortalama süreyi: yaklaşma 4 dakika, taksi 26 dakika, kalkış 0.7 dakika ve tırmanış 2.2 dakika olarak belirlemiştir [6].

Uçak seferlerinin artması havalimanı ve yakın çevresi için bazı olumsuz durumlara neden olabilir. Özellikle uçakların havalimanına kalkış ve iniş sırasında ortaya çıkan kirletici emisyonlar yerel hava kalitesi kötü etkilemektedir. NO_x, HC, CO, CO₂ gibi emisyonlar solunum yolu hastalıkları [7], akciğer kanseri [8], astım [9], kalp krizi [10] gibi hastalıklara ve hatta erken ölümlere [11] neden olabilir. Havalimanı ve çevresindeki ölüm oranlarının %20'den fazlası LTO emisyonlarının etkisiyle ilişkilidir [12].

LTO döngüsünde üretilen emisyonlar havalimanı ve çevresi için ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda havalimanlarındaki emisyon miktarlarını, yakıt tüketimini, çevreye olan etkisi ve maliyet gibi konular ile LTO döngüsünden kaynaklanan bu zararlı etkiler araştırılmıştır. Keskin [13] 2001 yılında Türkiye'deki kırk havalimanının LTO döngüsünde üretilen emisyonlar ile yakıt tüketiminin tahmini üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Taksi süresindeki 2 dakikalık azalma ile emisyonlarda yaklaşık olarak %6'lık bir azalma olacağını belirtmiştir. Yılmaz [14] 2010 yılındaki Kayseri havaalanında LTO döngüsünde üretilen emisyonları ve yakıt tüketimini tahmin etmiştir. Taksi süresindeki 2 dakikalık azalmanın, taksi modundaki emisyonların %7 azalacağını belirtmiştir. Kafalı ve Altuntaş [15] 2016–2018 yılları arasında Dalaman Havalimanı'ndaki ticari uçuşlardan kaynaklanan HC, CO ve NO_x emisyonlarının miktarları hesaplanmaya çalışılmış ve bu emisyonların üç yıllık süreçte uçuş sayısı ile birlikte nasıl değişim gösterdiği analiz edilmiştir. Ekici ve Şöhret [16] temmuz 2018 ayında Antalya Uluslararası Havalimanı'ndaki uçaklardan yayılan egzoz gazlarının çevresel ve ekonomik yönleri araştırmışlardır ve bu araştırmanın sonucunda havayolları ve uçak tipleri arasında B737 ailesi uçaklarının emisyon değerlerinin daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ekici ve Sevinç [17] 2018 yılında Türk Hava Yollarının sahip olduğu uçakların LTO döngüsünde üretilen emisyonlarını ve yakıt tüketimini analiz etmiş ve bu analizler ile hangi uçağın hangi emisyonlarını daha fazla ürettiğini belirtmişlerdir. Aygün ve Çalışkan [18] çeşitli turbofan motor ailelerinin termodinamik tabanlı çevresel ve çevresel-ekonomik değerlendirmeleri ve uçakların LTO döngüsünde ürettikleri emisyon değerleri üzerine çalışma yapmıştır. HC, CO, CO₂ ve NO_x emisyonları karşılaştırıldığında tırmanma aşamasında en fazla NO_x emisyonlarının üretildiğini belirtmişlerdir. Dönmez ve Çeçen [19] İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı'ndaki kalkış yapacak uçakların taksi operasyonları sırasında tükettikleri yakıt miktarlarının ve kirletici emisyonlarının analizini yapmışlardır. Çil ve Tarhan [20] 2022 yılında Denizli Çardak havaalanındaki LTO döngüsünde üretilen emisyonları ve yakıt tüketimini tahmin etmiştir. 2022 yılında Denizli Çardak Havalimanı'nda LTO döngüsü sırasındaki toplam uçak emisyonlarının 74.64 t/y (NO_x için 37.148 t/y, CO için 35.398 t/y ve HC için 2.094 t/y) olduğu hesaplanmışlardır.

Turgut vd. [21] standart ICAO standart verileri ile gerçek koşullarda oluşan verileri karşılaştırmışlardır. Dokuz binden fazla uçuş incelenmiş, bazı durumlar haricinde ICAO standart verilerinin genel değerlendirmeler için faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Kuzu [22] yaptığı çalışmada 2015'teki Atatürk Havalimanı'ndaki HC, CO ve NO_x emisyonlarını analiz etmiştir. Canarslanlar [23] çalışmasında, ICAO'nun tanımladığı ortalama LTO döngü süreleri ile Türkiye'deki belirli havalimanlarında gözlemlenen gerçek LTO süreleri karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Zhou vd. [24] Çin'deki 204 farklı havalimanında LTO döngüsünden kaynaklanan emisyonları saatlik olarak hesaplamaya çalışmışlardır. LTO da üretilen emisyonlar ile ilgili uluslararası havalimanlarında da detaylı araştırmalar yapılmıştır. İngiltere'de [25], Lübnan'da [26], Çin'de [27], Tayland'da [28], Gürcistan'da [29], İsviçre'de [30], Arjantin'de [31] yapılan araştırmalar bulunmaktadır.

Günümüzde emisyon konusu güncel bir çalışma alanıdır. Farklı alanlardan kaynaklanan kirletici emisyonlar ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Paris Anlaşmasında kabul edilen, küresel sıcaklık artışının 2°C'nin altında sınırlanması gerekliliği için emisyonlar üzerine de yoğun ilgi başlamıştır [32]. Karbon yakalama teknolojisi [33], hava kirliliğinin insan sağlığına etkisi [34], emisyonların sosyo-ekonomik ve çevresel etkileri [35], yerel hava kalitesinin PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ verileri ile incelenmesi [36] gibi emisyonlar üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar genellikle motor tipi ayrımı yapmaksızın uçakların LTO sürecinde ürettiği emisyon miktarları ve yakıt tüketimi üzerine odaklanmaktadır. Tokuşlu [29] yaptığı çalışmada uçak tiplerine farklı LTO modlarındaki emisyon oranlarını analiz etmiştir. Weijun vd. [37] Embraer uçaklarında kullanılan CF34-10A motor tipini farklı LTO modlarındaki emisyon ve yakıt tüketimini analiz etmişlerdir. Bu literatür çalışmalarında üretilen toplam emisyon ve yakıt tüketiminin hangi modlarda nasıl olduğuna dair sınırlı bilgi bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, sekiz farklı motor tipinde LTO döngüsünü oluşturan dört ana mod için üretilen emisyon ve tüketilen yakıt miktarı sayısal ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. ICAO emisyon verileri kullanılarak her bir modun HC, CO ve NO_x emisyonuna katkısı incelenmiştir. LTO döngüsündeki her bir mod, süre, güç ayarı ve yakıt tüketimi bakımından farklılık gösterdiği için HC, CO ve NO_x gibi emisyonların üretim düzeyi de değişmektedir. Modlara göre bu dağılımın doğru anlaşılması; havalimanı operasyonlarının çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, motor tasarımı ve uçuş prosedürlerinin optimize edilmesi ve yerel hava kirliliği yönetimi açısından hayati önem taşır. Bu bağlamda, emisyonların modlara göre dağılımının anlaşılması, özellikle yerel hava kalitesi, gürültü kontrolü ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, LTO döngüsünü oluşturan dört temel modunda üretilen emisyon ve tüketilen yakıt miktarı sayısal ve karşılaştırmalı olarak incelemektir. ICAO emisyon veri tabanı esas alınarak seçilen motorlara ait HC, CO ve NO_x emisyonları, yakıt akışı ve zaman verileri ile birleştirilerek analiz edilmiştir. Çalışma, havalimanı

yönetimleri, politika yapıcılar ve uçak üreticilerine yönelik operasyonel iyileştirme ve çevresel strateji önerileri sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca çalışmanın bir diğer özgün katkısı, modlara göre optimize edilebilecek operasyonel stratejilere altyapı sağlamasıdır. Bu yönüyle sunulan araştırma hem havacılık mühendisliği hem de çevre yönetimi açısından literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2 Materyal ve metod

Airbus A320 ve Boeing B737 uçaklarında kısa-orta mesafeli uçuşlar için yaygın olarak kullanılan farklı motorlar seçilip emisyon ve yakıt analizi yapılmıştır. Araştırma kapsamında, çift motorlu dar gövdeli uçaklar olan Airbus A320 ve Boeing B737 serileri için kullanılan toplam 42 farklı motor tipi analiz edilmiştir. Belirlenen 42 farklı motor tipi arasından, her bir uçak serisi (A320 ve B737) için dört farklı motor seçilmiştir. Bu seçim sürecinde, ilgili uçakların hem eski nesil hem de yeni nesil motor tipleri dikkate alınarak sayısal ve karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Seçilen 8 farklı motor tipi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Buradaki amaç kullanılan farklı motor tiplerini seçerek uçakların emisyonu ve yakıtına olan etkisini incelemektir.

‘International Aero Engines’ şirketi tarafından üretilen V2500-A1 motoru, ‘CFM International’ şirketi tarafından üretilen CFM56-5B4, CFM56-7B20, CFM56-3C-1, LEAP-1B23 ve LEAP-1A24 motorları, ‘Pratt Whitney’ şirketi tarafından üretilen JT8D-7 ve PW1133G-JM motorları detaylı olarak incelenmiştir. Airbus A320 ve Boeing 737 uçaklarında kullanılan sekiz farklı motor tipi seçilmiştir. Aşağıdaki Tablo 1’de A320’ye ve B737’ye ait motor tipleri verilmiştir.

Tablo 1. Motor tipleri

A320 Serisi	B737 Serisi
V2500-A1	CFM56-7B20
CFM56-5B4	CFM56-3C-1
LEAP-1A24	LEAP-1B23
PW1133G-JM	JT8D-7

Analizi yapılacak motor tiplerine ait veriler, ICAO Motor Emisyon Veri Bankasından alınarak Tablo 2’de sunulmuştur [38].

Tablo 2. Motor tiplerinin yakıt akışı ve emisyon verileri

Motor Tipi	Mod	Yakıt Akışı (kg/s)	HC (g/kg)	CO (g/kg)	NO _x (g/kg)
V2500-A1	Kalkış	1.113	0.10	0.55	37.13
	Tırmanış	0.924	0.11	0.55	30.82
	Yaklaşma	0.334	0.15	0.77	13.45
	Taksi	0.124	0.22	7.76	5.91
CFM56-5B4	Kalkış	1.166	0.10	0.50	28.70
	Tırmanış	0.961	0.10	0.50	23.30
	Yaklaşma	0.326	0.13	2.33	10.00
	Taksi	0.107	3.87	31.90	4.30
LEAP-1A24	Kalkış	0.745	0.02	0.24	17.59
	Tırmanış	0.616	0.02	0.41	9.41
	Yaklaşma	0.219	0.05	3.53	8.02
	Taksi	0.087	0.37	23.79	4.45
PW1133G-JM	Kalkış	1.023	0.02	0.23	25.46
	Tırmanış	0.839	0.05	0.22	19.84
	Yaklaşma	0.278	0.02	3.44	9.40
	Taksi	1.023	0.02	0.23	25.46
CFM56-7B20	Kalkış	0.913	0.10	0.60	20.50
	Tırmanış	0.761	0.10	0.50	17.40
	Yaklaşma	0.274	0.10	3.20	9.50
	Taksi	0.100	3.10	25.90	4.30
CFM56-3C-1	Kalkış	1.154	0.03	0.90	20.70
	Tırmanış	0.954	0.04	0.90	17.80
	Yaklaşma	0.336	0.07	3.10	9.10
	Taksi	0.124	1.42	26.80	4.30
LEAP-1B23	Kalkış	0.916	0.04	0.16	38.19
	Tırmanış	0.752	0.04	0.14	18.11
	Yaklaşma	0.253	0.05	1.36	10.70
	Taksi	0.091	0.64	15.61	4.63
JT8D-7	Kalkış	0.989	0.25	0.90	17.20
	Tırmanış	0.811	0.25	1.10	14.00
	Yaklaşma	0.286	0.40	2.20	6.30
	Taksi	0.129	3.80	14.30	3.15

Bu motorlardan LEAP-1A24, LEAP-1B23, PW1133G-JM ve JT8D-7 yeni nesil motor tipidir. Bu çalışmanın bir diğer amacı da yeni geliştirilen motorların LTO döngüsündeki emisyon ve yakıt analizlerini yapmaktır.

Bu çalışmadaki analizler, standart bir LTO döngüsü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çil vd. [39] yaptığı çalışmaya göre, uçaklar her bin uçuşta ortalama 3-4 kez pas geçme manevrası gerçekleştirmektedir. Bu tür pas geçme durumları, LTO döngüsündeki emisyon ve yakıt tüketimini sırasıyla %40 ve %60 oranında artırabilmektedir [39].

Bu çalışmada ICAO tarafından belirlenen standart LTO döngüsü zamanlaması üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 3'te ICAO tarafından belirlenen standart LTO döngüsünün modları, güç yüzdesi ve süresi verilmiştir [6, 38]. LTO döngüsü ortalama toplamda 32.9 dakika sürmektedir. Bu süre havalimanı operasyonu, hava durumu, havalimanı büyüklüğüne göre değişiklik gösterebilir.

Tablo 3. LTO'daki güç ayarı ve zaman göstergesi [6, 38]

Mod	Güç Ayarı (%)	Süre (dakika)
Kalkış	100	0.7
Tırmanış	85	2.2
Yaklaşma	30	4.0
Taksi	7	26.0

Uçaklar motorlarından kaynaklanan emisyonlar Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır ($E_{v,y}$: mod y için kirletici v'nin yıllık emisyonu (kg/y), m_u : u tipi uçağın motor sayısı $I_{u,k}$: motor tipi k olan u tipi uçağın yıllık LTO çevrimi sayısı, $F_{u,k,y}$: motor tipi k olan u tipi uçağın mod y'de yakıt tüketimi (kg/s), $E_{k,y,v}$: motor tipi k ve mod y ile kirletici v için emisyon faktörü (g/kg), $t_{y,u}$: uçak tipi u için mod y'de geçen süre (s)) [13, 40].

$$E_{v,y} = \sum_u \sum_k m_u I_{u,k} F_{u,k,y} E_{k,y,v} t_{y,u} \quad (1)$$

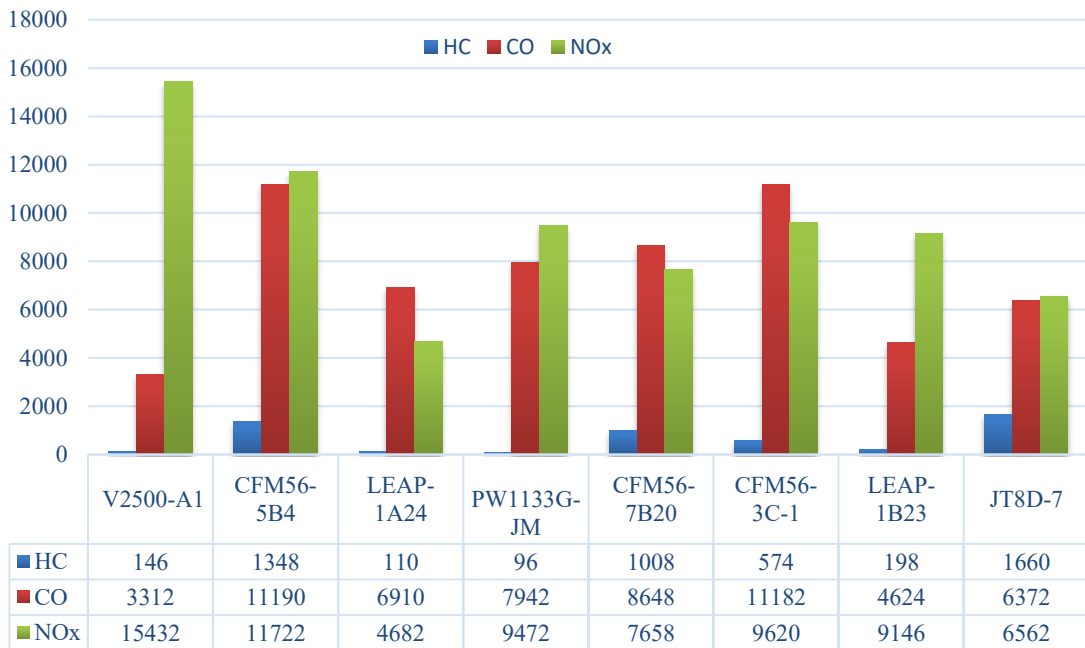
Tablo 4'te uçaklarda kullanılan JetA-1 yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir [41].

Tablo 4. JetA-1 yakıtının özellikleri

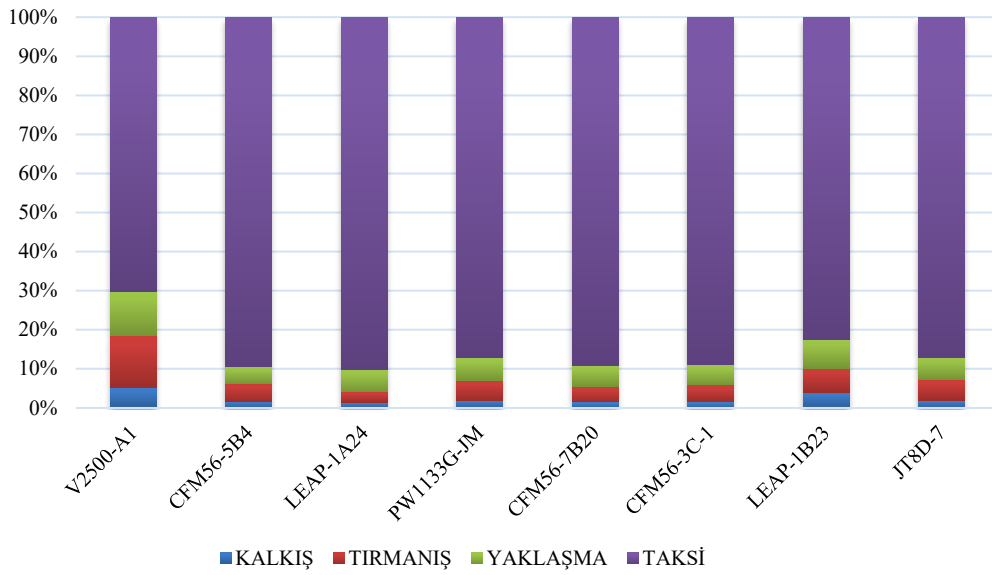
Özellikler	JetA-1
Yoğunluk 15.5 °C'de	0.797
Kinematik Viskozite, Cst, 40 °C'de	1.08
Akma Noktası (°C)	-43
Parlama Noktası (°C)	39
Hidrojen İçeriği (%kütle)	13.48
Karbon İçeriği (%kütle)	86.51
Yüksek Kalorifik Değer (kJ/kg)	46.329
Düşük Kalorifik Değer (kJ/kg)	43.465

3 Bulgular ve tartışma

Şekil 1'de analizi yapılacak motorların LTO döngüsünde tek seferde üretecekleri toplam emisyon miktarları gram olarak verilmiştir [38]. Şekil 1'e bakıldığında LTO döngüsünde en fazla emisyon üreten motor tipleri sırasıyla CFM56-5B4, CFM56-3C-1 ve V2500-A1 olarak görülmektedir. Bu döngüde en az emisyon üreten motor tipleri ise sırasıyla LEAP-1A24, LEAP-1B23 ve JT8D-7'dir. Şekil 1'e göre yeni nesil motorların %7.3-51.76 oranında daha az emisyon ürettiği görülmektedir. Karşılaştırılması yapılan motorlar içerisinde en fazla NO_x emisyonu üreten motor tipi V2500-A1, en fazla CO emisyonu üreten motor tipleri CFM56-5B4 ve CFM56-3C-1, en fazla HC emisyonu üreten motor tipi JT8D-7'dir. Bu motorlardan 5 tanesi daha fazla NO_x emisyonu üretirken 3 tanesi CO emisyonunu daha fazla üretmektedir.



Şekil 1. Farklı motor tiplerinin LTO döngüsünde ürettikleri toplam emisyon miktarları (g)



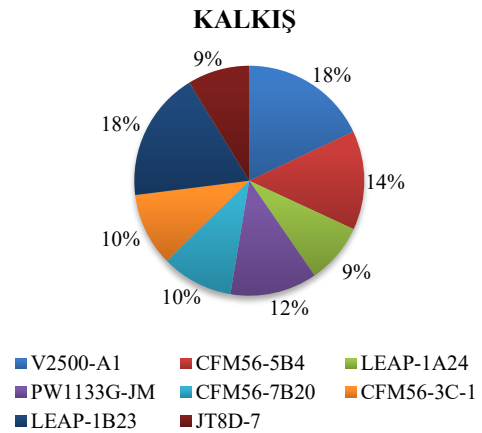
Şekil 2. Farklı motor tiplerinin operasyonel modlara göre toplam emisyon oranlarının dağılımı

Şekil 2’de toplam üretilen emisyonların modlara göre oranı görülmektedir. Bu grafiğin oluşturulma amacı, hangi modlarda gelişim yapmak emisyon oranlarına daha iyi sonuç verir, sorusuna cevap bulmaktır.

Şekil 2’de farklı motorların ürettiği emisyonların modlara göre dağılımını görmek mümkündür. V2500-A1 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %70 taksi, %14 tırmanış, %11 yaklaşma ve %5 kalkış. CFM56-5B4 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %89 taksi, %5 tırmanış, %4 yaklaşma ve %2 kalkış. LEAP-1A24 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %90 taksi, %6 yaklaşma, %3 tırmanış ve %1 kalkış. PW1133G-JM motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %87 taksi, %6 yaklaşma, %5 tırmanış ve %2 kalkış. CFM56-7B20 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %89 taksi, %5 yaklaşma, %4 tırmanış ve %2 kalkış. CFM56-3C-1 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %89 taksi, %5 yaklaşma, %4 tırmanış ve %2 kalkış. LEAP-1B23 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %83 taksi, %7 yaklaşma, %6 tırmanış ve %4 kalkış. JT8D-7 motorunun ürettiği emisyonların dağılımı modlara göre şu şekildedir; %87 taksi, %6 yaklaşma, %5 tırmanış ve %2 kalkış. Şekil 2’ye göre tüm motor tipleri için taksi modu en fazla emisyonun ürettiği moddur. En az emisyon ise kalkış modunda üretilmiştir. Taksi ile tırmanış modları arasındaki temel fark zamandan kaynaklanmaktadır. V2500-A1 ve CFM56-5B4 motor tipi için tırmanış modunda üretilen emisyon yaklaşma modunda üretilen emisyonlardan daha fazladır. Diğer motorlar için bu durumun tam tersidir. Tırmanış modu 2.2 dakika sürmektedir. Yaklaşma modu 4 dakika sürmektedir. İki mod arasındaki emisyon farklılıklarının, yalnızca operasyon süresi değil, güç ayar seviyeleriyle de doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Daha yüksek güç ayarında toplamda daha fazla emisyon üretilmektedir. Bunun nedeni güç ayarının artması ile

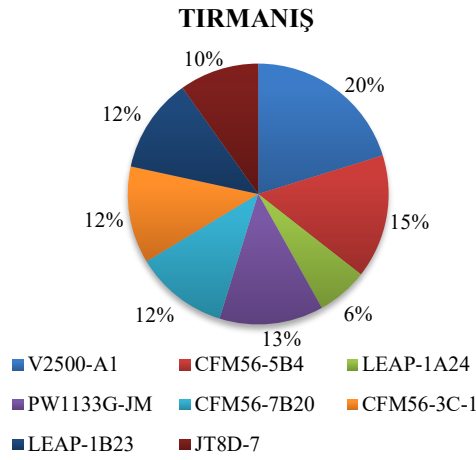
motordan kaynaklanan NO_x emisyon miktarının artmasına bağlanabilir. Taksi süresi (26 dk) diğer modlara göre uzun olduğu için en fazla emisyon bu modda üretilmektedir. Şekil 2’ye göre farklı motor tiplerine bakılacak olursa LTO döngüsünde üretilen toplam emisyon miktarının yaklaşık %70-90’ı taksi modunda üretilmektedir. Taksi süresinin azalması toplam emisyon miktarını ciddi bir şekilde aşağıya çekecektir. İncelenen sekiz farklı motorun LTO döngüsünde ürettikleri toplam emisyon miktarı ortalama olarak %2.875’i kalkış modunda, %5.375’i tırmanış modunda ve %6.25’i yaklaşma modundadır. Uçak aerodinamiğinin gelişmesi, motor tiplerinin gelişmesi, havalimanı operasyonlarının daha kontrollü yapılması ile standart LTO döngüsü zamanı azalacaktır. Bunun sonucunda çevreye verilen kirletici emisyonlarda azalacaktır.

Aşağıdaki Şekil 3-6’te incelenen motorların kendi aralarındaki modlara göre emisyon üretim oranları verilmiştir.

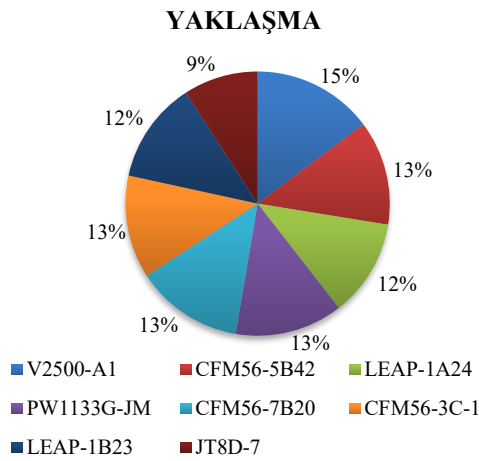


Şekil 3. Farklı motor tiplerinin kalkış modunda ürettiği toplam emisyonların karşılaştırılması

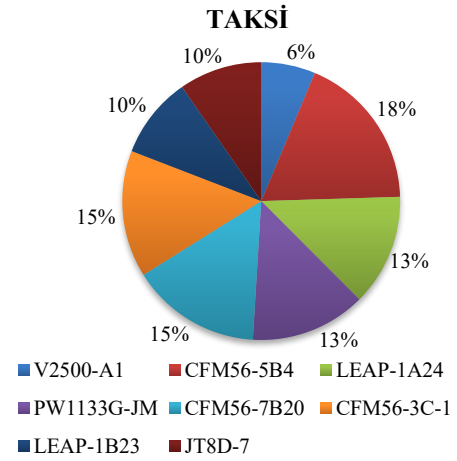
Şekil 3'e göre kalkış modunda en fazla emisyon üreten motorlar V2500-A1 ve LEAP-1B23, en az emisyon üreten motorlar JT8D-7 ve LEAP-1A24'tür.



Şekil 4. Farklı motor tiplerinin tırmanış modunda ürettiği toplam emisyonların karşılaştırılması

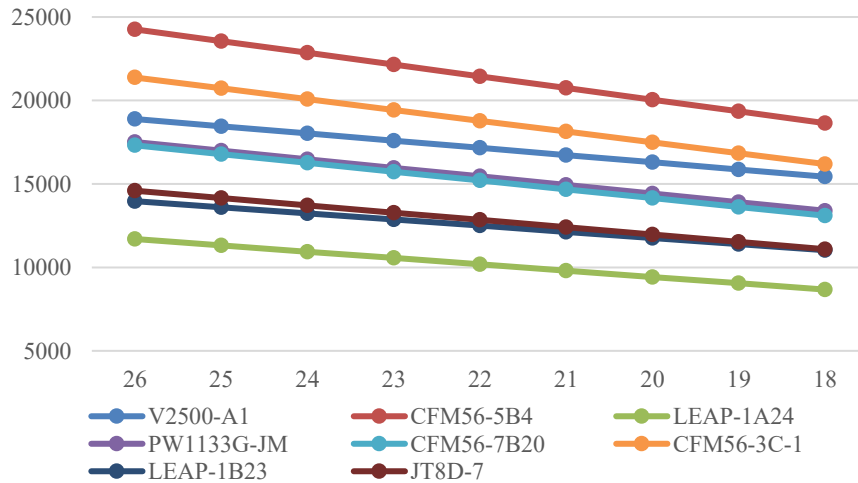


Şekil 5. Farklı motor tiplerinin yaklaşma modunda ürettiği toplam emisyonların karşılaştırılması



Şekil 6. Farklı motor tiplerinin taksi modunda ürettiği toplam emisyonların karşılaştırılması

Şekil 4'e göre tırmanış modunda en fazla emisyon üreten motor V2500-A1, en az emisyon üreten motor LEAP-1A24'tür. Şekil 5'e göre yaklaşma modunda en fazla emisyon üreten motor V2500-A1, en az emisyon üreten motor JT8D-7'dir Şekil 6'ya göre taksi modunda en fazla emisyon üreten motor CFM56-5B4, en az emisyon üreten motor V2500-A1'dir. Şekil 1'de en çok emisyon üreten motor tipi CFM56-5B4 olduğu görülmektedir. Şekil 3-5'e göre kalkış, tırmanış ve yaklaşma modunda en fazla emisyon üreten motor tipi V2500-A1'dir. Buradan da görüldüğü taksi modundaki üretilen emisyon toplam emisyonu diğer modlardan daha fazla etki etmektedir. Taksi süresinde yapılacak azalmalar toplam üretilen emisyonunda büyük etki yapacaktır. Şekil 3-6'da sunulan karşılaştırmalarda, her motor tipinin farklı miktarda yakıt tüketmesi nedeniyle emisyon miktarlarında da değişkenlik gözlemlenmektedir. Aşağıdaki Şekil 7'de taksi süresinin azalmasına bağlı olarak LTO döngüsündeki toplam üretilen emisyon (HC-CO-NO_x) miktarlarının değişim grafiği verilmiştir



Şekil 7. Taksi süresinin LTO döngüsünde üretilen emisyonlara etkisi (g)

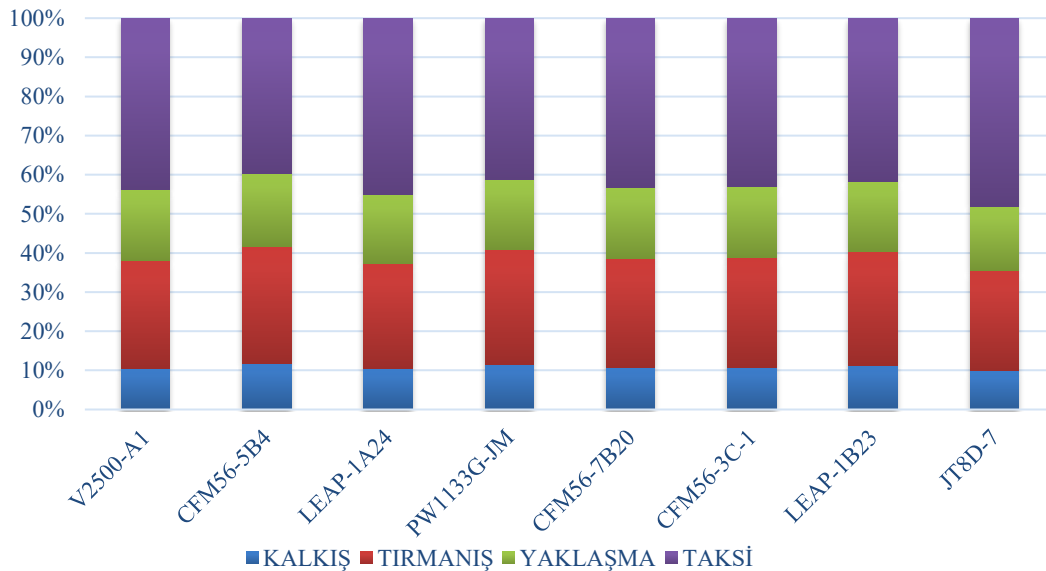
Şekil 7’de üretilen emisyonların taksi modundaki sürenin birer dakika azalmasıyla LTO döngüsündeki toplam üretilen emisyon miktarının nasıl azalacağını göstermektedir. Taksi süresindeki 8 dakikalık azalmaya kadar hesaplama yapılmıştır. Örnek olarak Şekil 7’ye göre taksi modundaki 8 dakikalık azalma ile toplam emisyon miktarında V2500-A1 motoru için %18.29, CFM56-5B4 motoru için %23.15, LEAP-1A24 motoru için %25.89, PW1133G-JM motoru için %23.49, CFM56-7B20 motoru için %24.34, CFM56-3C-1 motoru için %24.24, LEAP-1B23 motoru için %21.02 ve JT8D-7 motoru için %23.99 oranında azalma olmaktadır. İncelenen 8 farklı motor için taksi modundaki 8 dakikalık bir azalma ile LTO döngüsündeki toplam üretilen emisyon miktarı ortalama olarak %23.05 oranında azalacaktır. Benzer şekilde taksi modundaki 5 dakikalık bir azalmanın LTO döngüsündeki toplam üretilen emisyon miktarı %14.41 oranında azalacaktır. LTO döngüsünde taksi süresindeki azalmaların LTO döngüsündeki üretilen toplam emisyon miktarını önemli ölçüde azaltacaktır. Tablo 5’te A320 ve B737 kullanılan sekiz farklı motorun tek seferde LTO döngüsü içinde tüketilen yakıt miktarlarını göstermektedir [38].

Tablo 5. LTO döngüsünde tüketilen toplam yakıt miktarları (kg)

Motor tipi	Yakıt Miktarı
V2500-A1	884
CFM56-5B4	842
LEAP-1A24	602
PW1133G-JM	676
CFM56-7B20	722
CFM56-3C-1	896
LEAP-1B23	680
JT8D-7	838

Tablo 5’e göre LTO döngüsü içerisinde en fazla yakıt tüketimi yapan motor tipleri sırasıyla CFM56-3C-1, V2500-A1, CFM56-5B4 ve JT8D-7’dir. Bu döngüde en az yakıt tüketimi yapan motor tipleri ise sırasıyla LEAP-1A24, PW1133G-JM ve LEAP-1B23’tür. Tablo 5’e göre A320 serisi motor tipleri için yeni nesil motorların kullanılması ile LTO döngüsündeki yakıt tüketimi %19.71-31.9 oranında azalış gösterecektir. Yakıt tüketiminin azalması havayolu işleticilerinin maliyetlerini azaltacak ve yerel hava kalitesine önemli derecede etkisi olacaktır. Şekil 8’de LTO döngüsünde tüketilen toplam yakıt miktarının modlara göre oranı görülmektedir.

Şekil 8’de farklı motorların tükettiği yakıt miktarının modlara göre dağılımını görmek mümkündür. V2500-A1 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %44 taksi, %28 tırmanış, %18 yaklaşma ve %10 kalkış. CFM56-5B4 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %40 taksi, %30 tırmanış, %18 yaklaşma ve %12 kalkış. LEAP-1A24 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %45 taksi, %27 tırmanış, %18 yaklaşma ve %10 kalkış. PW1133G-JM motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %41 taksi, %30 tırmanış, %18 yaklaşma ve %11 kalkış. CFM56-7B20 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %43 taksi, %28 tırmanış, %18 yaklaşma ve %11 kalkış. CFM56-3C-1 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %43 taksi, %28 tırmanış, %18 yaklaşma ve %11 kalkış. LEAP-1B23 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %42 taksi, %29 tırmanış, %18 yaklaşma ve %11 kalkış. JT8D-7 motorunun tükettiği yakıt miktarının dağılımı modlara göre şu şekildedir; %48 taksi, %26 tırmanış, %16 yaklaşma ve %10 kalkış. Şekil 8’e göre tüm motor tipleri için taksi modu en fazla yakıt tüketimin olduğu moddur.

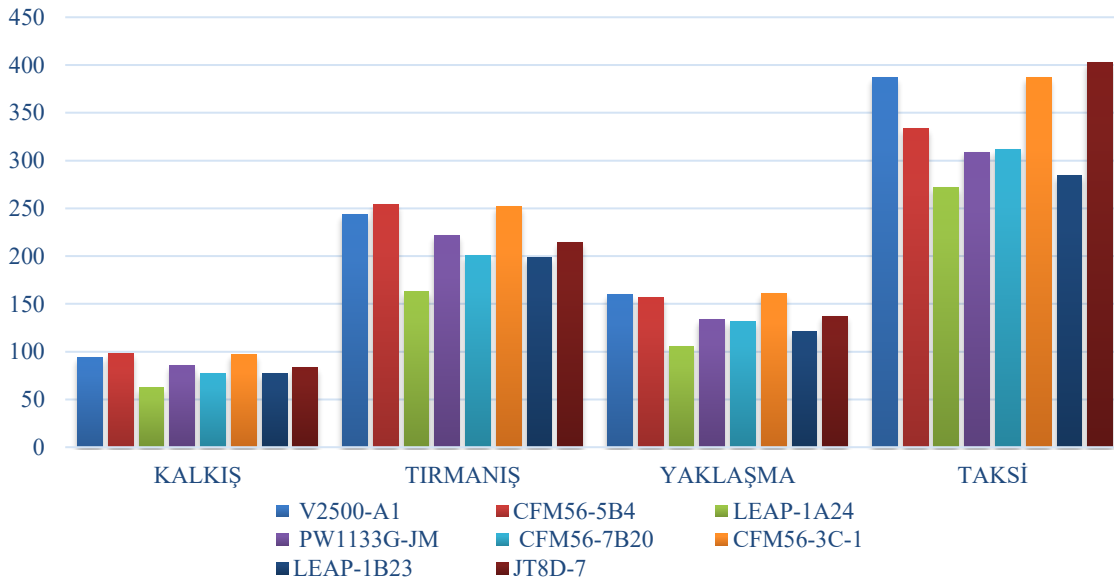


Şekil 8. Farklı motor tiplerinin operasyonel modlara göre toplam yakıt tüketim oranlarının dağılımı

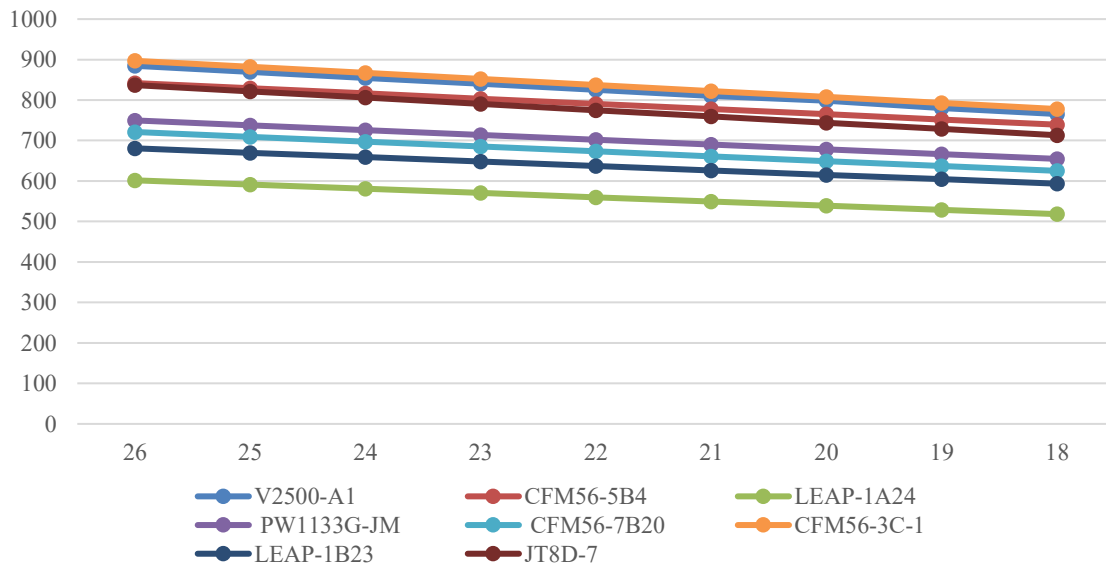
En az yakıt tüketimi ise kalkış modundadır. Şekil 8'e göre tırmanış modunda tüketilen yakıt miktarı yaklaşma modunda tüketilen yakıt miktarından daha fazladır. Tırmanış modunda geçen süre daha az olmasına rağmen yaklaşma modundan daha fazla emisyon üretmesinin sebebi yaklaşma modundaki motor gücü gereksinimin daha az olmasıdır. Taksi modunda daha az motor gücü gerekirken en fazla yakıt tüketiminin bu modda olması zamandan kaynaklanmaktadır. Şekil 8'e göre LTO döngüsünde tüketilen yakıtın %43.25'i taksi modunda, %10.75'i kalkış modunda, %28.25'i tırmanış modunda ve %17.75'i yaklaşma modundadır. Motor tiplerinin modlara göre yakıt tüketim değerlerinin verildiği Şekil 9'a göre kalkış modunda en az yakıt tüketimi olan motor tipi LEAP-1A24, en fazla yakıt tüketimi gerçekleştiren motor tipi CFM56-5B4'tür.

Benzer şekilde diğer modlara bakacak olursak, tırmanış modunda en az yakıt tüketimi olan motor tipi LEAP-1A24, en fazla yakıt tüketimi gerçekleştiren motor tipi CFM56-5B4, yaklaşma modunda en az yakıt tüketimi olan motor tipi LEAP-1A24, en fazla yakıt tüketimi gerçekleştiren motor tipi CFM56-3C-1, taksi modunda en az yakıt tüketimi olan motor tipi LEAP-1A24, en fazla yakıt tüketimi gerçekleştiren motor tipi JT8D-7'dir. Taksi süresinin diğer modlardan fazla olması nedeniyle bu modda tüketilen toplam yakıt miktarı diğer modlardan fazladır.

Şekil 10'da taksi süresinin azalmasına bağlı olarak LTO döngüsündeki tüketilen toplam yakıt miktarının değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 9. Motor tiplerinin modlara göre yakıt tüketim miktarı (kg)



Şekil 10. Taksi süresinin LTO döngüsünde tüketilen yakıt miktarına etkisi (kg)

Şekil 10'da tüketilen yakıt miktarının taksi modundaki sürenin birer dakika azalmasıyla LTO döngüsündeki tüketilen toplam yakıt miktarının nasıl azalacağını göstermektedir. Taksi süresindeki 8 dakikalık azalmaya kadar hesaplama yapılmıştır. Örnek olarak **Şekil 10'a** göre taksi modundaki 8 dakikalık azalma ile tüketilen toplam yakıt miktarı V2500-A1 motoru için %13.45, CFM56-5B4 motoru için %12.19, LEAP-1A24 motoru için %13.87, PW1133G-JM motoru için %12.67, CFM56-7B20 motoru için %13.31, CFM56-3C-1 motoru için %13.27, LEAP-1B23 motoru için %12.83 ve JT8D-7 motoru için %14.79 oranında azalma olacaktır. İncelenen 8 farklı motor için taksi modundaki 8 dakikalık bir azalma ile LTO döngüsündeki tüketilen toplam yakıt miktarı ortalama olarak %13.30 oranında azalma olacaktır. Benzer şekilde taksi modundaki 5 dakikalık bir azalmanın LTO döngüsündeki tüketilen toplam yakıt miktarını %8.31 oranında azaltacaktır.

Taksi süresinin kısaltmak için alternatif taksi yollarının planlaması ve taksi yollarının kısa olması uçakların pist ve apron arasında daha az zaman harcamasını sağlar. Mevcut taksi yolları, trafik akışını optimize edecek şekilde yeniden düzenlenmeli ve alternatif güzergâhlar oluşturulmalıdır. Ayrıca geleneksel olarak bir pistin aynı anda yalnızca iniş ya da kalkış için kullanıldığı sistem yerine, çok pistli havalimanlarında paralel pistlerin eşzamanlı kullanımı, yerde bekleyen uçak sayısını azaltarak taksi süresini önemli ölçüde kısaltabilir. Buna ek olarak, modern hava trafik yönetimi sistemlerinin kullanımı da operasyonel iyileştirmeler açısından büyük avantaj sağlar. Bu sistemler, iniş ve kalkış yapan uçakları gerçek zamanlı analiz ederek uçaklara en kısa ve uygun güzergâhları sunabilir. Böylece, pist kullanımı daha verimli hâle gelirken, uçakların taksi süresi boyunca gereksiz beklemeleri engellenmiş olur. Teknoloji destekli bu tür uygulamalar hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de havalimanı operasyonlarının verimliliğinin artırılmasına doğrudan katkı sağlar.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, farklı motor tiplerine bağlı emisyon analizleri açısından değerlendirildiğinde, literatürle yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Örneğin, Keskin [13] ve Yılmaz [14] çalışmalarında taksi süresinin 2 dakika azaltılmasıyla emisyon oranlarında motor tipine bağlı olarak %6–7 oranında düşüş elde edildiği bildirilmiştir; bu bulgu, mevcut çalışmanın sonuçlarıyla paralellik arz etmektedir. Benzer şekilde, Tokuşlu [29] tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı LTO modlarındaki emisyon dağılımına ilişkin elde edilen bulgular ile bu çalışmadaki sonuçlar arasında yapısal bir benzerlik gözlemlenmiştir. Çil ve Tarhan [20] tarafından yapılan yeni nesil motor analizleri de bu çalışmadaki değerlendirmelerle tutarlıdır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, havacılıkta kullanılan turbofan motorların ICAO'nun belirlediği LTO döngüsü kapsamında (taksi, kalkış, tırmanma ve yaklaşma) emisyon ve yakıt performansları açısından detaylı şekilde analiz edilmiştir. Özellikle HC, CO ve NO_x gibi çevreye zararlı emisyonların farklı LTO modlarındaki dağılımları incelenmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular, sadece motor

tasarımı açısından değil, aynı zamanda operasyonel kararların çevresel etkileri bakımından da önemli çıkarımlar sunmaktadır.

İlk olarak genel sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm motor tipleri için en fazla emisyonun taksi modunda üretildiği görülmüştür. Ortalama olarak üretilen toplam emisyonların %85.5 taksi modunda üretilmektedir. Bu durumun temel sebebi, taksi modunun diğer modlara göre çok daha uzun sürmesidir (26 dk). Taksi sırasında kullanılan güç oldukça düşük olmasına rağmen sürenin uzunluğu, bu modun toplam emisyon üzerindeki etkisini artırmaktadır. Bu nedenle, taksi süresinde yapılacak her türlü kısaltma (yer operasyonlarının optimize edilmesi ya da alternatif taksi yöntemlerinin kullanılması) emisyonları ciddi oranda düşürebilecektir. Çalışmanın en dikkat çekici çıktılarından biri, yalnızca 5 ila 8 dakikalık taksi süresi azalmasının, toplam LTO emisyonlarını ortalama %14–23 oranında azaltabildiği, yakıt tüketiminde ise %8–14'e varan tasarruf sağladığıdır. Bu durum, çevreye verilen zararın azaltılmasında motor teknolojisinin yanı sıra havaalanı yer operasyonlarının da kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, havalimanı altyapısının ve uçuş planlamalarının, emisyon etkilerini göz önünde bulunduracak şekilde yeniden yapılandırılması önerilmektedir.

Motor bazlı karşılaştırmalar yapıldığında, yeni nesil motorlar olan LEAP-1A24 ve LEAP-1B23'ün, genel anlamda daha düşük emisyon ve yakıt tüketimi değerleri sunduğu görülmektedir. Bu motorlar, özellikle düşük güç modlarında daha verimli çalışarak HC ve CO gibi yanma kaynaklı kirleticileri azaltmada başarılı olmuştur. Bununla birlikte, bu motorlarda NO_x emisyonlarının nispeten daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, modern motorlarda kullanılan yüksek basınçlı yanma sistemlerinin daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasından kaynaklanabilir. Yani, yüksek verimlilik bazı emisyon türlerinde artışa neden olabilir, bu da motor tasarımında çok boyutlu optimizasyon ihtiyacını gündeme getirmektedir. Emisyon ve yakıt grafikleri analiz edildiğinde JT8D-7 motor tipi için üretilen HC, CO ve NO_x emisyonlarının diğer motor tiplerine göre az olmasına rağmen tüketilen yakıt miktarının fazla olduğu görülmektedir. Buradan JT8D-7 motorunda yanma tepkimeleri sonucunun diğer motorlara göre daha homojen olduğu, ideal yanma tepkimesinin daha iyi olduğunu sonucunu çıkarmak mümkündür. Daha eski nesil motorlardan olan V2500-A1, CFM56-5B4 ve CFM56-3C-1, özellikle NO_x ve CO açısından daha yüksek emisyon değerleriyle öne çıkmaktadır. Bunlar içinde özellikle CFM56-5B4, toplam emisyon ve yakıt tüketimi açısından en yüksek değerlere sahip motor tipi olarak dikkat çekmiştir. Bu durum, havacılıkta sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda bu tip motorların kademeli olarak daha çevreci teknolojilerle değiştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yeni nesil motorların ürettiği emisyon değerlerinde anlamlı bir azalma gözlemlenmiştir. Motor tipine bağlı olarak bu oran %50'lere kadar çıkabilir. Yakıt tüketimi açısından da benzer bir dağılım söz konusudur. Yeni nesil motorlar yakıt açısından daha verimli çalışmakta, bu da hem çevresel fayda hem de işletme maliyetleri açısından avantaj sağlamaktadır.

Özellikle LEAP serisi motorlar toplam yakıt tüketimi bakımından diğer motor tiplerine göre daha iyi performans sergilemektedir.

Bu analizlerin bir diğer önemli çıktısı ise, modlara göre emisyon ve yakıt dağılımının farklı motorlar için benzer eğilimler göstermesidir. Örneğin bazı motorlarda tırmanış modunun toplam emisyonu katkısı daha yüksekken, bazılarında yaklaşma modundaki katkı daha fazladır. Bu da motor tasarımının, yalnızca maksimum güç üretimi üzerinden değil, farklı uçuş modları için optimize edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Güç ayarının artmasıyla birlikte üretilen NO_x emisyon oranı artmakta HC ve CO emisyon oranı azalmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, LTO döngüsündeki modlara göre emisyon dağılımının anlaşılmasıyla birlikte, motor tipi, uçuş operasyonları ve yer hizmetleri stratejilerinin çevresel etkiler açısından ne kadar kritik olduğunu gözler önüne sermektedir. Uçuş modları arasında özellikle taksi modunun önemi bir kez daha vurgulanmış, operasyonel iyileştirmelerin bu noktaya odaklanması gerektiği ortaya konmuştur. Ayrıca, LEAP serisi gibi yeni nesil motorların çevre dostu havacılık açısından güçlü adaylar olduğu gösterilmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, gerçek zamanlı uçuş verileri ile desteklenerek daha dinamik analizler sunması, motor modernizasyonuna yönelik politikaların ve havaalanı yer operasyonlarının çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak şekilde yeniden düzenlenmesi için rehber olacağı düşünülmektedir. Farklı motor tiplerinin sabit yakıt tüketim şartlarında emisyon analizlerinin yapılması literatür açısından oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) bu motorlar üzerindeki etkisinin de araştırılması, çevreci havacılık hedeflerine bir adım daha yaklaşılmasını sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, verilerin elde edilmesindeki yardımlarından dolayı ICAO Motor Emisyon Veri Bankasına teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] Airport Publications 2025. <https://store.aci.aero/>, Accessed 1 May 2025.
- [2] IATA ANNUAL REVIEW 2021. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2021.pdf>, Accessed 2 May 2025.
- [3] J. Scheelhaase, S. Maertens, W. Grimme, and M. Jung, EU ETS versus CORSIA – A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO₂ emissions by market-based measures. *Journal of Air Transport Management*, 67, 55–62, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.11.007>.
- [4] U. Burkhardt and B. Kärcher, Global radiative forcing from contrail cirrus, *Nature Climate Change* 1(1), 54–58, 2011. <https://doi.org/10.1038/nclimate1068>.
- [5] A. Macintosh and L. Wallace, International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand? *Energy Policy*, 37(1), 264–273, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.029>.
- [6] European Aviation Environmental Report 2016. <https://www.easa.europa.eu/eo/sites/default/files/2021-09/European%20Aviation%20Environmental%20Report%202016%20-72dpi.pdf>, Accessed 3 May 2025.
- [7] X. Wang, Y. Sun, F. Han, and Y. Zhao, Effect of Fe addition on the structure and SCR reactivity of one-pot synthesized Cu-SSZ-13. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107888, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107888>.
- [8] E. Boldo, S. Medina, A. Le Tertre, F. Hurley, H.G. Mücke, F. Ballester and Daniel Eilstein on behalf of the Apheis group, Apheis: Health impact assessment of long-term exposure to PM_{2.5} in 23 European cities. *European Journal of Epidemiology*, 21(6), 449–458, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10654-006-9014-0>.
- [9] N. Li, M. Hao, R. F. Phalen, W. C. Hinds, and A. E. Nel, Particulate air pollutants and asthma: A paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects. *Clinical Immunology*, 109(3), 250–265 2003. <https://doi.org/10.1016/j.clim.2003.08.006>.
- [10] O. B. Okedere, F. B. Elehinafe, S. Oyelami, and A. O. Ayeni, Drivers of anthropogenic air emissions in Nigeria–A review. *Heliyon*, 7(3), 2021. [doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06398](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06398).
- [11] S. R. H. Barrett, R. E. Britter, and I. A. Waitz, Global mortality attributable to aircraft cruise emissions. *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7736–7742, 2010. <https://doi.org/10.1021/es101325r>.
- [12] S. H. L. Yim et al., Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034001, 2015. [doi:10.1088/1748-9326/10/3/034001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034001).
- [13] U. Kesgin, Aircraft emissions at Turkish airports. *Energy*, 31(2-3), 372–384, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.01.012>.
- [14] İ. Yılmaz, Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey. *Journal of Air Transport Management*, 58, 176–182, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.11.001>.
- [15] H. Kafali and O. Altuntas, The analysis of emission values from commercial flights at Dalaman international airport Turkey. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(10), 1451–1457, 2020. [doi:10.1108/AEAT-12-2019-0253](https://doi.org/10.1108/AEAT-12-2019-0253).
- [16] S. Ekici and Y. Şöhret, A study on the environmental and economic aspects of aircraft emissions at the Antalya International Airport. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 10847–10859, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11306-w>.
- [17] S. Ekici and H. Sevinc, Understanding a commercial airline company: A case study on emissions and air quality costs. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 5139–5154, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03471-3>.

- [18] H. Aygun and H. Caliskan, Environmental and enviroeconomic analyses of two different turbofan engine families considering landing and take-off (LTO) cycle and global warming potential (GWP) approach. *Energy Conversion and Management*, 248, 114797, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconm.2021.114797>.
- [19] K. Dönmez, R.K. Cecen, A Brief Assessment of Aircraft Fuel Consumption and Pollutant Emissions for Departure Operations. In *International Symposium On Sustainable Aviation* 11-17. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70694-3_3.
- [20] M. A. Çil and C. Tarhan, Investigation of emissions from passenger flights Denizli Çardak Airport, Türkiye. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(10), 2395-2403, 2024, <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01579-2>.
- [21] E. T. Turgut, M. Cavcar, O. Usanmaz, O. D. Yay, T. Dogeroglu, K. Armutlu, Investigating actual landing and takeoff operations for time-in-mode, fuel and emissions parameters on domestic routes in Turkey. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 249-262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.018>.
- [22] S. L. Kuzu, Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 153-161, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0525-5>.
- [23] A. O. Canarslanlar, İniş Kalkış Döngüsündeki Safha Sürelerinin Gerçek Uçuş Verileri Kullanılarak Değerlendirilmesi. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 38-47, 2017. DOI: [10.23890/SUHAD.2017.0105](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2017.0105).
- [24] Y. Zhou, Y. Jiao, J. Lang, D. Chen, C. Huang, P. Wei, S. Li and S. Cheng, Improved estimation of air pollutant emissions from landing and takeoff cycles of civil aircraft in China. *Environmental pollution*, 249, 463-471, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.088>.
- [25] S. H. L. Yim, M. E. J. Stettler, and S. R. H. Barrett, Air quality and public health impacts of UK airports. Part II: Impacts and policy assessment. *Atmospheric environment*, 67, 184-192 2013, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.017>.
- [26] T. Mokalled, S. Le Calvé, N. Badaro-Saliba, M. Abboud, R. Zaarour, W. Farah and J. Adjizian-Gérard, Identifying the impact of Beirut Airport's activities on local air quality-Part I: Emissions inventory of NO2 and VOCs. *Atmospheric Environment*, 187, 435-444, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.036>.
- [27] H. Liu et al., Atmospheric emission inventory of multiple pollutants from civil aviation in China: Temporal trend, spatial distribution characteristics and emission features analysis. *Science of The Total Environment*, 648, 871-879, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.407>.
- [28] W. Thanjangreed and N. Chuersuwana, Commercial Aircraft Emission Estimates with 1 kmx1 km Resolution: A Case of Departure Flights at Suvarnabhumi Airport. *EnvironmentAsia* 13 (Special issue) Commercial Aircraft Emission Estimates with 1 km x 1 km Resolution: A Case of Departure Flights at Suvarnabhumi Airport. *Environment Asia*, 13, 10-17, 2020. doi: [10.14456/ea.2020.17](https://doi.org/10.14456/ea.2020.17).
- [29] A. Tokuşlu, 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, 2021. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.836780>.
- [30] X. Zhang, M. Karl, L. Zhang, and J. Wang, Influence of Aviation Emission on the Particle Number Concentration near Zurich Airport. *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14161-14171, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02249>.
- [31] S. E. Puliafito, Civil aviation emissions in Argentina. *Science of The Total Environment*, 869, 161675, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161675>.
- [32] Key aspects of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement>, Accessed 1 May 2025.
- [33] S. Kumcu and B. Özyörük, Sürdürülebilir yeşil bir kalkınma için salınan karbonun yakalanması, depolanması ve kullanımına yönelik bir araştırma. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 386-394, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1145904>.
- [34] K. Ulusoy, Zonguldak'ta PM2.5 odaklı hava kirliliği-mortalite ilişkisinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 301-308, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1372285>.
- [35] Ustaoglu, E. Estimation of economic costs of air pollution from road vehicle transportation in Turkey. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 1-1, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1336117>.
- [36] İ. Balçılar, Eskişehir'de hava kirliliği: PM10, PM2. 5 ve SO2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimi ve kaynaklarının değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1115-1126, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1459990>.
- [37] P. Weijun, Hengheng, Z., Xiaolei, Z., & Tianyi, W. Calculation and analysis of pollutants during takeoff and landing based on airborne data. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(2), e13743, 2022. <https://doi.org/10.1002/ep.13743>.
- [38] ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>, Accessed 1 May 2025.
- [39] M. A. Çil, S. Tangöz, and C. Tarhan, Effect of go-around events on the LTO Cycle: emissions and fuel analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-11, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11869-025-01759-8>.

- [40] P. Stefanou and D. Haralambopoulos, Energy demand and environmental pressures due to the operation of Olympic Airways in Greece. *Energy*, 23(2), 125–136, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00058-3).
- [41] A. H. H. Ali, and M. N. Ibrahim, Performance and environmental impact of a turbojet engine fueled by blends of biodiesels. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 1253-1266, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1228-4>.

