

Csató Péter¹

EGY TÖBBCÉLÚ HARCÁSZATIREPÜLŐGÉP-FLOTTA TÜZELŐANYAG-FELHASZNÁLÁSÁNAK ÉS EMISSZIÓS TERHELÉSÉNEK FELADATTÍPUS-ALAPÚ BECSLÉSE

A MISSION-BASED ESTIMATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS FOR A FLEET OF MULTI-ROLE COMBAT AIRCRAFT

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2026-1-2-227](https://doi.org/10.30583/2026-1-2-227)

Összefoglalás

A katonai légijárművek tüzelőanyag-felhasználására és károsanyag-kibocsátására vonatkozó becslések a nyilvánosan elérhető szakirodalomban korlátozott számban állnak rendelkezésre, különösen a többcélú harcászati repülőgépek esetében. Jelen tanulmány célja kísérleti projektként egy ilyen flotta éves tüzelőanyag-fogyasztásának és az abból származó emissziós terhelésének a feladattípusok szerinti, közelítő meghatározása. Az alkalmazott módszertan a repülési feladatok csoportosítására, a hajtóműüzemmódok mintavételes elemzésére, valamint az ICAO és az EMEP/EEA módszertani alapelveinek adaptálására épül. Az eredmények rámutatnak, hogy az egyes feladattípusok között jelentős eltérések figyelhetők meg mind tüzelőanyag-felhasználás, mind emisszió szempontjából. A tanulmány igazolja, hogy feladattípus-alapú, aggregált megközelítéssel katonai üzemeltetési környezetben is adható megbízható nagyságrendi becslés a fogyasztással közvetlenül összefüggő emissziós komponensekre. A módszer egyúttal megalapozza egy későbbi, részletesebb emissziós modell kidolgozását.

Kulcsszavak: tüzelőanyag-felhasználás, emisszióbecslés, repülési feladattípusok, hajtóműüzemmód, CO₂ kibocsátás

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, doktorandusz.
E-mail: cspetur@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9515-5376>

Abstract

Estimates of fuel consumption and pollutant emissions from military aircraft are limited in the publicly available literature, particularly for multi-role combat aircraft. The aim of this study is to provide, as a pilot project, an approximate determination of the annual fuel consumption and resulting emissions load of such a fleet, broken down by mission type. The methodology applied is based on the classification of flight missions, a sample analysis of engine operating modes, and the adaptation of the methodological principles of ICAO and EMEP/EEA. The results indicate that significant differences can be observed between mission types in terms of both fuel consumption and emissions. The study confirms that a task-type-based, aggregated approach can provide reliable order-of-magnitude estimates for emission components directly related to fuel consumption even in a military operational environment. The method also lays the groundwork for the development of a subsequent, more detailed emission model.

Keywords: fuel consumption; emission estimation; flight mission types; engine operating mode; carbon dioxide emissions

Bevezetés

Annak ellenére, hogy a Magyar Légierő már 1938 óta védelmezi az ország légterét, sajnos eddig nem készült elérhető összesített kimutató légijárműveink éves tüzelőanyag-fogyasztásáról, ehhez kapcsolódóan pedig a károsanyag-kibocsátás mértékéről sem.

A repülés során felhasznált tüzelőanyag elégetéséből származó emisszió a globális antropogén CO₂-kibocsátás jelentős részét teszi ki. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) becslései szerint a polgári légiközlekedés a globális emisszió 2,5%-át teszi ki.² Azonban a légiközlekedés klímahatása nem korlátozódik a szén-dioxidra. Az üzemanyag égése során keletkező egyéb komponensek – például a nitrogén-oxidok és vízgőz – további problémákat is okoznak. Ezek figyelembevételével, a jelenlegi becslések szerint, a légiközlekedés teljes klímahatása megközelítőleg a globális mennyiség 4%-át adja.³

² Lombardo, Teo (2025): IEA-Aviation Overview. January 2025. International Energy Agency. Online: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

³ Klöwer, Milan. – Allen, Myles – Lee, David – et al. (2021): Quantifying aviation's contribution to global warming. Environmental Research Letters, 16(10), p. 104027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac286e>

Tekintettel a Párizsi Megállapodásban foglalt célkitűzésre, miszerint a század második felére globális karbonsemlegességet kell elérni, elengedhetetlen a légiközlekedésből származó üvegházhatású gázok kibocsátásának pontos és nemzetközileg elismert módszerekkel történő számszerűsítése. Különösen igaz ez a katonai repülés esetében, ahol az adatok jelentős része nem nyilvános, így a rendelkezésre álló modellek döntően polgári alkalmazásokra épülnek. Ez a hiány megnehezíti a katonai logisztikai rendszerek hatékonyságának kvantitatív értékelését, valamint az üzemeltetési döntések környezeti és erőforrásvonzatainak megbízható becslését.

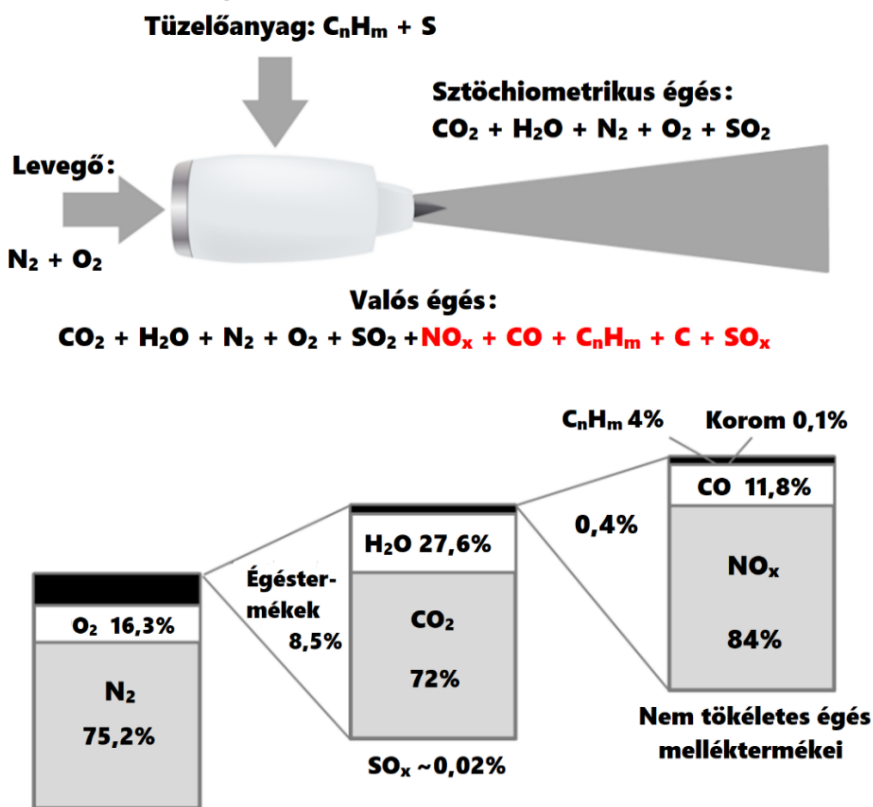
A polgári repülés területén több számítási eljárás született – különböző feltételezésekkel és eredményekkel – kormányzati megbízottak, nemzetközi intézmények, valamint civil szervezetek és alapítványok kutatásai révén. Ugyanakkor a számos különböző módszer alkalmazása jelentős eredménybeli eltérésekhez vezetett. A standardizálás hiánya az életciklus- és környezeti hatásvizsgálatokban általános, de a légiközlekedési ágazatban is jelentős probléma. Ennek oka, hogy maga a repülés és a hajtóművek működése komplex fizikai és kémiai folyamatokat foglal magában, és a CO₂-termelés mellett más jellegű hatásokat is kelt (például kondenzcsíkok és cirrusfelhők képződése). Ezeknek a változóknak az integrálása a teljes károsanyag-kibocsátás meghatározásában komoly bizonytalanságot hordoz.

Jelen tanulmány célja, hogy hozzájáruljon a fenti ismerethiány csökkentéséhez. Ennek érdekében munkám során kiválasztom a célnak legmegfelelőbb CO₂-kibocsátás értékelési módszerét, majd meghatározom a modern többcélú harcászati repülőgép-flotta éves tüzelőanyag-fogyasztását, és ez alapján közelítő értéket adok a kibocsátott üvegházhatású gázok mennyiségére. Ezzel egyidejűleg feltárom, hogy milyen tényezők határozzák meg a hajtóműből kiáramló gáz összetételét.

A katonai repülőerők üzemeltetése logisztikai szempontból kiemelt jelentőséggel bír, mivel a tüzelőanyag a hadművelleti képességek egyik legkritikusabb erőforrása. A légijárművek tüzelőanyag-ellátása nem csupán gazdasági kérdés, hanem közvetlen hatással van a művelleti hatósugárra, a készenléti szintekre, valamint a fenntartható művelleti intenzitásra. Ennek megfelelően a tüzelőanyag-felhasználás és az abból származó emisszió vizsgálata túlmutat a környezetvédelmi aspektusokon, és a katonai logisztikai tervezés, valamint az erőforrásoptimalizálás szerves részét képezi.

A kibocsátott gáz összetétele

A hagyományos gázturbinás hajtóművek működtetésekor a tökéleteshez minél közelebbi égés elérésére törekszünk, ezáltal minél alacsonyabb fogyasztás mellett, minél nagyobb tolóerő létrehozása a cél.



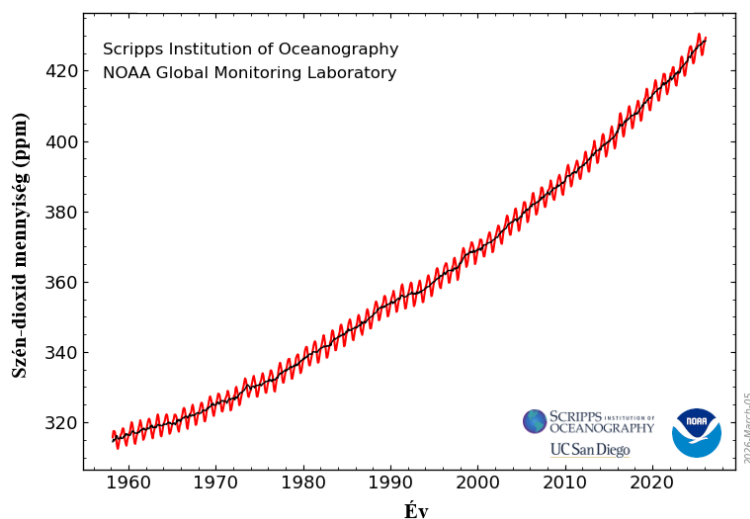
1. számú ábra. Gázturbinás hajtóművek által kibocsátott gáz összetétele⁴

A sztöchiometrikus égés eredményeként szén-dioxid (CO_2) és vízgőz (H_2O) keletkezik. Azonban a valóságban a különböző veszteségek miatt - mint a turbina előtti gázhőmérséklet korlátozása okán bevezetett többletlevégő, a mechanikai és aerodinamikai veszteségek - nem lesz tökéletes az égés. Mindezek következtében a tüzelőanyag energiatar-
 talma nem hasznosul teljes mértékben, és az égés során különféle

⁴ A szerző szerkesztése Wuebbles, Don – Gupta, Muhan – Ko, Malcolm. (2007): Evaluating the impacts of aviation on climate change. EoS Transactions American Geophysical Union, 88(14), pp. 157–160. DOI <https://doi.org/10.1029/2007EO140001> alapján.

egyéb komponensek képződnek. A fűvocsövet elhagyó gázok fő összetevői továbbra is a nitrogén, vízgőz és szén-dioxid, azonban kis mennyiségben nitrogén-oxidok (NO_x), szén-monoxid (CO), el nem égett szénhidrogének (C_nH_m), koromszemcsék és kén-oxidok (SO_x) is megjelennek, amelyek a hajtómű környezeti hatását meghatározzák. Ezek aránya az 1. ábrán látható.

Közismert, hogy a szén-dioxid jelentős szerepet játszik az üvegházhatás kialakulásában, amely felelős a jelenleg is zajló éghajlatváltozásért. A szén-dioxid légköri koncentrációja az emberi tevékenység hatására 2024-re 422 ppm-re (parts per million: milliommód rész) nőtt (2. ábra).⁵



2. számú ábra. A Föld légköre CO_2 -koncentrációjának változása (Hawaii, MaunaLoa állomás)⁶

Az emberiség a fejlődése során soha nem tapasztalt ilyen magas CO_2 -koncentrációt. A kutatók ezért arra figyelmeztetnek, hogy a megnövekedett szén-dioxid-szint az emberi szervezetre káros hatásokat is kiválthat.^{7, 8}

⁵ Lindsey, Rebecca. (2025): Climate change: atmospheric carbon dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce, November 2025. Online: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

⁶ Lindsey, R. (2025)

⁷ Bierwirth, Phill (2016): Carbon dioxide toxicity and climate change: a serious unapprehended risk for human health. Australian National University. Web Published: ResearchGate. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16787.48168>

⁸ Karnauskas, Kristopher – Miller, Shelly – Schapiro, Anna (2020): Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO_2 Toward Levels Harmful to Human Cognition. GeoHealth, 4(5), DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GH000237>

A szén-monoxid hatásai szintén jól ismertek. Helyi szinten, a koncentráció függvényében, a szén-monoxid mérgezést okozhat, mivel csökkenti a szervekhez és szövetekhez eljutó oxigén mennyiségét.⁹ Kisebb mennyiségben vannak jelen az el nem égett maradvány-szénhidrogének, melyek főként aldehidekből és aromás vegyületekből állnak. Koncentrációjuktól függően ezek gátolhatják a fotoszintézist a növényekben és hosszabb távú kitettség esetén az emlősökben rákot okozhatnak.¹⁰

Emellett magas hőmérsékleten végbemenő kémiai reakciók eredményeként nitrogén-oxidok képződhetnek, amelyek károsíthatják az emberi szerveket, meghosszabbíthatják a vírusos fertőzések lefutását és károsítják a tüdőt. Ezenkívül egyes növényfajok növekedését serkentik, ami más fajok kiszorulásához vezethet, csökkentve a biodiverzitást. A NO_x a troposzféra és a sztratoszféra kémiai folyamatainak keresztül – különösen ózonképző és -lebontó szerepe miatt – indirekt módon járul hozzá a globális felmelegedéshez.¹¹

A kén-oxidok környezeti és egészségügyi szempontból egyaránt károsak. Szerepet játszanak a savas esők kialakulásában, ami a pH-érték csökkentésével közvetlenül befolyásolja az ökoszisztémát. Egészségügyi hatásai között szerepelnek a légzőszervi megbetegedések, valamint az orr- és a torokirritáció. Ismételt, magas szintű kitettség korai halálozást is okozhat.¹² A vízgőz szintén üvegházhatású gáz, bár jelentősége kisebb, mint a szén-dioxidé, de a gázugár vízgőztartalma nagy magasságban (-50 °C körüli hőmérséklet) megfagy és kondenzcsíkokat képez, amik cirrusfelhőkké alakulnak és nagy mértékben fokozzák az üvegházhatást.¹³

⁹ Kusumaningtiar, Devi Angeliana – Gisely, Vionalita – Septian, Ardiansyah (2020): Air pollution of carbon monoxide: a case study on city traffic jam. *Pollution Research*, 39(4), pp. 911–916. ISSN 0257–8050

¹⁰ Ince, Murharrem – Ince, Kaplan (2019): Introductory Chapter: Sources, Health Impact and Environmental Effect of Hydrocarbons. In Ince, Murharrem – Ince, Kaplan (ed.): *Hydrocarbon Pollution and its Effect on the Environment*. IntechOpen, pp. 1–9. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81556>

¹¹ De Vries, Wim. (2021): Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, p. 100249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>

¹² Khalaf, Eman – Mohammadi, Mohammad Javad – Sulistiyani, Sulistiyani – Ramírez-Coronel, Andrés et al. (2024): Effects of sulfur dioxide inhalation on human health: a review. *Reviews on Environmental Health*, 39(2), pp. 331–337. DOI: <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0237>

¹³ Held Isaac – Soden, Brian (2000): Water Vapor Feedback and Global Warming. *Annual Review of Environment and Resources*, 25(1), pp. 441–475. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.441>

A korom természetes és emberi eredetű égési folyamatokból származik. A keletkezés után nagy távolságokat tehet meg a légkörben, majd csapadékkal kimosódik. A koromnak melegítő és hűtő hatása is lehet: a felhőképződés révén a fényvisszaverő képesség növekedése csökkenti a hőmérsékletet, míg a sugárzás elnyelése felmelegíti az atmoszférát. A szénrészecskék rendkívül kicsik, ezért könnyen belélegezhetők és összefüggésbe hozhatók asztmával, szívrohamokkal és tüdőrákkal.¹⁴

Fogyasztást meghatározó tényezők

Egy légijárműflotta károsanyag-kibocsátásának becslése igen összetett folyamat, mivel a tüzelőanyag-fogyasztást számos, egymással összefüggő műszaki, üzemeltetési és környezeti hatás alakítja. Ezek egy része a repülőgép konstrukciós sajátosságaiból és a hajtómű működési jellemzőiből adódik, míg másik részük az adott repülési feladat sajátosságaiból, az üzemeltetési körülményekből, valamint a légijárművezető egyéni döntéseiből következik.

Ennél fogva a fogyasztás nem vezethető vissza egyetlen meghatározó paraméterre, hanem több tényező együttes hatásának eredményeként értelmezhető. A következőkben ezek közül néhány különösen jelentős tényező kerül bemutatásra. A repülési magasság növekedésével a külső légsűrűség csökken, ami nagymértékben befolyásolja mind az aerodinamikai jellemzőket, mind a hajtómű működését.

A magasság növekedésével a hajtóműbe belépő levegő sűrűsége és így a tömegáram csökken. A kompresszor munkapontja a kompresszor-jelleggörbén eltolódik, miközben a külső statikus hőmérséklet csökkenése módosítja a kompresszió utáni állapotjellemzőket is. Az égéstérbe belépő levegő hőmérséklete és nyomása ezért a repülési magasság függvényében változik, amelyhez a hajtómű szabályozórendszere (FADEC) az üzemanyag-befecskendezést igazítja a kívánt tolóerő, valamint a hőmérsékleti és stabilitási korlátok betartása érdekében.

Termodinamikai szempontból az alacsonyabb belépő levegőhőmérséklet kedvezőbb Brayton-körfolyamatot eredményez: nő a ciklus fajlagos hasznos munkája, és javul a termikus határfok. Ennek következtében – egy bizonyos szintig – a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás

¹⁴ Ni, Mingjiang – Huang, Jianxin – Lu, Shengyong et al. (2014): A review on black carbon emissions, worldwide and in China. *Chemosphere*, 107(1), pp 83–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.052>

(TSFC) csökken a repülési magasság növekedésével.¹⁵ Környezeti szempontból nagy utazómagasságon az egységnyi megtett útra jutó CO₂-kibocsátás általában csökken a kedvezőbb fajlagos fogyasztás miatt. A NO_x-emisszió alakulása azonban összetettebb. A nitrogén-oxidok keletkezését döntően a lánghőmérséklet, az égőtéri nyomás, valamint a forró gázok reakciózónában eltöltött ideje befolyásolja; a folyamat dominánsan a termikus NO_x-képződés, azaz a Zeldovich-mechanizmus révén megy végbe. Bár a környezeti hőmérséklet csökken az emelkedéssel, az égőtérben a kívánt turbina-belépő hőmérséklet fenntartása érdekében magas lokális lánghőmérséklet alakul ki, ami kedvez a NO_x-képződésnek. Ennek következtében a CO₂-kibocsátás csökkenése nem feltétlenül jár együtt a NO_x-emisszió arányos mérséklődésével, sőt, bizonyos esetekben növekedés figyelhető meg.¹⁶

A tolóerőigény szempontjából figyelembe kell vennünk a légijármű vezetőjének egyéni döntéseit is, különösen egy többcélú harci repülőgép esetében, amikor a gazdaságosság a feladatok többségében nem élvez prioritást.

Összességében egy hajtómű fogyasztását elsősorban befolyásolja:

- külső levegő minősége/magasság (nyomás, hőmérséklet, páratartalom);
- repülési sebesség (Mach-szám);
- repülési profil (emelkedés, süllyedés);
- légijármű tömege;
- légijármű által termelt felhajtóerő;
- légijármű légellenállása.

Emellett nem elhanyagolható tényezők a hajtómű kialakításából adódó veszteségek:

- a hajtómű egyes részegységeinek hatásfoka, melyek az alkatrészek elhasználódásával egyre csökken;

¹⁵ Rohács József – Gausz Zsanna – Gausz Tamás (2012): Repülésmechanika. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest: Typotex. ISBN 978-963-279-615-4

¹⁶ Lee, David – Fahey, David – Skowron, Agnieszka et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment, 244(1), p. 117834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

- kétáramúsági fok: azt mutatja meg, hogy a hajtóműbe áramló levegőnek mekkora része jut a turbinán keresztül, és mekkora kerül a megkerülő (bypass) légáramba. Minél kisebb mértékű, annál nagyobb a fogyasztás;
- kiegészítő rendszerek: a hajtómű által ellátott generátorok, a kompresszorból elvezett levegővel hűtött számítógépek és lét-fenntartó rendszerek szintén veszteségeket okoznak.

A felsorolt tényezők alapján megállapítható, hogy a tüzelőanyag-felhasználás nem csupán műszaki paraméterek függvénye, hanem jelentős mértékben befolyásolható az üzemeltetési eljárások és a repülési profilok megválasztásával. Ez a katonai logisztika számára lehetőséget teremt arra, hogy megfelelő tervezéssel és szabályozással csökkentse az erőforrás-felhasználást anélkül, hogy a műveleti képességek érdemben csökkennének.

Repülési feladatok fázisai és típusai

A légijárművek károsanyag-kibocsátásának kiszámítására számos különböző eljárás létezik,^{17, 18, 19, 20} viszont kevés olyan összehasonlító tanulmány készült az utóbbi években, amely feltárná és magyarázná a különböző értékelési módszerek közötti eltéréseket.²¹

A szakirodalomban széles körben elfogadott, hogy a repülőgépek üzemanyag-fogyasztásának és CO₂-kibocsátásának számítása során

¹⁷ ICAO (n.d.): ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Air Freighter. 2024. Online: https://icec.icao.int/Documents/Freighter_Methodology_v2.0_Final.pdf

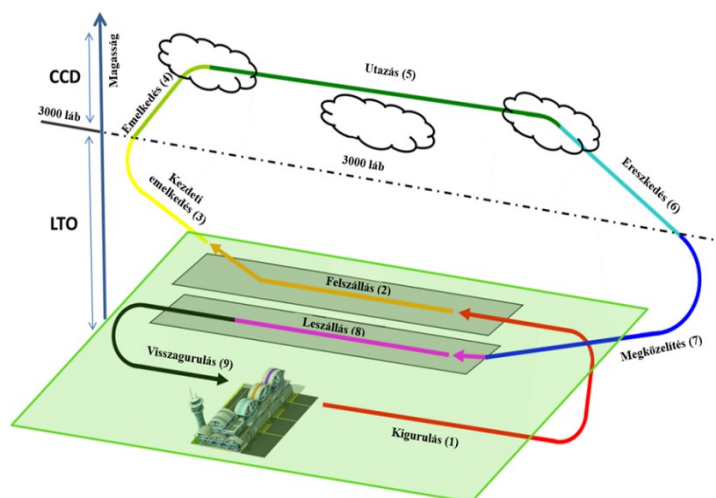
¹⁸ MyClimate (n.d.): Calculation principles - Flight Emissions Calculator. Online: <https://www.myclimate.org/en/information/about-myclimate/downloads/flight-emission-calculator>

¹⁹ atmosfair gGmbH (n.d.): atmosfair Flight Emissions Calculator Documentation of the Method and Data. Online: <https://www.atmosfair.de/en/standards/emissions-calculation/emissions-calculator>

²⁰ UK Department for Energy Security and Net Zero. (2025) Greenhouse gas reporting: conversion factors 2025. Online: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2025>

²¹ Iken, Nabila – Aguessy, François-Xavier (2022). Calculating the Greenhouse Gas Emissions of Flights: A Comparative Study of Existing Protocols. OP Conference Series: Earth and Environmental Science, 952(1), p. 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/952/1/012002>

a földi és alacsony magasságú üzemeltetési szakaszokat (LTO-ciklus²²) el kell különíteni a repülési szakaszoktól (CCD-ciklus²³). Ennek oka, hogy a két üzemállapot eltérő aerodinamikai, hajtómű-üzemeltetési és környezeti feltételekkel jár, így különböző modellezési megközelítések szükségesek.^{24, 25, 26, 27, 28}



3. számú ábra. Egy repülési feladat fázisai²⁹

²² LTO – Landing and Take-Off: Le- és felszállás

²³ CCD – Climb–Cruise–Descent: Emelkedés-utazás-ereszkedés

²⁴ Wasiuk, Donata – Lowenberg, Mark – Shallcross, Dudley (2015): An aircraft performance model implementation for the estimation of global and regional commercial aviation fuel burn and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 35(1), pp. 142–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.022>

²⁵ Chao, Ching-Cheng (2014): Assessment of carbon emission costs for air cargo transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33(1), pp. 186–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.06.004>

²⁶ Park, Yongha – O’Kelly, Morton (2014): Fuel burn rates of commercial passenger aircraft: variations by seat configuration and stage distance. *Journal of Transport Geography*, 41(1), pp. 137–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.08.017>

²⁷ Kim, Brian – Fleming, Gregg – Lee, Joosung et al. (2007): System for assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(5), pp. 325–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.03.007>

²⁸ Pagoni, Ioanna – Psaraki-Kalouptsidi, Voula (2016): The impact of carbon emission fees on passenger demand and air fares: A game theoretic approach. *Journal of Air Transport Management*, 55, pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.004>

²⁹ A szerző fordítása Gentile, Elisa – Tarantola, Fabio – Lockley, Andrew (2022): Use of aircraft in ocean alkalinity enhancement. *Science of The Total Environment*, 822, p. 153484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153484> alapján.

A civil szférában a repülési pálya 9 részfázisból áll (3. ábra):

1. Taxi-out (gurulás felszállás előtt);
2. Take-off (felszállás);
3. Climb-out (kezdeti emelkedés 3000 lábig);
4. Climb (emelkedés);
5. Cruise (utazó repülés);
6. Descent (ereszkedés);
7. Approach (leszállópálya megközelítése);
8. Final Approach (végső megközelítés 3000 láb alatt);
9. Taxi-in (gurulás leszállás után).

Azonban a kibocsátás vizsgálatát általában kizárólag a CCD-szakaszra végzik el (4., 5., 6. pontok). Ezek a fázisok 3000 láb feletti magasságban zajlanak. A 3000 láb alatti repülési és földi műveletek – vagyis az LTO-ciklus – pályageometriája nem írható le pontosan a repülési adatok alapján. Ezért az LTO-szakaszra vonatkozó emissziószámításokat az ICAO által meghatározott modell szerint végzik, amely hat részfázisból áll (1., 2., 3., 7., 8., 9. pontok).

Az ezekhez tartozó tüzelőanyag-fogyasztási adatokat és emissziós tényezőket az ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank (ICAO repülőgép-hajtóművek kibocsátási adatbankja) tartalmazza, amelyet az ICAO folyamatosan frissít. Ez az adatbázis tartalmazza számos repülőgép teljesítményadatait, referencia-emissziós indexeket, valamint referencia tüzelőanyag-tömegáramokat. A számítás bemenő paramétereire közé tartozik a hajtómű típusa, a hajtóművek száma, valamint az egyes LTO-fázisokban eltöltött idő.³⁰

Azonban a legtöbb polgári célra fejlesztett emissziószámítási módszer nem alkalmazható változtatás nélkül a katonai légijárművek esetében, mert alapvetően kereskedelmi légiforgalmi adatokra és szabványos repülési profilokra épülnek.

³⁰ Pagoni, Ioanna – Psaraki-Kalouptsi, Voula (2017): Calculation of aircraft fuel consumption and CO2 emissions based on path profile estimation by clustering and registration. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 54, pp. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.006>

A civil modellek általában arra a feltételezésre támaszkodnak, hogy ismert a repülési útvonal, így a számítás a két repülőtér földrajzi koordinátái alapján meghatározott távolság szerint történik. Emellett a fent említett standard repülési profilok sem minden esetben alkalmazhatóak, mivel ezek a modellek egy előre meghatározott magasság-idő függvényt rendelnek az útvonalhoz, amely megadja a felszállás, emelkedés, utazórepülés, süllyedés és megközelítés szakaszainak pontos körülményeit.³¹

A katonai légijárművek ezzel szemben számos különböző típusú repülési feladatot hajtanak végre, melyek során gyors irány- és sebességváltoztatások történnek akár 12 km-es magasságig, a teljes elérhető magasságspektrumon. Ezek a repülési profilok sajnos nem írhatók le teljes egészében az említett egyszerűsített CCD-ciklussal. Ilyen típusú légijárművek üzemeltetése során inkább az LTO-ciklusok körülményei standardizálhatók, mivel ezek megközelítőleg követik a polgári, fázisokra osztott logikát, és hasonló körülmények állnak fenn minden feladat esetén (gurulási idő, tengerszint feletti magasság, HVK-állás).

A jelen esetben vizsgált többcélú harci repülőgép számos különböző repülési feladattípus végrehajtására képes, melyeket repülési profil alapján csoportosíthatunk:

- Levegő-levegő feladatok:
 - Basic Fighter Maneuvering (BFM): klasszikus egy az egy elleni légi harc-kiképzés,
 - Air Combat Manouvering (ACM): kötelékszíntű légi harcmanőverezés és együttműködés;
 - Beyond Visual Range (BVR): kötelékszíntű, látóhatáron túli levegő-levegő harceljárások gyakorlása;
 - Within Visual Range (WVR): kötelékszíntű, látóhatáron belüli levegő-levegő harceljárások gyakorlása;
 - Aerobatic Manouvering (DEMO): műrepülés;
 - Navigation (NAV): útvonalrepülés vagy műszeres navigációs jártasság fenntartása;
 - Air Policing (QRA): NATO-szinten állandó békeidős feladat: 24/7 készenlét, azonosítás, elfogás, kísérés;
 - Formation Flight (FORM): kötelékrepülés;

³¹ Wuebbles, Don – Gupta, Muhan – Ko, Malcolm (2007)

- Electronic Warfare Training (EWT): elektronikai hadviselési kiképzés;
- Berepülés (BEREP): teszt- vagy átvételi repülés, jellemzően gyári, javítás utáni vagy rendszerellenőrző célból;
- Military Pilot Licence Flight (MPL): szakszolgálati vizsga/gyakorló repülés.
- Levegő-föld feladatok:
 - Close Air Support (CAS): közeli légi támogatás saját szárazföldi vagy kétéltű erők közvetlen közelében, részletes koordinációval és terminális irányítással a saját erők védelme érdekében;
 - AWGUN: gépágyú levegő-föld lövészet;
 - GPB: általános levegő-föld fegyveralkalmazási és csapásmérő profilok;
 - GBU: lézervezérelt vagy más precíziós fegyverek alkalmazása;
 - Air Interdiction (AI): az ellenséges katonai potenciál megzavarása, rongálása vagy megsemmisítése még azok bevetése előtt;
 - Dynamic Targeting (DT): váratlanul felbukkanó célok gyors megtámadása, akár már levegőben lévő eszközök átterelésével is.^{32, 33}

Ez alapján a CCD-ciklusok is bizonyos mértékig kategorizálhatók. Megjegyzendő, hogy a légijármű-vezetők részére viszonylag kevés megkötés van a repülési feladatok végrehajtási módjának tekintetében, így nincs két egyforma repülési profil.

A katonai repülési feladatok ilyen jellegű heterogenitása alapvetően megkülönbözteti a katonai üzemeltetést a polgári légiközlekedéstől és egyben indokolja az alkalmazott feladattípus-alapú közelítést. Logisztikai szempontból ez azt is jelenti, hogy az üzemanyag-igény nem

³² U.S. Department of the Air Force. (2024): U.S. Air Force Manual 11-2F-16, Volume 1, F-16 Aircrew Training. Washington, D.C.: Department of the Air Force. Online: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a3/publication/afman11-2f-16v1/afman11-2f-16v1.pdf

³³ UK Ministry of Defence (2026): AJP-3.3 Allied Joint Doctrine Airspace, Edition C. NATO Standardization Office. Online: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/698ef9fb7da91680ad7f4389/AJP_3_3_EdC_V1.pdf

egyenletesen jelentkeznek, hanem feladattípusonként jelentős ingadozást mutat, ami kihívást jelent a készletezés és az ellátási lánc tervezése során.

Tolóerőigény megoszlása

Mivel a fellelhető adatbázisok elsősorban a polgári légiközlekedésben alkalmazott hajtóművek működésének elemzésére készültek, katonai légijárművekre vonatkozó specifikus adatok csak korlátozott mennyiségben állnak rendelkezésre. Többfeladatú harci repülőgépek esetében például az F/A-18 Hornet szerepel a vizsgálatokban, amelybe F404-GE-402 hajtóművek kerültek beépítésre. Ehhez a típushoz és kismértékben modifikált altípusaihoz elérhetőek teljesítményadatok, emellett a légijárművek adatrögzítő rendszerén keresztül ki nyerhetők azok a repülési paraméterek, melyek segítségével megállapítható, hogy az egy év alatt repült időtartam alatt a hajtómű különböző üzemmódjai milyen arányban fordultak elő.^{34, 35, 36, 37}

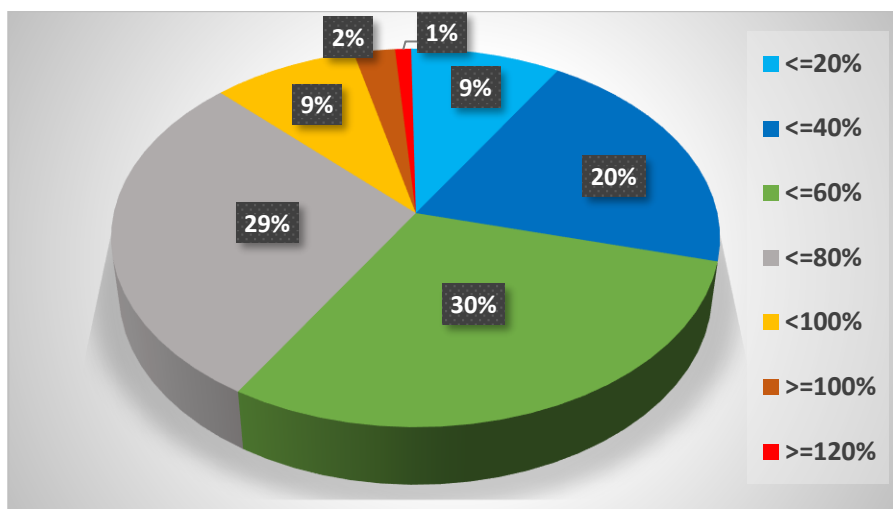
A teljes éves repülési adathalmaz részletes, időlépéses feldolgozása azonban jelentős számítási és feldolgozási kapacitást igényelne. A vizsgálat hatékonyságának növelése érdekében ezért mintavételi megközelítést alkalmaztam. Ennek során a különböző repülési profilok esetében négy-négy reprezentatív feladat elemzését végeztem el. Az így kapott eredményekből meghatározott átlagos üzemmód-megoszlási értékeket a teljes adatállományra kiterjesztve becsültem meg a fennmaradó repülések jellemző hajtómű-üzemállapot eloszlását.

³⁴ Connors, Timothy (1989): Measurement Effects on the Calculation of In-Flight Thrust for an F404 Turbofan Engine. AIAA Joint Propulsion Conference, Monterey, CA.

³⁵ Hall, Christopher – Hathaway, Richard – Cote, Sylvana (1983): Investigation of F/A-18A Engine Throttle Usage and Parametric Sensitivities. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 105(3), pp. 627–634. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3227463>

³⁶ Cote, Scott M. – John L. Birkler (1979): Simulated Mission Endurance Test (SMET) for an Aircraft Engine to be Used in a Fighter/Attack Role. Final Report, Naval Air Development Center, Warminster, Pennsylvania. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA071907.pdf>

³⁷ May, Robert – Chaffee, David – Stumbo, Paul Bernard et al. (1983): Tactical aircraft engine usage - A statistical study. Journal of Aircraft, 20, pp. 338-344. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.44873>



4. számú ábra. Az alkalmazott tolóerőbeállítások megoszlása éves szinten

A 4. ábra alapján látható: az alkalmazott hajtómű-üzemmódok megoszlása alapján megállapítható, hogy az éves repülési tevékenység döntő része közepes teljesítménytartományban zajlott. A legnagyobb arányt a 40–60% közötti üzemmód-tartomány képviseli, amely a teljes üzemidő 30%-át teszi ki. Ezt követi a 60–80% közötti tartomány 29%-kal, majd a 20–40% közötti üzemállapot 20%-kal, ami összességében a repült idő 79%-át teszi ki. Az alacsony teljesítményű üzemmódok aránya szintén számottevő. A 20% alatti tartomány a teljes üzemidő 9%-át adja, ami gurulási és várakozási szakaszokhoz köthető. Ezzel szemben az utánégető nélkül vett maximális vagy afeletti üzemmódok előfordulása viszonylag csekély. A 80–100% közötti teljesítményszint csupán 9%-ban fordul elő, és a 100%-ot meghaladó tartomány összesített aránya is mindössze 3%. Ez arra utal, hogy a legnagyobb teljesítményigényű, illetve utánégetős üzemállapotok a teljes éves repülési időnek csak kis részét teszik ki. Ugyanakkor ezek emissziós szempontból mégis kiemelt jelentőségűek, mivel ehhez a teljesítményszinthez jelentősen megnövekedett tüzelőanyag-fogyasztás és magasabb fajlagos kibocsátás társul.

Az üzemmód-megoszlás ilyen jellegű ismerete lehetőséget biztosít arra, hogy a logisztikai és üzemeltetési döntéshozók pontosabb becsléseket készítsenek az éves tüzelőanyag-szükségletről, valamint azonosítsák azokat az üzemállapotokat, amelyek aránytalanul nagy mértékben járulnak hozzá a teljes fogyasztáshoz. Ez különösen fontos a költséghatékonyság és a fenntarthatóság egyidejű érvényesítése szempontjából.

A károsanyag-kibocsátás mértékének meghatározása

A legtöbb kutatás egyetért abban, hogy a károsanyag-kibocsátás becsléséhez elengedhetetlen az emissziós indexek³⁸ (EI) meghatározása, külön-külön minden égéstermék esetére.

Az EI-értékek ismeretében a repülési feladat teljes időtartamára vonatkozó kibocsátás az alábbi összefüggés alapján számítható, amely diszkrétizált formában is felírható:

$$E_i = \int_{t_{indítás}}^{t_{leállitás}} \dot{m}_f(t) \cdot EI_i(t) dt = \sum_{t_{indítás}}^{t_{leállitás}} \dot{m}_f(t) \cdot EI_i(t) \Delta t \quad (1)$$

ahol i a kibocsátott anyagtípust,
 t pedig az adott repülési fázis időtartamát jelenti.

A jelenlegi projektben a szén-dioxid, vízgőz, kén-oxidok, szén-monoxid, nitrogén-oxidok és az el nem égett szénhidrogének kibocsátását vizsgáltam, aminek folyamata nem igényel minősített hajtómű-adatokat.

Konstans Emissziós indexek

A CO₂- és H₂O-emisszió mértéke az üzemanyagban lévő szén- és hidrogéntartalom arányától, valamint az elégetett üzemanyag mennyiségétől függ. Hasonlóképpen, a kén-oxidok keletkezése az üzemanyagban található kénvegyületek mennyiségével arányos. Ebből adódóan a CO₂-, H₂O- és SO_x-emissziós indexek állandónak tekinthetők, amennyiben a lejátszódó égést sztöchiometrikusnak vesszük. A jelen projektben a Jet A-1 kerozin EI-értékei az EUROCONTROL adatbázisából származnak és az 1. táblázatban láthatók.³⁹

³⁸ Emissziós Index (EI): A károsanyag-kibocsátás számításához széles körben alkalmazott tényező, mely az egységnyi elégetett üzemanyagra jutó kibocsátott anyag mennyiségét fejezi ki. Mértékegysége: g/kg.

³⁹ Celikel, Ayce – Jelinek, Frank (2001): Forecasting Civil Aviation Fuel Burn and Emissions in Europe - Interim Report. EUROCONTROL Experimental Centre.

CO ₂	H ₂ O	SO ₂
3149 g/kg	1230 g/kg	0,84 g/kg

Nem állandó Emissziós Indexek

A szén-monoxid, a nitrogén-oxidok és az el nem égett szénhidrogének kibocsátásának értékelése lényegesen összetettebb feladat, hiszen kibocsátási indexeik a tolóerőbeállítás és a környezeti feltételek függvényében változnak, ezáltal komplexebb számítási modellt igényelnek. Az ilyen részletességű emissziószámítás jelentős adatelőkészítési, -modellezési és -számítási kapacitást igényel, amely meghaladja a jelen munka kereteit.

Átlagos tüzelőanyag-fogyasztás

Mivel rendelkezésre állnak az adott hajtómű tüzelőanyag-felhasználási adatai, valamint a különböző repülési feladatok időtartamai, lehetőség nyílik az egyes feladatkategóriák átlagos tüzelőanyag-fogyasztásának és emissziójának meghatározására. Ennek során az adott kategóriába tartozó repülések során felhasznált tüzelőanyag mennyiségét összegeztem, majd az adott feladattípushoz tartozó összes repült idővel elosztva meghatároztam az átlagos fajlagos fogyasztást. Az így kapott értékeket a vizsgált szennyező komponensekhez tartozó konstans emissziós indexekkel megszorozva a 2. egyenlet szerint számítható az egyes feladattípusokhoz kapcsolódó teljes károsanyag-kibocsátás a vizsgált időszakra vonatkozóan.

$$\bar{\dot{M}}_{i,j} = EI_i \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_j} m_{f,j,k}}{\sum_{k=1}^{n_j} t_{j,k}} \quad (2)$$

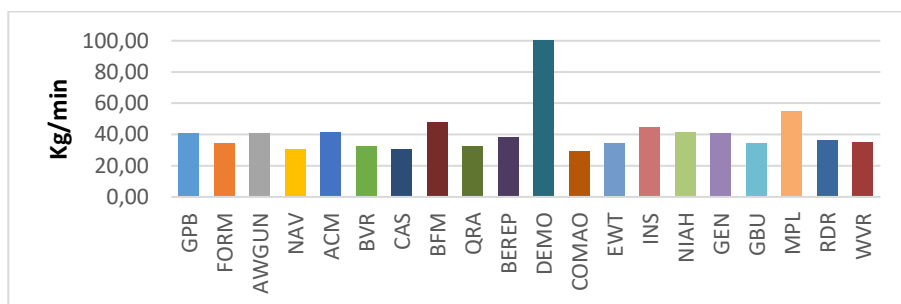
ahol:

$\bar{\dot{M}}_{i,j}$ - az i szennyező komponens j feladattípusra vonatkozó átlagos kibocsátási intenzitása [kg/min];

- El_i - az i komponens emissziós indexe [kg/kg];
- $m_{f,j,k}$ - a j feladattípusba sorolt k -adik repülés során felhasznált tüzelőanyag tömege [kg];
- $t_{j,k}$ - a j feladattípusba sorolt k -adik repülés időtartama [min];
- n_j - a j feladattípushoz tartozó repülések száma.

A modellből kizárásra kerültek azok a felszállások, amelyek során több különböző feladattípus végrehajtása történt, mivel ezek esetében a feladatokon belüli egyes résztevékenységek kezdete és vége nem határozható meg egyértelműen. Ennél fogva a vizsgált időintervallumban repült 2000 óra helyett csupán 1700 órányi repülési feladat feldolgozására volt lehetőség.

Az 5. ábrán látható, hogy az egyes repülési feladattípusokhoz tartozó átlagos tüzelőanyag-fogyasztási értékek jelentős eltéréseket mutatnak, ami jól tükrözi az eltérő repülési profilokat és hajtómű-terhelési szinteket. A vizsgált feladatok többségének esetében az átlagos fogyasztás 30–45 kg/min tartományban alakul, ami a hajtómű közepes teljesítményszintű üzemének felel meg. Ez elsősorban olyan feladattípusokra jellemző, amelyek során a repülőgép nem igényel tartósan magas tolóerőt.



5. számú ábra. A repülési feladattípusok átlagos tüzelőanyag-fogyasztása

A diagram alapján néhány feladattípus ettől jelentősen eltér. Kiugróan magas átlagos tüzelőanyag-fogyasztás a „DEMO” feladatoknál, azaz a műrepülésnél figyelhető meg, amely meghaladja a 100 kg/min értéket. Ezt a folyamatos, gyors irányváltoztatások és kis magasságon, nagy állásszögön végrehajtott manőverek indokolják.

A viszonylag magas fogyasztású feladatok közé sorolható továbbá az MPL, BFM és INS profil, amelyek esetében az átlagos fogyasztás 45–55

kg/min tartományba esik. Ezek a feladatok jellemzően szintén az intenzív manőverezés és a gyakori gyorsítások miatt nagyobb tolóerőt igényelnek, ami magyarázza a megnövekedett tüzelőanyag-felhasználást.

A legalacsonyabb fogyasztási értékek a NAV, COMAO és CAS feladatoknál figyelhetők meg, ahol az átlagos tüzelőanyag-felhasználás 30 kg/min körül alakul. Ezek többek között nagymagasságú útvonalrepülést, stabilabb repülési szakaszokat, illetve alacsonyabb teljesítményszintű hajtóműüzemet feltételeznek.

Az egyes feladattípusok közötti jelentős fogyasztási különbségek arra utalnak, hogy a repülési programok tervezése során tudatos prioritásképzés révén érdemi üzemanyag-megtakarítás érhető el.

Összességében a vizsgált légijárműflotta teljes éves fogyasztása a becslések szerint 3 607 tonna tüzelőanyag volt, ami 11 358 tonna CO₂, 4 436 tonna vízgőz és 3 tonna SO_x kibocsátását jelenti. Ez a mennyiség nagyságrendileg megfeleltethető egy Airbus A320 típusú utasszállító repülőgép fél éves intenzív üzemeltetésének. EUROCONTROL referenciaadatok alapján ez hozzávetőleg 1,26 millió km repült távolságnak felel meg.⁴⁰

Katonai logisztikai alkalmazhatóság

A bemutatott módszer közvetlenül alkalmazható a katonai logisztikai tervezés támogatására. Segítségével meghatározható az egyes feladattípusokhoz tartozó fajlagos tüzelőanyag-igény, amely alapul szolgálhat készletezési, beszerzési és művelettervezési döntésekhez. A modell továbbá lehetőséget ad különböző üzemeltetési forgatókönyvek összehasonlítására, ezáltal hozzájárulva a hatékonyabb és fenntarthatóbb katonai repülőüzemeltetéshez.

A feladattípus-alapú megközelítés különösen előnyös a katonai környezetben, ahol a repülési profilok jelentős variabilitást mutatnak, és a hagyományos, útvonal-alapú modellek nem alkalmazhatók megfelelő pontossággal. A módszer lehetővé teszi, hogy a tüzelőanyag-felhasz-

⁴⁰ EUROCONTROL (2020): Environmental Assessment: European ATM Network Fuel Inefficiency Study. Online: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-12/eurocontrol-european-atm-network-fuel-inefficiency-study.pdf>

nálás és az emisszió közötti kapcsolat közvetlenül a végrehajtott feladatokhoz legyen rendelve, ami pontosabb képet ad az egyes képességek fenntartásának erőforrás-igényéről.

Logisztikai szempontból ez támogatja a tüzelőanyag-ellátási lánc tervezését, különösen a készletszintek meghatározását, az utánpótlási ciklusok optimalizálását, valamint a bázis- és hadműveleti szintű erőforrás-allokációt. Az eredmények felhasználhatók továbbá a különböző kiképzési és műveleti programok összehasonlító elemzésére, amely révén azonosíthatók azok a tevékenységek, amelyek aránytalanul nagy logisztikai terhelést jelentenek.

A módszer hozzájárulhat a döntéstámogatáshoz olyan helyzetekben is, amikor korlátozott erőforrások mellett kell meghatározni a végrehajtható repülési feladatok körét. Ilyen esetekben lehetőség nyílik a különböző feladattípusok tüzelőanyag-igényének és emissziós hatásának összevetésére, ami segíti a prioritások kijelölését.

Emellett a vizsgálat eredményei alapot teremthetnek a környezet-terhelés csökkentését célzó intézkedések kidolgozásához is. A nagy fogyasztású és emisszió-intenzív repülési profilok azonosítása lehetőséget ad arra, hogy bizonyos kiképzési elemek részben szimulációval vagy optimalizált repülési eljárásokkal kerüljenek kiváltásra, ezáltal csökkentve a teljes rendszer logisztikai és környezeti terhelését.

A bemutatott megközelítés nemcsak a tüzelőanyag-felhasználás becslésére alkalmas, hanem integrálható a katonai logisztikai tervezés és döntéstámogatás eszköztárába is, hozzájárulva a hatékonyabb, költségtudatosabb és fenntarthatóbb repülőüzemeltetéshez.

Összefoglalás

A vizsgálat eredményeinek értelmezése során fontos figyelembe venni a módszertani korlátokat. A mintavételes megközelítésből és a származtatott információkból adódóan az eredmények nagyságrendi becslésként értelmezhetők, továbbá a vegyes feladattartalmú repülések kizárása torzíthatja az összképet. Emellett a nem konstans emissziós komponensek elhagyása miatt a teljes környezeti hatás csak részben került számszerűsítésre.

Jelen tanulmány kísérleti projektként készült azzal a céllal, hogy első közelítésben feltárja egy többcélú harcászati repülőgép-flotta éves

üzemeltetéséhez kapcsolódó tüzelőanyag-felhasználás és emissziós terhelés főbb jellemzőit. A vizsgálat során meghatároztam az egyes repülési feladattípusokhoz tartozó átlagos tüzelőanyag-fogyasztási sajátosságokat, becslést adtam a hajtómű-üzemmódok éves megoszlására, valamint ezek alapján feladattípusokra aggregált emissziószámítási megközelítést alkalmaztam. A megközelítés az ICAO, illetve az EMEP/EEA módszertanának azon alapelveire épült, hogy az emisszió számítása a tüzelőanyag-felhasználás és az emissziós tényezők kapcsolatára vezethető vissza, ugyanakkor a jelen munkában ennek egy, a rendelkezésre álló katonai üzemeltetési adatokhoz illesztett, feladattípus-alapú aggregált alakja került felhasználásra.

A teljes éves repülési adathalmaz időlépéses feldolgozása helyett mintavételi megközelítést alkalmaztam: a különböző repülési profilokhoz tartozó feladattípusokból négy-négy reprezentatív feladat részletes elemzésére került sor, majd ezek átlagos jellemzőit vetítettem a teljes állományra. A vegyes feladattartalmú repülések kizárása miatt a vizsgált, 2000 repült órát tartalmazó időszakból 1700 óra feldolgozása valósult meg.

A módszer alkalmasnak bizonyult a tüzelőanyag-felhasználással közvetlen kapcsolatban álló, konstans emissziós indexekkel jellemezhető komponensek — CO_2 , H_2O és SO_x — közelítő meghatározására. Ezzel szemben a CO-, NO_x- és HC-komponensek részletes, időfüggő becslésére a jelen munka nem terjedt ki, mivel azok meghatározása nagy időfelbontású üzemállapot-adatokat, magassági és környezeti korrekciókat, valamint az utánégető-fokozat sajátos emissziós viselkedésének explicit kezelését is igényelné. Ennek megfelelően a jelen vizsgálat elsősorban a flotta emissziós terhelésének nagyságrendi és összehasonlító értékelésére alkalmas. Emellett azonosíthatóak azok a repülési profilok és hajtóműüzemállapot-tartományok, amelyek az éves fogyasztás és emisszió szempontjából meghatározóak, ezáltal jelen munka támogatást nyújthat a későbbi részletesebb emissziós modellezéshez, illetve az üzemeltetési gyakorlat értékeléséhez a környezetterhelés szempontjából.

A jövőbeni kutatások irányát jelentheti a nagy időfelbontású fedélzeti adatokon alapuló emissziós modellek kidolgozása, amelyek lehetővé teszik a nem konstans emissziós komponensek pontosabb meghatározását.

Felhasznált irodalom

Lombardo, Teo (2025): IEA-Aviation Overview. January 2025. International Energy Agency. Online: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

Klöwer, Milan. – Allen, Myles – Lee, David – et al. (2021): Quantifying aviation's contribution to global warming. *Environmental Research Letters*, 16(10), p. 104027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac286e>

Wuebbles, Don – Gupta, Muhan – Ko, Malcolm (2007): Evaluating the impacts of aviation on climate change. *EoS Transactions American Geophysical Union*, 88(14), pp. 157–160. DOI <https://doi.org/10.1029/2007EO140001>

Lindsey, Rebecca (2025): Climate change: atmospheric carbon dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce, November 2025. Online: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Bierwirth, Phill (2016): Carbon dioxide toxicity and climate change: a serious unapprehended risk for human health. Australian National University. Web Published: ResearchGate. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16787.48168>

Karnauskas, Kristopher – Miller, Shelly – Schapiro, Anna (2020): Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO₂ Toward Levels Harmful to Human Cognition. *GeoHealth*, 4(5), DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GH000237>

Kusumaningtiar, Devi Angeliana – Gisely, Vionalita – Septian, Ardiansyah (2020): Air pollution of carbon monoxide: a case study on city traffic jam. *Pollution Research*, 39(4), pp. 911-916. ISSN 0257–8050

Ince, Murharrem – Ince, Kaplan (2019): Introductory Chapter: Sources, Health Impact and Environmental Effect of Hydrocarbons. In Ince, Murharrem – Ince, Kaplan (edt.): *Hydrocarbon Pollution and its Effect on the Environment*. IntechOpen, pp. 1-9. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81556>

De Vries, Wim (2021): Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review. *Current Opinion in Environmental*

Science & Health, 21, p. 100249. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>

Khalaf, Eman – Mohammadi, Mohammad Javad – Sulistiyani, Sulistiyani – Ramírez-Coronel, Andrés et al. (2024): Effects of sulfur dioxide inhalation on human health: a review. *Reviews on Environmental Health*, 39(2), pp. 331–337. DOI: <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0237>

Held Isaac – Soden, Brian (2000): Water Vapor Feedback and Global Warming. *Annual Review of Environment and Resources*, 25(1), pp. 441–475. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.441>

Ni, Mingjiang – Huang, Jianxin – Lu, Shengyong – et al. (2014): A review on black carbon emissions, worldwide and in China. *Chemosphere*, 107(1), pp 83–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.052>

Anderson, John (2005): Introduction to flight. In McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. Boston: McGraw-Hill Higher Education. ISBN 0-07-001641-0

Rohács József – Gausz Zsanna – Gausz Tamás (2012): Repülésmechanika. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest: Typotex. ISBN 978-963-279-615-4

Lee, David – Fahey, David – Skowron, Agnieszka – et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244(1), p. 117834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

ICAO (n.d.): ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Air Freighter. 2024. Online: https://icec.icao.int/Documents/Freighter_Methodology_v2.0_Final.pdf

MyClimate (n.d.): Calculation principles - Flight Emissions Calculator. Online: <https://www.myclimate.org/en/information/about-myclimate/downloads/flight-emission-calculator>

atmosfair gGmbH (n.d.): atmosfair Flight Emissions Calculator Documentation of the Method and Data. Online: https://www.atmosfair.de/en/standards/emissions_calculation/emissions_calculator

UK Department for Energy Security and Net Zero. (2025) Greenhouse gas reporting: conversion factors 2025. Online:

<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2025>

Iken, Nabila – Aguessy, François-Xavier (2022). Calculating the Greenhouse Gas Emissions of Flights: A Comparative Study of Existing Protocols. OP Conference Series: Earth and Environmental Science, 952(1), p. 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/952/1/012002>

Wasiuk, Donata – Lowenberg, Mark – Shallcross, Dudley (2015): An aircraft performance model implementation for the estimation of global and regional commercial aviation fuel burn and emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 35(1), pp. 142–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.022>

Chao, Ching-Cheng (2014): Assessment of carbon emission costs for air cargo transportation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 33(1), pp. 186–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.06.004>

Park, Yongha – O’Kelly, Morton (2014): Fuel burn rates of commercial passenger aircraft: variations by seat configuration and stage distance. Journal of Transport Geography, 41(1), pp. 137–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.08.017>

Kim, Brian – Fleming, Gregg – Lee, Joosung – et al. (2007): System for assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 12(5), pp. 325–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.03.007>

Pagoni, Ioanna – Psaraki-Kalouptsi, Voula (2016): The impact of carbon emission fees on passenger demand and air fares: A game theoretic approach. Journal of Air Transport Management, 55, pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.004>

Pagoni, Ioanna – Psaraki-Kalouptsi, Voula (2017): Calculation of aircraft fuel consumption and CO₂ emissions based on path profile estimation by clustering and registration. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 54, pp. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.006>

Gentile, Elisa – Tarantola, Fabio – Lockley, Andrew (2022): Use of aircraft in ocean alkalinity enhancement. Science of The Total

Environment, 822, p. 153484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153484>

U.S. Department of the Air Force (2024): U.S. Air Force Manual 11-2F-16, Volume 1, F-16 Aircrew Training. Washington, D.C.: Department of the Air Force. Online: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a3/publication/afman11-2f-16v1/afman11-2f-16v1.pdf

UK Ministry of Defence (2026): AJP-3.3 Allied Joint Doctrine Airspace, Edition C. NATO Standardization Office. Online: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/698ef9fb7da91680ad7f4389/AJP_3_3_EdC_V1.pdf

Conners, Timothy (1989): Measurement Effects on the Calculation of In-Flight Thrust for an F404 Turbofan Engine. AIAA Joint Propulsion Conference, Monterey, CA.

Hall, Christopher – Hathaway, Richard – Cote, Sylvana (1983): Investigation of F/A-18A Engine Throttle Usage and Parametric Sensitivities. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 105(3), pp. 627–634. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3227463>

Celikel, Ayce – Jelinek, Frank (2001): Forecasting Civil Aviation Fuel Burn and Emissions in Europe - Interim Report. EUROCONTROL Experimental Centre.

EUROCONTROL (2020): Environmental Assessment: European ATM Network Fuel Inefficiency Study. Online: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-12/eurocontrol-european-atm-network-fuel-inefficiency-study.pdf>

Cote, Scott M. – John L. Birkler (1979): Simulated Mission Endurance Test (SMET) for an Aircraft Engine to be Used in a Fighter/Attack Role. Final Report, Naval Air Development Center, Warminster, Pennsylvania. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA071907.pdf>

May, Robert – Chaffee, David – Stumbo, Paul Bernard et al. (1983): Tactical aircraft engine usage - A statistical study. Journal of Aircraft, 20, pp. 338-344. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.44873>