

Dragan Lazić

REZULTAT UPOTREBE ODRŽIVIH GORIVA NA RAZLIČITIM VISINAMA LETA VAZDUHOPLOVA I NJIHOV UTICAJ NA EMI...

 Singidunum University

Document Details

Submission ID

trn:oid::3117:571489372

Submission Date

Mar 26, 2026, 8:19 AM GMT+1

Download Date

Apr 22, 2026, 1:05 PM GMT+2

File Name

2026-03-26 Doktorska disertacija VERZIJA 1.6.docx

File Size

1.2 MB

144 Pages

33,738 Words

203,669 Characters

4% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text

Top Sources

- 4%  Internet sources
- 3%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Replaced Characters**
91 suspect characters on 13 pages
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 4%  Internet sources
- 3%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	www.meste.org	<1%
2	Internet	sjsutst.polsl.pl	<1%
3	Internet	nardus.mpn.gov.rs	<1%
4	Internet	machinery.mas.bg.ac.rs	<1%
5	Internet	fbim.meste.org	<1%
6	Internet	jaims.in	<1%
7	Internet	www.frontiersin.org	<1%
8	Internet	amcham.rs	<1%
9	Internet	journal.hep.com.cn	<1%
10	Internet	energetskiportal.rs	<1%
11	Internet	nationalgeographic.rs	<1%

12	Internet	www.energy.gov	<1%
13	Internet	www.mdpi.com	<1%
14	Internet	energijabalkana.net	<1%
15	Internet	investpacific.org	<1%
16	Publication	Olga Pleyer, Dan Vrtiška, Petr Straka, Pavel Šimáček. "Co-processing of BTL Fische...	<1%
17	Internet	aseestant.ceon.rs	<1%
18	Internet	ilavirtual.fab.mil.br	<1%
19	Internet	www.futured.es	<1%
20	Publication	Kojic, Radoslav. "Model Vrednovanja Uticaja saobracajnih Tokova i meteoroloskih...	<1%
21	Internet	dspace.mit.edu	<1%
22	Internet	www.wto.org	<1%
23	Internet	docplayer.gr	<1%
24	Internet	www.grafiati.com	<1%
25	Internet	paragraflex.rs	<1%

26	Internet	www.ch-aviation.com	<1%
27	Internet	www.e2.rs	<1%
28	Internet	www.ksau.kherson.ua	<1%
29	Internet	eteze.bg.ac.rs	<1%
30	Internet	coek.info	<1%
31	Internet	issuu.com	<1%
32	Internet	www.nap.edu	<1%
33	Publication	Krstić Simić, Tatjana Ž.. "Uticaj Kompleksnosti Saobraćaja na Manevarskim Površi...	<1%
34	Internet	www.engineeringscience.rs	<1%
35	Internet	dspace.vut.cz	<1%
36	Internet	pl.wikipedia.org	<1%
37	Publication	"Biokerosene", Springer Science and Business Media LLC, 2018	<1%
38	Publication	Ge Song, Haowen An, YaTing Hou, Hua Tong, Jun Liu, Xiaolong Tang, Honghong Yi...	<1%
39	Publication	Krstic, Kristina. "Uloga Roditelja Tokom Prelaska Deteta Iz predškolske Ustanove ...	<1%

40	Publication	Petrović, Slavica M.. "Tržišni Potencijali i Ekonomski Efekti Održivog Korišćenja Dr...	<1%
41	Internet	global-test.acquia.undp.org	<1%
42	Internet	hewariraq.com	<1%
43	Internet	unibl.org	<1%
44	Internet	www.tib.eu	<1%
45	Internet	zh.wikipedia.org	<1%
46	Publication	Rahul Kar, Philippe Bonnefoy, R. John Hansman, Sgouris Sgouridis. "Dynamics of I...	<1%
47	Publication	Tara J. Fortin, Thomas J. Bruno, Tara M. Lovestead. "Comparison of Heat Capacity ...	<1%
48	Internet	global.sypglass.com	<1%
49	Internet	mingor.gov.hr	<1%
50	Internet	rtis2.ut.ac.ir	<1%
51	Internet	www.ekspres.net	<1%
52	Internet	www.glassumadije.rs	<1%
53	Internet	www.researchgate.net	<1%

54	Internet	24sedam.rs	<1%
55	Internet	aero.telegraf.rs	<1%
56	Internet	dokumen.tips	<1%
57	Internet	dspace.lib.ntua.gr	<1%
58	Internet	kind.krx.co.kr	<1%
59	Internet	www.diplomacy.bg.ac.rs	<1%
60	Internet	www.energoportal.info	<1%
61	Internet	www.potpredsjednikmvpei.gov.me	<1%
62	Internet	www.psegs.vojvodina.gov.rs	<1%
63	Internet	www.singipedia.singidunum.ac.rs	<1%
64	Internet	www.springerprofessional.de	<1%
65	Internet	www3.weforum.org	<1%
66	Publication	Knežević, Suzana. "Razvoj inovativne metodologije utvrđivanja kriterijuma za eko...	<1%
67	Publication	Milić Kimi, Šćepan Sinanović, Tanja Prodović, Tanja Ilanković. "Artificial intelligen...	<1%

68	Publication	Protić-Rosić, Isidora I.. "Ispitivanje Imunoremodulatornog Efekta Himernog Prote...	<1%
69	Publication	Sekulic, Tanja. "Efekti Primene matematiakog Modelovanja Na Obradu Pojma Izv...	<1%
70	Publication	Vulić, Ana F.. "Karakteristike Ličnosti i Korišćenje Interneta Kao Činioci Stavova i ...	<1%
71	Internet	adoc.pub	<1%
72	Internet	api.mziq.com	<1%
73	Internet	biznis.rs	<1%
74	Internet	dabar.srce.hr	<1%
75	Internet	doaj.org	<1%
76	Internet	dobarpredak.com	<1%
77	Internet	ebin.pub	<1%
78	Internet	escholarship.mcgill.ca	<1%
79	Internet	fdocuments.net	<1%
80	Internet	grafar.grf.bg.ac.rs	<1%
81	Internet	jedanstepen.org	<1%

82	Internet	media.sveonovcu.rs	<1%
83	Internet	nkd.rs	<1%
84	Internet	oceanus.kmaritime.ac.kr	<1%
85	Internet	old.sf.bg.ac.rs	<1%
86	Internet	openknowledge.worldbank.org	<1%
87	Internet	repozitorij.agr.unizg.hr	<1%
88	Internet	rtnk.me	<1%
89	Internet	sr.wikipedia.org	<1%
90	Internet	stage.diplomatija.com	<1%
91	Internet	www.ba.undp.org	<1%
92	Internet	www.bayer.co.rs	<1%
93	Internet	www.dbfz.de	<1%
94	Internet	www.masinac.org	<1%
95	Internet	www.pgim.com	<1%

96	Internet	www.pks.rs	<1%
97	Internet	www.v1images.com	<1%
98	Internet	www.whidbeyclimate.org	<1%
99	Publication	Backović, Nemanja M.. "Energetska Efikasnost I Mehanizmi Podrške za Obnovljiv...	<1%
100	Publication	Burazer, Nikola M.. "Uticaj Paleosredine na Raspodelu i Obilnost Zasićenih i Arom...	<1%
101	Publication	Cvetković, Slobodan M.. "Modelovanje i Optimizacija Procesu Korišćenja Biogasa ...	<1%
102	Publication	Dubljević, Sanja. "Algoritam za automatizaciju procene ostvarenosti zahteva serti...	<1%
103	Publication	Krsmanović, Nenad. "Potencijal Lignikolnih Vrsta Gljiva Schizophyllum Commune ...	<1%
104	Publication	Milan, Kostić D.. "Ekstrakcija ulja iz semena konoplje (Cannabis sativa L.) i njegov...	<1%
105	Publication	Milošević, Vuk S.. "Aspekt promene geometrije pri dejstvu koncentrisane sile u pr...	<1%
106	Publication	Novakovic, Tanja. "Optimizacija Funkcije stete u Cilju Procene Rizika Osiguranja.",...	<1%
107	Publication	Ostrogonac, Stevan. "Modeli srpskog jezika i njihova primena u govornim i jezicki...	<1%
108	Publication	Vesna Martin. "Sustainability reporting: A case study of selected companies in th...	<1%
109	Internet	beg.aero	<1%

110	Internet	bih.rec.org	<1%
111	Internet	chem.bg.ac.rs	<1%
112	Internet	doctorant.tsue.uz	<1%
113	Internet	eresearch.hiba.edu.sy	<1%
114	Internet	eteze.arts.bg.ac.rs	<1%
115	Internet	fedorabg.bg.ac.rs	<1%
116	Internet	hrcak.srce.hr	<1%
117	Internet	journals.ametsoc.org	<1%
118	Internet	manualzz.com	<1%
119	Internet	network.bepress.com	<1%
120	Internet	pdfslide.net	<1%
121	Internet	repozitorij.pfst.unist.hr	<1%
122	Internet	slovakaviation.sk	<1%
123	Internet	wiadosci.wp.pl	<1%

124	Internet	www.balkan24.info	<1%
125	Internet	www.bazl.admin.ch	<1%
126	Internet	www.belmedia.rs	<1%
127	Internet	www.poduzetnik.com.hr	<1%
128	Internet	www.resfoundation.org	<1%
129	Internet	www.wikizero.com	<1%
130	Internet	zir.nsk.hr	<1%
131	Publication	Dragic, NatUa. "Uticaj Suspendovanih cestica " PM2,5" Iz Vazduha ziv...	<1%
132	Publication	Petrović, Julka. "Ekološki Aspekti Rada Termoelektričnih Postrojenja u Novom Sa...	<1%
133	Publication	Seović, Mina. "Energetski i Ekonomski Aspekti Elektrolitičkog Dobijanja Vodonika ...	<1%
134	Internet	drpress.org	<1%
135	Publication	D.S. Lee, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen et al. "The contribution of global avia...	<1%
136	Publication	Longfei Chen, Aaqib Zafar, Zheng Xu, Shenghui Zhong, Minghua Wang, Yukun Fa...	<1%
137	Publication	Tadić, Snežana R.. "Modeliranje Performansi Integriranih City Logističkih Sistema...	<1%

138

Publication

Valdes, Alejandro Jose Piera. "Greenhouse Gas Emissions from International Aviat... <1%

139

Publication

Yuchao Xu, Yahua Zhang, Xin Deng, Seung-Yong Lee, Kun Wang, Linbo Li. "Biblio... <1%

140

Publication

Šalipur, Hristina V.. "Dobijanje vodonika fotokatalitičkim razlaganjem vode korišć... <1%



UNIVERZITET SINGIDUNUM

BEOGRAD

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**REZULTAT UPOTREBE ODRŽIVIH GORIVA NA RAZLIČITIM
VISINAMA LETA VAZDUHOPLOVA I NJIHOV UTICAJ NA
EMISIJU UGLJEN-DIOKSIDA CO₂**

MENTOR

Prof. dr Dragan Cvetković

KANDIDAT: Dragan A. Lazić

BROJ INDEKSA: 465049/2019

BEOGRAD, 2026. god.

PREDGOVOR

“Ovaj rad nastao je iz sna da letenje bude dostupno i održivo za generacije koje dolaze.”

Autor

Ova doktorska disertacija predstavlja krunu mog višegodišnjeg stručnog, akademskog i ličnog puta. Tema održivog vazduhoplovstva i smanjenja emisije ugljen-dioksida - CO₂¹ kroz upotrebu alternativnih goriva nije bila samo predmet istraživanja, već i deo mog svakodnevnog profesionalnog iskustva.

Kao pilot, imao sam priliku da iz prve ruke sagledam uticaj različitih tipova goriva i operativnih režima leta na performanse vazduhoplova i životnu sredinu. Kao licencirani mehaničar vazduhoplovnih motora, pratio sam tehničke aspekte i izazove uvođenja novih goriva u postojeće sisteme. Ova sinergija teorijskog znanja i praktičnog rada omogućila mi je da ovu temu proučim sa posebnom pažnjom i posvećenošću.

Još od osnovnih i master studija, istraživanje održivih rešenja u vazduhoplovstvu bilo je u fokusu mog akademskog rada, što je rezultiralo objavljivanjem više naučnih radova na ovu temu. Doktorska disertacija logičan je nastavak tog kontinuiteta i moje težnje da doprinesem razvoju efikasnijeg i ekološki prihvatljivijeg vazduhoplovstva.

Izražavam duboku i iskrenu zahvalnost svom mentoru sa Univerziteta Singidunum, profesoru dr Draganu Cvetkoviću, na stručnom vođstvu, korisnim sugestijama i podršci tokom celokupnog istraživačkog procesa.

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru dr Vladimiru Grujiću, pukovniku, koji me je kroz ceo proces pratio ne samo kao profesor, već i kao otac i prijatelj. Njegovo bogato iskustvo i životna mudrost ostavili su snažan pečat na ovaj rad.

¹ Ugljen-dioksid - CO₂ je bezbojni gas, hemijske formule (CO₂) (carbon dioxide), koji nastaje prirodnim procesima (poput disanja i vulkanskih erupcija) i ljudskim aktivnostima (sagorevanje fosilnih goriva i biomase). On je glavni gas **sa efektom staklene baste** (greenhouse gas – GHG) koji doprinosi **globalnom zagrevanju**.

Zahvaljujem se i svim članovima komisije, čije su sugestije i stručne ocene bile dragocene za usmeravanje i unapređenje rada, kao i gospođi Diani Orlić iz studentske službe, na nesebičnoj pomoći i podršci tokom celokupnih doktorskih studija.

Posebno želim da izrazim zahvalnost Mirsadu Medić, pilotu iz Saint Petersburg, Florida, na njegovoj profesionalnoj pomoći i podršci tokom sprovođenja istraživanja na simulatoru letenja. Njegovo iskustvo i stručni saveti značajno su doprineli kvalitetu ovog rada.

Veliku zahvalnost upućujem i kompaniji H55² iz Siona iz Švajcarske, čija inovativna rešenja i istraživačka podrška u oblasti električnog vazduhoplovstva predstavljaju inspiraciju i dragocen oslonac u oblikovanju vizije održivog vazduhoplovstva. Njihov doprinos i saradnja dali su dodatnu vrednost ovom istraživanju. [1]

Zahvaljujem se i svim saradnicima, institucijama i prijateljima koji su svojim savetima, podrškom i bodrenjem doprineli ostvarenju ove disertacije.

Najveću i najdublju zahvalnost dugujem svojoj porodici. Njihova neizmerna ljubav, strpljenje i podrška bili su moj najjači oslonac u trenucima kada su istraživanje, obaveze i izazovi posla delovali nepremostivo. Bez njihove vere u mene, **ovaj rad ne bi bio** moguć.

Posebno **želim da se zahvalim** roditeljima, koji su od najranijih dana u meni negovali radoznalost, vrednoću i upornost. Njihova požrtvovanost i nesebična podrška pokazali su mi put kojim treba ići i dali mi snagu da nikada ne odustanem od svojih ciljeva.

Mojoj supruzi Marini dugujem beskrajnu zahvalnost za razumevanje i strpljenje tokom dugih godina provedenih u istraživanju i pisanju. Njena ljubav i vera u mene bili su svetionik koji me vodio kroz sve prepreke i doveo do cilja.

Zahvaljujem se i svojoj deci Katji, Konstantinu i Kataleji, koja su me svojim osmehom i nevinom radošću podsećala na to zašto se vredi truditi i boriti za svoju budućnost.

Porodica nije bila samo podrška u tehničkom smislu, već snaga koja mi je davala motivaciju da ovaj rad završim. Disertacija je stoga posvećena njima, jer ste vi temelj na kome sam gradio i na kome ću nastaviti da gradim sve svoje buduće uspehe i pobeđe.

² H55 je švajcarska vazduhoplovno-tehnološka kompanija osnovana 2017. godine u Sionu, Švajcarska, koja se bavi razvojem i sertifikacijom električnih pogonskih sistema za vazduhoplove (Electric Propulsion Systems – EPS), uključujući baterije, motore i kontrolne sisteme. Kompanija je nastala kao izdvojeni projekat iz pionirskog programa Solar Impulse, sa ciljem dekarbonizacije vazduhoplovstva kroz elektrifikaciju i hibridne pogonske sisteme.

[1] H55 SA, "Electric Aviation Solutions and Battery Systems White Paper," Sion, Švajcarska, 2024.

Ova disertacija predstavlja rezultat dugogodišnjeg profesionalnog i akademskog rada, proisteklog iz praktičnog iskustva u vazduhoplovstvu i istraživanja održivih energetske rešenja.

1. UVODNA RAZMATRANJA

Globalna kriza resursa, ubrzane klimatske promene i sve strože međunarodne regulative u oblasti zaštite životne sredine usmeravaju pažnju javnosti i industrije ka održivim rešenjima u svim sektorima privrede. Vazdušni saobraćaj, kao ključni stub globalne mobilnosti, suočava se sa sve većim izazovima kada je reč o energetskej efikasnosti i očuvanju životne sredine. Prema podacima Medjvuladinog panela za klimatske promene - IPCC³, vazduhoplovna industrija učestvuje sa oko 3% u ukupnoj emisiji ugljen-dioksida - CO₂ izazvanoj ljudskim delovanjem, a očekuje se da će se taj procenat dodatno povećavati usled rasta saobraćaja, naročito na regionalnim rutama i na letovima na srednjim distancama. [2]

Tradicionalna fosilna goriva, poput kerozina - Jet A-1⁴, i dalje predstavljaju osnovni izvor energije u vazduhoplovstvu, ali su istovremeno i glavni izvor emisije gasova koji utiču na stvaranje efekta staklene bašte. Zbog ograničenosti prirodnih resursa i sve izraženije potrebe za smanjenjem negativnog uticaja na klimu, razvija se koncept održivih vazduhoplovnih goriva - SAF⁵, koja omogućavaju očuvanje performansi letelice, a istovremeno pružaju značajno smanjenje emisije - CO₂ posmatrano kroz ceo životni ciklus goriva. [3]

Poseban izazov u optimizaciji potrošnje goriva i smanjenju emisije CO₂ javlja se kod regionalnih turboprop vazduhoplova, kao što je De Havilland Canada DHC Dash 8 Q400⁶,

³ Medjvuladin panel o klimatskim promenama (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) je telo Ujedinjenih nacija, osnovano 1988. godine od strane Programa Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (United Nations Environment Program – UNEP) i Svetske meteorološke organizacije (World Meteorological Organization – WMO), sa ciljem da procenjuje naučne osnove klimatskih promena, njihove posledice i mogućnosti za adaptaciju i ublažavanje.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: The Physical Science Basis*. Geneva: IPCC, 2023.

⁴ Kerozinsko vazduhoplovno gorivo Jet A-1 je međunarodni standardni tip goriva za turbomlazne i turboelisne vazduhoplove. Hemijski, to je rafinisani oblik kerozina sa tačkom paljenja iznad 38 °C i tačkom smrzavanja do -47 °C. Jet A-1 sadrži aditive protiv smrzavanja i korozije, i koristi se u civilnom i vojnom vazduhoplovstvu širom sveta. Razlikuju se od goriva Jet A (koje se koristi pretežno u SAD-u) po nižoj tački smrzavanja.

⁵ Održivo vazduhoplovno gorivo (Sustainable Aviation Fuel – SAF) predstavlja tečno gorivo proizvedeno iz obnovljivih izvora (biomasa, otpad, sintetički procesi uz korišćenje vodonika i CO₂), koje može da se koristi kao zamena ili mešavina sa standardnim kerozinskim gorivima tipa Jet A-1. SAF se hemijski i fizički ponaša kao konvencionalni kerozin, ali ma značajno niži ugljenični otisak (carbon footprint) tokom životnog ciklusa, čime doprinosi smanjenju emisije gasova sa efektom staklene baste u vazduhoplovstvu.

[3] Lee, David S., et al. "The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing." *Atmospheric Environment* 244 (2021): 117834.

⁶ De Havilland Canada DHC-8 Dash 8 Q400 je regionalni turboprop vazduhoplov kapaciteta do 78 putnika, razvijen od kompanije De Havilland Canada i kasnije proizvođen od strane Bombardier Aerospace. Poznat je po efikasnoj potrošnji goriva i sistemu za redukciju buke (NVS), što ga čini popularnim u regionalnom saobraćaju.

koji su projektovani za letove na kraćim relacijama i pri nižim visinama leta (od FL160 do FL240)⁷. Efikasnost ovakvih letelica zavisi od niza faktora, uključujući aerodinamički otpor, gustinu vazduha, karakteristike pogonskog sistema, kao i visinu leta. Aerodinamički otpor, kojem se mora suprotstaviti potisak, proporcionalan je potrebnom uzgonu, a time i ukupnoj težini vazduhoplova. Povećanjem visine leta, u određenim uslovima, moguće je smanjiti otpor i poboljšati efikasnost potrošnje goriva. [4]

Istovremeno, potreba za prelaskom sa fosilnih goriva na održive alternative postaje sve izraženija kako zbog ekoloških, tako i ekonomskih faktora. Povećanje cena goriva, zajedno sa strožim standardima u vezi sa emisijom gasova sa efektom staklene bašte, podstiče operatora na uvođenje inovacija u upravljanju flotama i operacijama.

Istraživački problem?

Uprkos postojanju brojnih inicijativa i tehnoloških rešenja za uvođenje održivih vazduhoplovnih goriva, uticaj visine leta na potrošnju goriva i emisije CO₂ kod turboprop vazduhoplova nije dovoljno istražen u realnim operativnim uslovima. Dostupna istraživanja su uglavnom zasnovana na laboratorijskim modelima ili simulacijama koje ne obuhvataju promenljive dinamičke faktore leta.

Istraživačko pitanje?

Koja visina leta omogućava optimalan odnos potrošnje goriva i emisije CO₂ pri korišćenju konvencionalnog Jet A-1 goriva i održivog vazduhoplovnog goriva - SAF kod turboprop vazduhoplova De Havilland Dash 8 Q400?

Ova doktorska disertacija fokusirana je na analizu uticaja različitih visina leta na potrošnju goriva i emisiju ugljen-dioksida - CO₂ kod regionalnog turboprop aviona De Havilland Dash 8 Q400, uz uporedno ispitivanje performansi pri korišćenju konvencionalnog Jet A-1 goriva i održivog vazduhoplovnog goriva - SAF. Istraživanje ima za cilj da se utvrdi optimalna visina leta koja omogućava maksimalnu energetske efikasnost i minimalnu emisiju štetnih gasova, kao i da se proceni realan doprinos SAF-a održivosti regionalnog vazdušnog saobraćaja.

⁷ Flight Level - FL označava standardizovani nivo letenja vazduhoplova izražen u stotinama stopa u odnosu na standardni pritisak od 1013.25 hPa (29.92 inHg). Na primer, FL100 predstavlja visinu od 10,000 stopa.

[4] De Havilland Aircraft of Canada. Dash 8 Q400 Aircraft Operating Manual, Toronto, 2020.

Cilj istraživanja?

Opšti cilj istraživanja jeste da se analizira uticaj visine leta na potrošnju goriva i emisiju ugljen-dioksida kod turboprop vazduhoplova prilikom upotrebe Jet A-1 i SAF goriva.

Specifični ciljevi istraživanja su:

- Kvantifikacija potrošnje goriva pri različitim visinama leta.
- Uporedna analiza emisije CO₂ između Jet A-1 i SAF goriva.
- Identifikacija optimalne visine leta za minimalnu emisiju CO₂.
- Evaluacija mogućnosti primene rezultata na ATR 72-600 u regionalnom saobraćaju.

Takodje, disertacija ima višestruki značaj u kontekstu savremenih izazova sa kojima se suočava globalna, ali i domaća vazduhoplovna industrija. Primenom održivih vazduhoplovnih goriva i optimizacijom operativnih profila leta, istraživanje doprinosi razvoju konkretnih strategija za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, što je u skladu sa ciljevima Međunarodne organizacije civilnog vazduhoplovstva - ICAO⁸ i evropske regulative za dekarbonizaciju vazdušnog saobraćaja.

Posebnu praktičnu vrednost rad ima u kontekstu regionalnog vazduhoplovstva, jer se kao studijski model koristi De Havilland Dash 8 Q400, čije karakteristike su izuzetno slične vazduhoplovima ATR 72-600⁹ koje koristi nacionalna vazduhoplovna kompanija Air Serbia¹⁰. Oba modela su turboprop konstrukcije, dizajnirana za slične visinske i daljinske profile, sa akcentom na efikasnost pri nižim visinama leta i kraćim relacijama. [5]

Tokom izrade ove doktorske disertacije identifikovane su brojne profesionalne i tehničke teškoće koje su direktno uticale na dinamiku i metodološki pristup istraživanju.

⁸ Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (International Civil Aviation Organization – ICAO) je specijalizovana agencija Ujedinjenih nacija (United Nations – UN), osnovana 1944. godine potpisivanjem Čikaške konvencije (Chicago Convention), sa ciljem da uspostavlja međunarodne standarde i preporuke za bezbednost, sigurnost i efikasnost civilnog vazduhoplovstva.

⁹ ATR 72-600 je regionalni turboprop vazduhoplov razvijen od kompanije Avions de Transport Regional - ATR, francusko-italijanskog proizvođača vazduhoplova. Ima kapacitet do 78 putnika, maksimalni dolet od oko 1,500 km, i poznat je po niskoj potrošnji goriva i ekonomičnoj eksploataciji na kratkim regionalnim linijama.

¹⁰ Air Serbia je nacionalna vazduhoplovna kompanija Republike Srbije, sa sedištem u Beogradu. Osnovana je 1927. godine pod imenom Aeroput, što je čini jednom od najstarijih vazduhoplovnih kompanija u Evropi. Današnji naziv Air Serbia koristi od 2013. godine, kada je kompanija modernizovana kroz partnerstvo sa Etihad Airways. Baza i glavno čvorište kompanije nalazi se na Aerodromu Nikola Tesla Beograd (Belgrade Nikola Tesla -BEG).

[5] Air Serbia, Sustainability and Fleet Modernization Report 2023, Belgrade, 2023.

Prvi izazov bio je nedostatak dostupnih i sistematizovanih podataka o emisijama ugljen-dioksida - CO₂ prilikom upotrebe različitih vrsta goriva na različitim visinama leta. Većina relevantnih informacija potiče iz zatvorenih industrijskih izvora, što je otežalo direktnu analizu i zahtevalo rad sa sekundarnim podacima i modelima.

Drugi izazov odnosio se na nedovoljnu standardizaciju u testiranju performansi održivih goriva u realnim uslovima letenja. Postojeći naučni radovi često su zasnovani na laboratorijskim simulacijama koje ne obuhvataju sve operativne varijable koje se javljaju u stvarnom letu, naročito u kontekstu promena visine i atmosferskih uslova.

Takođe, tehnički izazov predstavljalo je usklađivanje eksperimentalnih uslova sa operativnim mogućnostima dostupnih vazduhoplova, pri čemu je bilo potrebno analizirati performanse kroz kombinaciju tehničke dokumentacije, zapisa sa letova i standardnih podataka o potrošnji goriva i emisijama.

Dodatna teškoća bila je integracija praktičnog znanja iz vazduhoplovne industrije u akademski okvir, uz poštovanje naučne metodologije, bez narušavanja objektivnosti i strukture istraživanja.

Uprkos navedenim izazovima, rad je realizovan u skladu sa planiranom strukturom i postavljenim istraživačkim ciljevima.

Dobijeni rezultati i zaključci mogu poslužiti kao osnova za operativne preporuke ne samo za Air Serbia, već i za druge regionalne vazduhoplovne prevoznike koji žele da uvedu održiva goriva i optimizuju potrošnju. Takođe, istraživanje može biti osnova za buduće nacionalne strategije održivog vazduhoplovstva, naročito u zemljama koje teže pristupanju evropskim klimatskim ciljevima, kao što je Srbija.

Konačno, ovaj rad doprinosi akademskoj i stručnoj literaturi iz oblasti:

- Održivog vazduhoplovstva,
- Energetske efikasnosti,
- Upotrebe održivog vazduhoplovnog goriva - SAF,
- Aerodinamičkih performansi na različitim visinama,

i predstavlja vredan korak ka uvođenju konkretnih rešenja za smanjenje ekološkog otiska vazdušnog saobraćaja u praksi.

Disertacija predstavlja značajan doprinos kako naučnom razumevanju energetske efikasnosti regionalnih turboprop vazduhoplova, tako i praktičnoj primeni održivih tehnologija u vazдушnom saobraćaju. Njen značaj se ogleda kroz sledeće aspekte:

1. Podrška međunarodnim ciljevima dekarbonizacije

Istraživanje je u direktnoj vezi sa strateškim ciljevima Međunarodne organizacije civilnog vazduhoplovstva - ICAO i Evropske unije¹¹, naročito kroz programe poput:

- CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)¹² — gde se težnja ka neutralizaciji emisije ugljen-dioksida - CO₂ bazira na upotrebi alternativnih goriva i operativnim poboljšanjima, [6]
- ReFuelEU Aviation¹³ — koji obavezuje operatore na povećanje udela održivih vazduhoplovnih goriva u gorivima korišćenim u Evropskoj uniji,
- EU „Fit for 55“¹⁴ paket — koji uključuje dekarbonizaciju transportnog sektora kroz zakonodavne i operativne promene. [7]

Disertacija donosi podatke koji mogu doprineti formiranju tehničkih standarda, smernica i nacionalnih politika usklađenih sa ovim međunarodnim inicijativama.

¹¹ Evropska unija – EU je politička i ekonomska zajednica koja danas okuplja 27 država članica, zasnovana na Ugovoru iz Maastrichta (Maastricht Treaty) potpisanom 1992. godine. EU ima za cilj ekonomsko ujedinjenje, zajedničko tržište, slobodu kretanja ljudi, robe, usluga i kapitala, kao i razvoj zajedničkih politika u oblastima kao što su poljoprivreda, saobraćaj, životna sredina i bezbednost.

¹² CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) je globalni program koji je usvojila Međunarodna organizacija za civilno vazduhoplovstvo - ICAO 2016. godine, sa ciljem da se ograniči rast emisija ugljen-dioksida - CO₂ iz međunarodnog vazdušnog saobraćaja. Program funkcioniše kroz system kompenzacije i smanjenja emisija, gde vazduhoplovne kompanije nadoknađuju deo emisija kupovinom verifikovanih kredita za smanjenje u drugim sektorima.

[6] International Civil Aviation Organization (ICAO). Annex 16: Environmental Protection, Volume IV — CORSIA. Montreal, 2019.

¹³ ReFuelEU Aviation je regulatorna inicijativa Evropske unije - EU, usvojena 2023. godine, koja ima za cilj povećanje upotrebe održivog vazduhoplovnog goriva - SAF u evropskom vazдушnom saobraćaju. Propis obavezuje snabdevače gorivom da od 2025. godine postepeno povećavaju procenat SAF-a u mešavinama sa kerozinskim gorivom Jet A-1, kako bi se smanjile emisije gasova sa efektom staklene baste u skladu sa evropskim ciljevima dekarbonizacije.

¹⁴ Fit for 55 je zakonodavni paket Evropske unije - EU predstavljen 2021. godine, sa ciljem da se do 2030. godine smanje neto emisije gasova sa efektom staklene bašte za najmanje 55% u odnosu na nivo iz 1990. godine. Paket obuhvata ismene i nova pravila u oblastima energetike, transporta i industrije, uključujući proširenje sistema trgovine emisijama (Emissions Trading System - ETS), uvođenje CORSIA i podsticanje upotrebe održivog vazduhoplovnog goriva - SAF kroz inicijativu ReFuelEU Aviation.

[7] European Commission. Fit for 55 Package. Brussels, 2021.

2. Praktična primena za Air Serbia¹⁵ i druge regionalne prevoznike

S obzirom da Air Serbia koristi ATR 72-600, vazduhoplov koji je po tehničkim i performansnim karakteristikama sličan analiziranom Dash 8 Q400, rezultati ovog istraživanja mogu se direktno primeniti za:

- Optimizaciju visinskih profila leta,
- Smanjenje potrošnje goriva i emisije CO₂ na kraćim komercijalnim linijama,
- Razvoj strategije za postepeno uvođenje SAF goriva u svakodnevne operacije,
- i dugoročnu pripremu za regulatorne promene koje dolaze iz EU okvira.

3. Osnova za nacionalnu strategiju održivog vazduhoplovstva

U Srbiji i regionu Zapadnog Balkana trenutno ne postoji jasna nacionalna strategija za implementaciju održivih vazduhoplovnih goriva. Rezultati ovog istraživanja mogu poslužiti kao temelj za izradu takve strategije, uključujući:

- Procenu ekonomske isplativosti SAF goriva u regionalnom saobraćaju,
- Identifikaciju optimalnih operativnih uslova za njihovu primenu,
- i modelovanje dugoročnog uticaja na emisiju štetnih gasova.

4. Akademski i stručni doprinos

Ova disertacija donosi novu vrednost u okviru akademskih istraživanja jer kombinuje:

- Aerodinamičku analizu,
- Operativne profile leta,
- Upotrebu alternativnih goriva,
- i kvantitativnu procenu efekata na životnu sredinu — na jedinstven način, primenjen na realne uslove regionalnog vazduhoplovstva.

Autor

¹⁵ Air Serbia je nacionalna vazduhoplovna kompanija Republike Srbije, osnovana 2013. godine transformacijom nekadašnjeg Jat Airways-a, sa sedištem na Aerodromu Nikola Tesla Beograd - BEG. Kompanija obavlja putnički i teretni saobraćaj ka više od 80 destinacija u Evropi, Severnoj Americi, Aziji i Africi. Air Serbia koristi flotu vazduhoplova tipa Airbus A330, A320 i A319, kao i ATR 72 za regionalne linije. U okviru svoje strategije modernizacije i usklađivanja sa evropskim ekološkim standardima, kompanija je izrazila podršku programima smanjenja emisija ugljen-dioksida - CO₂ i planira uvođenje održivog vazduhoplovnog goriva - SAF u skladu sa inicijativama ICAO CORSIA i Evropskog sistema trgovine emisijama - EU ETS. Ovi koraci predstavljaju važan deo tranzicije Srbije ka integraciji u evropski okvir za zeleno vazduhoplovstvo i klimatsku neutralnost do 2050. godine.

2. TEORIJSKA ZASNOVANOST ISTRAŽIVANJA

2.1. Struktura prvih goriva i začetne ideje o njihovom razvoju

Razvoj goriva predstavlja jednu od ključnih tačaka u tehnološkom napretku čovečanstva. Prva goriva imala su jednostavnu fizičku strukturu i bila su direktno preuzeta iz prirode – prvenstveno drvo, biljni ostaci i životinjski izmet. Njihova primarna uloga bila je stvaranje toplote za grejanje, pripremu hrane i osvetljenje. Već tada, ideja o kontroli sagorevanja i korišćenju oslobođene energije bila je osnovni princip daljeg razvoja energetske izvora.

Uporedo sa civilizacijskim razvojem i pojavom prvih oblika organizovanog transporta i industrije, javlja se potreba za energentima veće gustine, stabilnosti i prenosivosti. U tom kontekstu, nafta¹⁶ i njeni derivati, kao što su kerozin i benzin, postaju predmet sistematskog istraživanja još sredinom 19. veka. Prvi pokušaji destilacije sirove nafte u kerozin predstavljaju prelaz iz ere čvrstih goriva ka eri tečnih goriva, što će kasnije biti osnova za razvoj motora sa unutrašnjim sagorevanjem. [8]

Krajem 19. i početkom 20. veka, sa pojavom termičkih mašina i prvih automobila i vazduhoplova, javlja se i potreba za standardizovanim gorivima. Struktura goriva postaje predmet pažljivog inženjerskog oblikovanja, sa akcentom na hemijski sastav, energetske efikasnost, tačku paljenja i stabilnost pri skladištenju i upotrebi. [9]

U savremenom kontekstu, razumevanje prvih goriva i ideja koje su do njih dovele predstavlja osnovu za analizu energetske tranzicije i prelazak ka održivim i ekološki prihvatljivim alternativama, kao što su biogoriva i sintetička goriva. Osnovni principi – sagorevanje, oslobađanje energije i kontrolisani rad sistema – ostali su nepromenjeni, dok su sredstva i tehnologije koje ih ostvaruju prošle kroz značajnu evoluciju.

¹⁶ Nafta (petroleum, crude oil) je prirodna smeša ugljovodonika u tečnom stanju, nastala razgradnjom organske materije tokom miliona godina u sedimentnim stenama. Predstavlja osnovnu sirovinu za dobijanje derivate goriva (benzin, dizel, kerozin/Jet A-1), ka oi za petrohemijsku industriju. Nafta je ključni emergent globalne ekonomije, ali je i glavni izvor emisija gasova sa efektom staklene bašte (greenhouse gases – GHG) pri sagorevanju.

[8] Dincer, Ibrahim, and Calin Zamfirescu. Sustainable Aviation Energy Systems. Elsevier, 2021.

[9] Kivits, Rob, Graham Charles, and Paul Smith. "Sustainability in Aviation: Introduction of Biofuels." Transportation Research Part D15, no. 8 (2010): 535–540.

2.1.1. Hemijska struktura i karakteristike goriva: poređenje tradicionalnih, savremenih i održivih izvora

Razvoj goriva kroz istoriju oslikava promenu prioriteta u energetsom sektoru – od jednostavne potrebe za energijom ka optimizaciji performansi i očuvanju životne sredine. Hemijski sastav goriva odražava upravo te promene.

1. Prva goriva (drvo, biljni otpad, ugalj)

Hemijska struktura:

- Sastoje se uglavnom od organske materije – celuloze¹⁷, lignina, i hemiceluloze (C₆H₁₀O₅)_n.
- Uglavnom visoka količina vlage i nečistoća.
- Sadrže ugljenik (C), vodonik (H) i kiseonik (O), u nebalansiranim odnosima.

Karakteristike:

- Niska energetska gustina.
- Visoka emisija čvrstih čestica i CO₂ po jedinici oslobođene energije.
- Niska efikasnost sagorevanja i loše kontrolisani procesi.

2. Savremena fosilna goriva (benzin, dizel, kerozin)

Hemijska struktura:

- Mešavina ugljovodonika (alkana¹⁸, cikloalkana i aromatičnih jedinjenja).
- Benzin: pretežno C₅–C₁₂ lančani i razgranati alkani.
- Dizel: C₁₀–C₂₀; Kerozin: C₈–C₁₆.
- Hemijska formula tipična za alkan: C_nH_{2n+2}.

Karakteristike:

- Visoka energetska gustina¹⁹ (~43 MJ/kg).

¹⁷ Celuloza (cellulose) je polisaharid i osnovna strukturna komponenta ćelijskog zida biljaka, sastavljena od linearnih lanaca glukoze (C₆H₁₀O₅)_n povezanih β-1,4-glikozidnim vezama. Predstavlja najzastupljeniji organski polimer u prirodi i koristi se kao sirovina u papirnoj, tekstilnoj, hemijskoj i energetske industriji, uključujući i proizvodnju biogoriva druge generacije (second-generation biofuels).

¹⁸ Alkani (alkanes) su zasićeni ugljovodonici, organska jedinjenja koja se sastoje isključivo od atoma ugljenika (C) i vodonika (H) povezanih jednostrukim kovalentnim vezama. Njihova opšta formula je C_nH_{2n+2}. Osnovni predstavnici su metan (CH₄), etan (C₂H₆), propan (C₃H₈) i butan (C₄H₁₀). Alkani predstavljaju glavnu komponentu nafte i prirodnog gasa i koriste se kao gorivo u energetici i transportu, uključujući i vazduhoplovstvo.

¹⁹ Energetska gustina (energy density) predstavlja količinu energije po jedinici mase (gravimetrijska energetska gustina, MJ/kg) ili po jedinici zapremine (volumetrijska energetska gustina, MJ/L) nekog goriva

- Lako zapaljivi, stabilni pri skladištenju.
- Visoke emisije CO₂, NO_x²⁰, i čestica.
- Precizno kontrolisano sagorevanje u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem.

3. Održiva goriva (SAF – Sustainable Aviation Fuel, biogoriva, e-goriva)

Hemijska struktura:

- Mogu biti biogeni (iz biljne mase, algi, otpada) ili sintetički (Power-to-Liquid, Fischer–Tropsch sinteza).
- Struktura imitira tradicionalne ugljovodonike, ali sa nižim sadržajem aromata i sumpora.
- Primer: HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)²¹ – uglavnom alkan C₁₂–C₁₈.
- E-goriva: proizvedena iz vodonika i CO₂, sintezom u čistim hemijskim procesima.

Karakteristike:

- Smanjene emisije CO₂ (čak do 80% u životnom ciklusu).
- Manji sadržaj nečistoća – manje čađi, SO_x²², NO_x.
- Kompatibilna sa postojećim motorima (drop-in fuels)²³.
- Ponekad manja energetska gustina, ali bolji profil sagorevanja.

ili izvora energije. U vazduhoplovstvu je ključan parameter jer određuje autonomiju let ai performance vazduhoplova, pri čemu kerozin (Jet A-1) ima znatno veću energetska gustinu u poredjenju sa većinom alternativnih goriva i baterijskih sistema.

²⁰ Azotni oksidi (NO_x) predstavljaju grupu gasovitih jedinjenja koja nastaju pri sagorevanju goriva na visokim temperaturama, a obuhvataju uglavnom azot-monoksid (NO) i azot-dioksid (NO₂). U vazduhoplovstvu se emituju iz mlaznih i klipnih motora i doprinose stvaranju ozona (O₃) u troposferi, kiselih kiša i narušavanju kvaliteta vazduha, što ih čini značajnim zagađivačima u klimatskom i zdravstvenom smislu.

²¹ HEFA (Hydroprocessed esters and Fatty Acids) je tip održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) dobijen hidroprocesiranjem estara i masnih kiselina iz obnovljivih izvora poput biljnih ulja, životinjskih masti i otpadnih ulja. HEFA je trenutno najzastupljenija tehnologija u komercijalnoj proizvodnji SAF-a jer proizvodi gorivo hemijski gotovo identično kerozinu tipa Jet A-1, omogućavajući njegovo korišćenje kao “drop-in” goriva bez modifikacija vazduhoplova i infrastrukture.

²² Sumporni oksidi (SO_x) su gasovita jedinjenja koja nastaju sagorevanjem goriva koji sadrže sumpor (S), pre svega sumpor-dioksid (SO₂). U vazduhoplovstvu, emisije SO_x potiču iz kerozinskih goriva kao što je Jet A-1, zavisno od sadržaja sumpora u gorivu. SO_x doprinosi stvaranju kiselih kiša, koroziji materijala i ma negativne efekte na zdravlje ljudi i životnu sredinu.

²³ Drop-in goriva (drop-in fuels) su alternativna goriva koja su po hemijskom sastavu i svojstvima kompatibilna sa konvencionalnim fosilnim gorivima, kao što je kerozin Jet A-1, i mogu se koristiti u postojećim vazduhoplovima, motorima i infrastrukturnim sistemima bez potrebe za tehničkim modifikacijama. U vazduhoplovstvu SAF goriva, kao što su HEFA ili FT-SPK, smatraju se drop-in gorivima jer se mogu mešati sa kerozinom i koristiti bez promene u tehnologiji motora.

Evolucija hemijskog sastava goriva od prirodnih organskih materijala, preko kompleksnih naftnih derivata, do sofisticiranih održivih formulacija jasno oslikava promenu fokusa u energetici – sa sirovog sagorevanja na optimizaciju performansi i redukciju emisija. Održiva goriva danas ne predstavljaju samo alternativu, već i nužnost u kontekstu globalnih klimatskih ciljeva.

Tabela 1. prikazuje uporednu analizu osnovnih hemijskih i funkcionalnih osobina goriva – od prvih goriva, preko fosilnih goriva, do održivih vazduhoplovnih goriva - SAF. Istaknuti su ključni parametri kao što su hemijski sastav, energetska gustina, emisija - CO₂ i čestica, kao i obnavljanje izvora i sadržaj sumpora.

Osobina / Tip goriva	Prva goriva	Fosilna goriva	Održiva goriva (SAF)
Dominantni elementi	C, H, O	C, H	C, H (nizak S, bez aromata)
Energetska gustina (MJ/kg)	~16-20	~42-44	~38-43
Emisije CO ₂	Visoke	Veoma visoke	Snižene (do -80%)
Emisije čestica	Visoke	Srednje do visoke	Niske
Sagorevanje	Nekontrolisano	Visoko optimizovano	Čisto i stabilno
Obnovljivost	Delimično (drvo)	Neobnovljivo	Obnovljivo i sintetičko
Sadržaj sumpora	Zavisí od izvora	Umeren do visok	Minimalan

Tabela 1. Uporedna tabela hemijskih i funkcionalnih osobina.²⁴

2.2. Fosilna goriva u vazduhoplovnoj industriji

Tradicionalna vazduhoplovna industrija u najvećoj meri zavisi od fosilnih goriva, pre svega od kerozina (Jet A-1), koji predstavlja standardno avionsko gorivo. Upotreba ovog goriva generiše značajne količine emisije ugljen-dioksida - CO₂ azotnih oksida - NO_x, sumpor-dioksida - SO₂, kao i čestica koje doprinose zagađenju atmosfere. Globalne rezerve nafte su

²⁴ Autor, na osnovu podataka iz [ASTM D7566 – Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons](#), ICAO CORSIA Sustainability Criteria for SAF i EASA SAF – Technical Overview, 2024.

[10] [ASTM International. ASTM D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. 2022.](#)

ograničene i podložne geopolitičkim rizicima, što dodatno komplikuje održivost trenutnog energetskeg modela vazdušnog saobraćaja. [10]

2.2.1. Istorija naftnih goriva u vazduhoplovstvu

1. Rani period – Goriva slična automobilskom benzinu (1903–1930)

- Prvi vazduhoplovi koristili su motorni benzin, sličan onom za automobile, sa niskim oktanskim brojem (oko 40–60).
- Bez aditiva i bez kontrole čistoće.
- Volatilitnost je bila visoka, što je povećavalo rizik od požara.
- Emisije CO₂ bile su niske zbog male potrošnje, ali i zbog niske efikasnosti motora.

Ovaj period karakteriše eksperimentisanje, bez standardizacije goriva, što je otežavalo razvoj jačih i pouzdanijih motora.

2. Era AVGAS²⁵ goriva (1930–1950):

- Tehnološka eksplozija i uvođenje olova.
- Uspon moćnijih klipnih motora doveo je do potrebe za gorivima sa višim oktanskim brojem, kako bi se izbegla detonacija (nekontrolisano sagorevanje).

Uveden je tetraetil-olovo (TEL)²⁶ kao aditiv za podizanje oktanske vrednosti:

- AVGAS 100/130 – za visokoopterećene motore.
- Kasnije: AVGAS 100LL (Low Lead) – smanjena količina olova, ali i dalje prisutno.

Prednosti:

- Visoka otpornost na detonaciju.
- Pogodno za motore sa većim kompresionim odnosom.

²⁵ Avgas (Aviation Gasoline) je specijalizovano vazduhoplovno gorivo namenjeno prvenstveno za klipne vazduhoplovne motore. Za razliku od kerozinskih goriva poput Jet A-1, avgas je visokooktanski benzin, najčešće poznat kao Avgas 100LL (Low Lead), koji sadrži olovni aditiv tetraetil-olovo radi povećanja oktanske vrednosti i sprečavanja detonacija. Iako se i dalje koristi u generalnom vazduhoplovstvu, njegova upotreba se postepeno smanjuje zbog ekoloških razloga i prelaska na alternativna goriva sa manjim sadržajem olova.

²⁶ Tetraetil-olovo (tetraethyl lead -TEL) je organsko jedinjenje olova, hemijske formule Pb(C₂H₅)₄, koja se istorijski koristi kao aditiv u benzinu radi povećanja oktanskog broja i sprečavanja detonacija (knockinga) u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. Iako je bio široko primenjivan tokom 20. veka, upotreba TEL-a je zabranjena u drumskim gorivima zbog njegove visoke toksičnosti i negativnog uticaja na životnu sredinu i ljudsko zdravlje. Danas se u vazduhoplovstvu koristi isključivo u gorivu Avgas 100LL, ali postoje globalni naponi da se razviju alternativna goriva (unleaded aviation gasoline – unleaded avgas).

Nedostaci:

- Visoke emisije olova – štetno za zdravlje i životnu sredinu.
- Nema potpune sagorevnosti, povećava emisiju nesagorelih ugljovodonika.

Emisije CO₂:

- Prosečno oko 2.3 kg CO₂ po litru potrošenog AVGAS goriva. Klipni motori imaju manju potrošnju goriva, ali nižu efikasnost u odnosu na turbomlazne.

3. Era kerozina – Jet goriva (1950–danas): Standardizacija i globalna primena.

Razvojem turbomlaznih motora, potreban je bio gorivni derivat sirove nafte sa:

- Višom stabilnošću na niskim temperaturama.
- Manjom isparljivošću, većom gustinom energije.

Standardni tipovi goriva:

- Jet A (SAD): tačka paljenja > 38°C, tačka mržnjenja –40°C.
- Jet A-1 (međunarodni): tačka mržnjenja –47°C – pogodan za letove na velikim visinama.
- JP-8 (vojska): sadrži dodatke za otpornost i mazivost.

Hemijski sastav:

- Mešavina parafinskih, aromatskih i cikličnih ugljovodonika, sa gustinom ~0.8 kg/L.
- Energetski sadržaj: 43 MJ/kg.

Emisije CO₂:

- Jet A-1 oslobađa oko 3.16 kg CO₂ po kilogramu goriva, ili ~2.5 kg CO₂ po litru.²⁷

Ekološki aspekti:

- Sadrži arome i sumpor, koji pri sagorevanju emituju čestice (PM) i SO_x.
- Na velikim visinama (8–12 km), emisije vodene pare i NO_x doprinose formiranju kondezacionih tragova i povećanju efekta staklene bašte.

²⁷ Procesna emisija CO₂ zasniva se na hemijskom sastavu JET A-1 goriva (uglavnom C₁₂H₂₆), gde potpuno sagorevanje jednog kilograma goriva proizvodi približno 3.16 kg CO₂. Ova vrednost se dobija na osnovu stehiometrijskih proračuna i potvrđena je u izveštajima IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) i ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology, Verzija 11 (2023).

[11] International Civil Aviation Organization (ICAO), Environmental Report 2022: Aviation and the Environment (Montreal: ICAO, 2022), 34–36.

4. Savremeni izazovi i ograničenja naftnih goriva

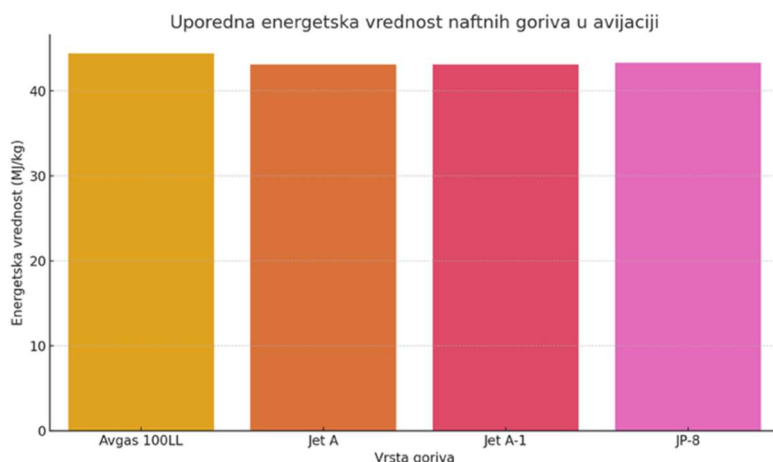
Iako su naftna goriva i dalje standard zbog: [11]

- Visoke energetske gustine,
- Globalne infrastrukture,
- Pouzdanosti i ekonomičnosti,

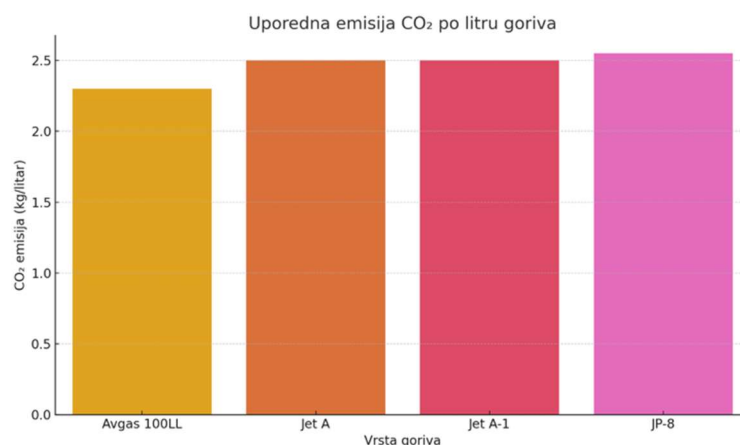
oni predstavljaju najveći izvor emisije CO₂ u vazduhoplovstvu. U 2023. godini, komercijalno vazduhoplovstvo emitovala je preko 1 milijardu tona CO₂, dominantno iz Jet A-1 goriva. [12]

Grafikon 1. prikazuje uporednu energetska vrednost različitih naftnih goriva koja se koriste u vazduhoplovstvu: Avgas 100LL, Jet A-1 i JP-8. Vrednosti su izražene u megadžulima po kilogramu (MJ/kg) i pokazuju da su razlike u energetska gustini između goriva relativno male, krećući se u rasponu od približno 42-44 MJ/kg. Upravo ta sličnost u energetska sadržaju objašnjava zašto sva ova goriva omogućavaju uporedivu pogonsku efikasnost u vazduhoplovima različitih kategorija. [13], [14]

međutim, pored same energetske vrednosti, važno je naglasiti i tehničke i ekološke razlike. Avgas 100LL, namenjen klipnim vazduhoplovima, i dalje koristi olovni aditiv (tetraetil-olovo), što ga čini najvećim ekološkim izazovom u poredjenju sa kerozinskim gorivima. Jet A i Jet A-1 su standardna goriva za turbine, sa Jet A-1 kao globalnim standardom zahvaljujući nižoj tački smrzavanja, što ga čini pogodnim za duge letove u ekstremnim uslovima. JP-8 je vojna verzija Jet A-1, obogaćena dodatnim aditivima, čime se povećava njegova upotrebljivost u zahtevnim operativnim uslovima, ali i ekološki otisak. [14]



Grafikon 1. Uporedna energetska vrednost naftnih goriva u vazduhoplovstvu, sa ključnim tehničkim i ekološkim karakteristikama.²⁸



Grafikon 2. Grafikon koji prikazuje uporednu emisiju CO₂ po litru za različite tipove naftnih goriva u vazduhoplovstvu.

Kroz ovu analizu može se zaključiti da iako sva goriva imaju sličnu energetska vrednost, razlike u hemijskom sastavu, aditivima ekološkom uticaju čine njihovu primenu specifičnom. Upravo ovi faktori naglašavaju značaj razvoja i implementaciju održivih

[12] IPCC 2023.

²⁸ Prikazani Grafikoni 1, 2 i 3. predstavljaju autorsku interpretaciju i grafičku obradu podataka prikupljenih iz različitih naučnih i stručnih izvora. Cilj prikaza je da se na jasan i pregledan način prikaže uticaj primene održivog vazduhoplovnog goriva – SAF na emisiju uglje-dioksida – CO₂, na različitim visinama leta.

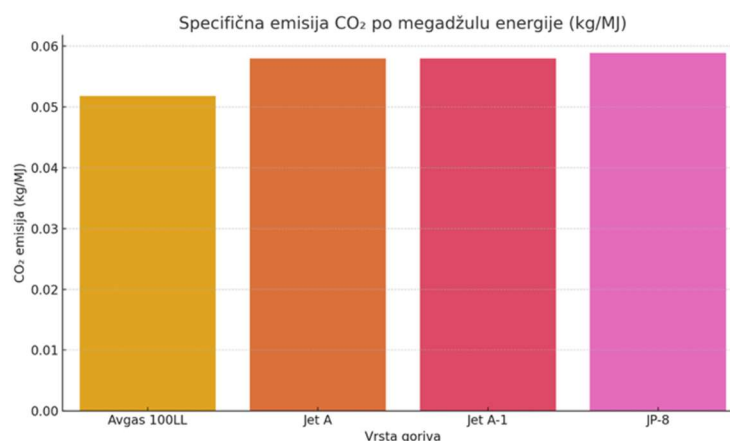
[13] ASTM International. ASTM D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. 2022.

[14] Daggett, David, et al. Alternative Fuels for Use in Commercial Aircraft. NASA/TM-2008-215581, 2008.

[15] Hileman, James I., et al. "Life Cycle Analysis of Alternative Jet Fuels." MIT Report, 2010.

[16] Timko, Michael T., et al. "Impact of Alternative Jet Fuels on Aircraft Emissions and Climate." Environmental Science & Technology 49, no. 10 (2015): 6015–6022.

vazduhoplovnih goriva - SAF, koja nude jednaku ili sličnu energetska vrednost uz značajno smanjenje emisija CO₂ i eliminisanje štetnih aditiva. Prikaz uporedne emisije CO₂ dat je u Grafikonima 2. i 3. [15], [16]



Grafikon 3. Grafikon koji prikazuje specifičnu emisiju CO₂ po mega džulu (MJ) oslobođene energije. Ovaj indikator pomaže da se prikaže karbonska efikasnost goriva, što je odličan argument u poglavlju o analizi emisija i prelasku na održive izvore.

2.3. Održiva vazduhoplovna goriva - SAF

Održiva vazduhoplovna goriva - SAF su alternativna goriva **proizvedena iz obnovljivih izvora kao što su biomasa**, korišćena jestiva ulja, otpad, kao i sintetički putevi uz pomoć CO₂ i obnovljive energije. SAF može smanjiti emisije CO₂ do 85% u poređenju sa konvencionalnim fosilnim gorivima. Biodizel i bioetanol su dominantne forme biogoriva koje se trenutno razvijaju za potrebe vazduhoplovstva. SAF se može koristiti u postojećim motorima bez potrebe za modifikacijama.

2.3.1. Istorijat održivog vazduhoplovnog goriva - SAF

Održivo vazduhoplovno gorivo - SAF je razvijeno kao odgovor na potrebu **da se smanje emisije gasova sa efektom staklene bašte iz** vazduhoplovne industrije, koja je tradicionalno zavisna od fosilnog kerozina. Istorijat SAF-a obuhvata više faza razvoja:

1. Početni razvoj i istraživanje (1980–2000)

Rani radovi na alternativnim gorivima započeli su 1980-ih, uglavnom u vojnom sektoru i istraživačkim institucijama. Fokus je bio na biodizelu i gorivima iz biomase, ali nije bilo praktične primene u vazduhoplovstvu zbog nedovoljnih performansi i stabilnosti.

2. Prve uspešne demonstracije (2008–2011) [17]

- 2008 – Virgin Atlantic je prvi put izvršio let sa delimičnim SAF pogonom (20% SAF na bazi uljane repice u jednom motoru Boeing 747).²⁹
- 2009–2010 – Boeing³⁰ i Airbus³¹ počinju ozbiljno testiranje SAF-a, u saradnji sa proizvođačima goriva kao što su Neste i Honeywell UOP.
- 2011 – ASTM International³² odobrava prvi tip SAF-a: HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) – gorivo iz biljnog ulja i otpadne masti.

²⁹ Virgin Atlantic Airways je britanska vazduhoplovna kompanija sa sedištem u Londonu, osnovana 1984. godine, poznata po inovativnom pristupu i pionirskim projektima u oblasti održivog vazduhoplovstva. Kompanija je jedan od lidera u razvoju i primeni održivog vazduhoplovnog goriva (Sustainable Aviation Fuel – SAF). Virgin Atlantic je 2008. godine izveo prvi probni let na mešavini biogoriva i kerozina, dok je 2023. godine realizovao prvi transatlantski let (London–New York) izveden u potpunosti na SAF-u, čime je demonstrirala tehničku izvodljivost i značajnu ulogu ovog goriva u dekarbonizaciji komercijalnog vazduhoplovstva.

[17] ASTM International. ASTM D7566. 2023.

³⁰ Boeing Company je američka vazduhoplovna i svemirska korporacija, osnovana 1916. godine u Sijetlu, a danas sa sedištem u Arlingtonu, Virdžinija. Boeing je jedan od najvećih svetskih proizvođača putničkih i vojnih vazduhoplova, helikoptera, satelita i odbrambenih sistema. U oblasti održivog vazduhoplovstva, kompanija aktivno razvija tehnologije za smanjenje emisija ugljen-dioksida (CO₂), uključujući podršku razvoju i sertifikaciji održivih vazduhoplovnih goriva – SAF. Boeing je najavio cilj da do 2030. godine svi njegovi komercijalni vazduhoplovi budu sertifikovani za letenje na 100% SAF-u, čime se potvrđuje njegova uloga u globalnoj tranziciji ka dekarbonizaciji vazduhoplovstva.

³¹ Airbus SE je evropska multinacionalna vazduhoplovna i svemirska kompanija, osnovana 1970. godine, sa sedištem u Tuluzu, Francuska. Airbus je jedan od dva vodeća svetska proizvođača putničkih vazduhoplova (uz Boeing), a bavi se i proizvodnjom vojnih vazduhoplova, helikoptera i satelita. U oblasti održivog razvoja, Airbus je lider u istraživanju i implementaciji tehnologija koje omogućavaju smanjenje emisija ugljen-dioksida (CO₂), uključujući upotrebu i sertifikaciju održivih vazduhoplovnih goriva (SAF). Kompanija je najavila planove za razvoj prvog nultootkanskog komercijalnog vazduhoplova na vodonik (ZEROe) do 2035. godine, čime se potvrđuje njen strateški cilj da predvodi tranziciju ka klimatski neutralnom vazduhoplovstvu.

³² ASTM International (American Society for Testing and Materials) je međunarodna organizacija za standardizaciju, osnovana 1898. godine u Sjedinjenim Američkim Državama. Bavi se razvojem i objavljivanjem tehničkih standarda za širok spektar materijala, proizvoda, sistema i usluga. U oblasti vazduhoplovstva, ASTM standardi definišu zahteve za vazduhoplovna goriva (na primer Jet A, Jet A-1, SAF), ka oi za materijale, procese održavanja i testiranje. Zbog globalnog prihvatanja, ASTM standardi predstavljaju osnovu za sertifikaciju i bezbednosne propise u međunarodnom vazduhoplovstvu.

3. Komercijalna upotreba i standardizacija (2012–2020)

- Vazduhoplovne kompanije poput Lufthansa³³, KLM³⁴ i United Airlines³⁵ uvode SAF u redovnu upotrebu na ograničenim rutama.
- Više procesa dobijanja SAF-a dobija ASTM certifikaciju: FT-SPK, SIP, ATJ-SPK³⁶ itd.
- SAF se koristi kao drop-in fuel, tj. može se mešati do 50% sa tradicionalnim kerozinom bez izmene motora.
- **CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)** je **2016.** godine podržao SAF kao meru za smanjenje emisija.

4. Ekspanzija i podrška državnih politika (2020–danas)

- EU, SAD i druge zemlje donose zakone i strategije za stimulaciju SAF proizvodnje.
- 2021 – Airbus uspešno izvršava letove sa 100% SAF-om u jednom motoru.

³³ Lufthansa Group je jedna od najvećih evropskih vazduhoplovnih grupa sa sedištem u Kelnu, Nemačka, koja obuhvata vazduhoplovne kompanije **Lufthansa, SWISS, Austrian Airlines, Brussels Airlines i Eurowings**. Grupa je globalni pionir u uvođenju održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) u redovne operacije. Lufthansa je još 2011. godine realizovala prvi komercijalni let na mešavini SAF-a i kerozina, a danas sarađuje sa brojnim proizvođačima i partnerima kako bi povećala upotrebu SAF-a, **sa ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine**. Lufthansa Group nudi i korporativnim i privatnim klijentima opcije kupovine SAF-a za smanjenje njihovog ugljeničnog otiska.

³⁴ KLM Royal Dutch Airlines (Koninklijke Luchtvaart Maatschappij) je nacionalna vazduhoplovna kompanija Kraljevine Holandije, osnovana 1919. godine, što je čini najstarijom vazduhoplovnom kompanijom na svetu koja i dalje posluje pod originalnim imenom. KLM je među globalnim pionirima u primeni održivog vazduhoplovnog goriva (Sustainable Aviation Fuel – SAF). Još 2011. godine kompanija je realizovala prvi komercijalni let sa putnicima na mešavini biogoriva i kerozina, a od 2019. godine sprovodi program Corporate SAF Programme, kroz koji korporativni klijenti učestvuju u finansiranju i povećanju upotrebe SAF-a. KLM teži postizanju neto-nulte emisije CO₂ **do 2050. godine, u skladu sa ciljevima Evropske unije i ICAO CORSIA** okvirom.

³⁵ United Airlines je jedna od najvećih američkih vazduhoplovnih kompanija, sa sedištem u Čikagu, Illinois. Kompanija je globalni lider u oblasti održivog vazduhoplovstva i među prvim vazduhoplovnim prevoznicima koji su se obavezali na neto-nultu emisiju ugljen-dioksida (CO₂) do 2050. godine, i to bez oslanjanja na tradicionalne metode kompenzacije emisija (carbon offsets). United Airlines je realizovao prvi komercijalni let sa putnicima korišćenjem 100% održivog vazduhoplovnog goriva (Sustainable Aviation Fuel – SAF) u jednom od motora Boeinga 737 MAX 8 (2021). Kompanija aktivno ulaže u razvoj SAF-a i tehnologija za hvatanje i skladištenje ugljenika (Carbon Capture and Storage – CCS), čime potvrđuje svoju vodeću ulogu u tranziciji ka dekarbonizovanom vazduhoplovstvu.

³⁶ **FT-SPK (Fischer–Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene)** – gorivo proizvedeno **Fischer–Tropsch** procesom gasifikacije ugljeničnog izvora (biomasa, prirodni gas, ugljenik bogat otpad) i naknadne sinteze u parafinski kerozin. Može se mešati sa Jet A-1 do 50%. **SIP (Synthesized Iso-Paraffins, poznat i kao HEFA-SIP)** – gorivo proizvedeno iz šećera putem mikrobioloških procesa fermentacije u izo-parafine. Dozvoljeno je mešanje sa Jet A-1 do **10%. ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene)** – gorivo dobijeno pretvaranjem alkohola (etanol, izobutanol) u kerozin kroz katalitičke procese. Može se mešati do 50% sa Jet A-1. Ova goriva imaju skoro identična svojstva kao fosilni kerozin, što omogućava njihovu upotrebu u postojećim motorima i infrastrukturi, uz značajno smanjenje emisija CO₂ tokom životnog ciklusa.

- 2022–2025 – Rast investicija u proizvodne kapacitete (primeri su: Neste³⁷, World Energy³⁸, Fulcrum BioEnergy³⁹).
- SAF se sve češće koristi u komercijalnim letovima, naročito za rute koje promovišu “zeleno letenje”.

5. Budućnost (do 2050) [18]

- SAF je ključni deo plana IATA i ICAO za neto-nultu emisiju do 2050. godine.
- Očekuje se masovna proizvodnja SAF-a iz otpadne biomase, algi, CO₂ reciklaže i sintetičkih procesa pomoću obnovljivih izvora.

2.3.2. Istorijat SAF-a u kontekstu vojnog i civilnog vazduhoplovstva, sa posebnim osvrtom na Evropu i SAD

1. SAF u vojsci (posebno SAD i NATO) [19]

- 2006–2009: Američko ratno vazduhoplovstvo (USAF)⁴⁰ je među prvima testiralo alternativna goriva zbog energetske bezbednosti i nezavisnosti.

³⁷ Neste Oyj je finska energetska kompanija sa sedištem u Espou, osnovana 1948. godine. Danas je globalni lider u proizvodnji obnovljivih goriva i najveći svetski proizvođač održivog vazduhoplovnog goriva (SAF). Njihov glavni proizvod, Neste MY SAF, proizvodi se uglavnom od otpadnih ulja i masti (Waste Oils and Residues – WOR), što omogućava smanjenje emisije ugljen-dioksida (CO₂) i do 80% tokom životnog ciklusa goriva u poređenju sa kerozinom Jet A-1. Kompanija aktivno sarađuje sa vodećim svetskim vazduhoplovnim kompanijama, uključujući Lufthansa, KLM, Delta i United Airlines, u cilju povećanja upotrebe SAF-a i dostizanja klimatske neutralnosti vazduhoplovstva.

³⁸ World Energy, LLC je američka energetska kompanija sa sedištem u Bostonu, osnovana 1998. godine, koja spada među pionire u oblasti obnovljivih goriva. Kompanija je 2016. godine pokrenula prvu komercijalnu proizvodnju održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) u Sjedinjenim Američkim Državama, u rafineriji u Paramountu, Kalifornija. World Energy proizvodi SAF uglavnom iz hidrogenizovanih biljnih ulja i masti (HEFA-SPK), a njegovi proizvodi odobreni su prema standardu ASTM D7566 za mešavinu sa kerozinom Jet A-1 do 50%. Kompanija sarađuje sa vodećim vazduhoplovnim prevoznicima i partnerima poput United Airlines, JetBlue i Amazon Air, sa ciljem smanjenja emisije ugljen-dioksida (CO₂) i ubrzanja tranzicije ka održivom vazduhoplovstvu.

³⁹ Fulcrum BioEnergy, Inc. je američka kompanija osnovana 2007. godine sa sedištem u Pleasantonu, Kalifornija, specijalizovana za proizvodnju održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) iz komunalnog čvrstog otpada (Municipal Solid Waste – MSW). Kompanija koristi proces gasifikacije otpada i naknadne Fischer–Tropsch (FT-SPK) sinteze za dobijanje sintetičkog kerozina. Fulcrum je otvorio prvu komercijalnu postrojenje Sierra BioFuels Plant u Nevadi, sa ciljem proizvodnje više od 10 miliona galona SAF-a godišnje. Kompanija sarađuje sa velikim vazduhoplovnim kompanijama poput United Airlines i Cathay Pacific, kao i sa vojnim sektorom, u cilju dekarbonizacije vazduhoplovstva i smanjenja emisija ugljen-dioksida (CO₂).

[18] IATA. Fly Net Zero: Roadmap to 2050. Montreal/Geneva, 2022.

[19] Federal Aviation Administration (FAA). Cleared for Takeoff: FAA's Role in the SAF Grand Challenge. 2023.

⁴⁰ Ratno vazduhoplovstvo Sjedinjenih Američkih Država (United States Air Force – USAF) predstavlja jednu od grana Oružanih snaga Sjedinjenih Američkih Država (United States Armed Forces – USAF/USAFR), formiranu 1947. godine kao nezavisna vojna služba. USAF je najveće i tehnološki najnaprednije vojno vazduhoplovstvo na svetu, zaduženo za odbranu američkog vazdušnog i svemirskog prostora, strateško odvracanje i globalnu projekciju moći. U kontekstu održivog razvoja, USAF aktivno učestvuje u istraživanju

- 2011: USAF postaje prva vojska na svetu koja koristi SAF (FT-SPK) za operativne letove.
- NATO⁴¹ zemlje razvijaju zajedničke standarde i logističku podršku za korišćenje SAF-a u vojnim misijama.
- U SAD-u, DARPA⁴² i DoD ulažu u razvoj sintetičkih goriva iz algi i otpada.

2. SAF u Evropi [20]

- Evropska unija pokreće programe poput Clean Sky⁴³, Horizon 2020⁴⁴ i ReFuelEU Aviation za podršku SAF tehnologijama.
- 2011–2013: Lufthansa sprovodi prvi višemesečni test SAF-a u redovnom saobraćaju (Frankfurt–Hamburg).

i primeni održivih vazduhoplovnih goriva - SAF, uključujući testiranja i sertifikaciju JP-8 i drugih vojnih goriva u mešavinama sa SAF-om, kako bi se povećala energetska bezbednost i smanjio ekološki otisak vojnih operacija.

⁴¹ Severnoatlantski savez (North Atlantic Treaty Organization – NATO) je političko-vojni savez osnovan 1949. godine potpisivanjem Severnoatlantskog ugovora u Vašingtonu. NATO danas okuplja 32 države članice i predstavlja ključni okvir za kolektivnu bezbednost, zajedničku odbranu i međunarodnu saradnju. U oblasti vazduhoplovstva, NATO koristi standardizovano vojno kerozinsko gorivo JP-8, koje je razvijeno upravo za potrebe Alijanse radi povećanja interoperabilnosti i bezbednosti snabdevanja. Pored tradicionalne upotrebe, NATO kroz istraživačke programe i partnerstva sa industrijom ispituje mogućnosti primene održivog vazduhoplovnog goriva - SAF u cilju smanjenja zavisnosti od fosilnih goriva i smanjenja emisija ugljen-dioksida (CO₂).

⁴² Agencija za napredne istraživačke projekte u oblasti odbrane (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA) je istraživačka i razvojna agencija Ministarstva odbrane Sjedinjenih Američkih Država (United States Department of Defense – DoD), osnovana 1958. godine kao odgovor na lansiranje Sputnjika. DARPA je zadužena za razvoj revolucionarnih tehnologija koje unapređuju nacionalnu bezbednost, uključujući oblasti vazduhoplovstva, svemira, energetike, informacionih sistema i biotehnologije. U kontekstu energetike i vazduhoplovstva, DARPA finansira projekte razvoja alternativnih i održivih goriva, naprednih baterijskih sistema, kao i tehnologija za smanjenje emisija ugljen-dioksida (CO₂) u vojnim i civilnim operacijama.

[20] European Commission. ReFuelEU Aviation. Brussels, 2023.

⁴³ Clean Sky Joint Undertaking (CSJU) je najveći evropski istraživačko-inovacioni program u oblasti vazduhoplovstva, pokrenut 2008. godine od strane Evropske komisije (European Commission – EC) i vazduhoplovne industrije. Cilj programa je razvoj i demonstracija naprednih tehnologija koje smanjuju emisije ugljen-dioksida (CO₂), azotnih oksida (NO_x) i buku vazduhoplova, čime se unapređuje ekološka održivost vazduhoplovstva. Clean Sky finansira projekte vezane za nove aerodinamičke koncepte, lagane materijale, električne i hibridne pogonske sisteme, kao i integraciju održivih vazduhoplovnih goriva (SAF). Ovaj program je od 2021. godine nastavljen kroz inicijativu Clean Aviation Joint Undertaking (CAJU) u okviru programa Horizon Europe.

⁴⁴ Horizon 2020 je najveći istraživačko-inovacioni program Evropske unije (European Union – EU), sproveden u periodu od 2014. do 2020. godine, sa ukupnim budžetom od oko 80 milijardi evra. Program je bio usmeren na podršku projektima koji unapređuju nauku, industrijsko liderstvo i rešavanje globalnih izazova, uključujući klimatske promene, energetsku tranziciju i održivi transport. U oblasti vazduhoplovstva, Horizon 2020 je finansirao inicijative poput Clean Sky 2 Joint Undertaking (CSJU), sa ciljem razvoja novih tehnologija koje smanjuju emisije ugljen-dioksida (CO₂), potrošnju goriva i buku, kao i podrške implementaciji održivih vazduhoplovnih goriva (SAF).

[21] U.S. Department of Energy. SAF Grand Challenge Roadmap. Washington, D.C., 2022.

- 2021: Francuska i Nemačka uvode propise za obavezno mešanje SAF-a u komercijalne letove (tzv. blending mandate).
- 2024: EU uvodi pravilo da svaki let koji polazi iz EU mora sadržati min. 2% SAF-a – raste do 70% do 2050.

3. SAF u Sjedinjenim Američkim Državama [21]

- 2009–2011: Boeing i federalne vazduhoplovne vlasti Sjedinjenih Američkih Država (FAA) formiraju Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI)⁴⁵.
- United Airlines – prva američka kompanija koja koristi SAF na redovnim letovima (od 2016. godine iz LAX).
- California postaje centar za SAF proizvodnju (World Energy, Neste, Fulcrum).
- Bidenova administracija 2021. godine lansirala SAF Grand Challenge⁴⁶ – cilj: 3 milijarde galona SAF-a godišnje do 2030. godine.

4. SAF kod velikih proizvođača vazduhoplova

- Airbus testira letove sa 100% SAF od 2021. godine.
- Boeing se obavezao da će svi njegovi vazduhoplovi moći koristiti 100% SAF do 2030. godine.

⁴⁵ CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) je inicijativa osnovana 2006. godine u Sjedinjenim Američkim Državama kao zajednički napor Federalne uprave za civilno vazduhoplovstvo (Federal Aviation Administration – FAA), vazduhoplovnih kompanija, proizvođača motora i vazduhoplova, snabdevača gorivom i istraživačkih institucija. CAAF-I ima za cilj da ubrza razvoj, sertifikaciju i komercijalnu upotrebu alternativnih i održivih vazduhoplovnih goriva (SAF) koja su bezbedna, ekonomična i kompatibilna sa postojećom infrastrukturom. Inicijativa igra ključnu ulogu u povezivanju industrije, regulatornih tela i naučnih institucija radi smanjenja emisije ugljen-dioksida (CO₂) i podrške tranziciji ka dekarbonizovanom vazduhoplovstvu.

⁴⁶ SAF Grand Challenge je nacionalna inicijativa Sjedinjenih Američkih Država pokrenuta 2021. godine od strane Bele kuće (White House) u saradnji sa ključnim federalnim agencijama – Ministarstvom energetike (U.S. Department of Energy – DOE), Ministarstvom saobraćaja (U.S. Department of Transportation – DOT) i Ministarstvom poljoprivrede (U.S. Department of Agriculture – USDA). Cilj inicijative je da se ubrza razvoj, proizvodnja i upotreba održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) u SAD, kroz partnerstvo javnog i privatnog sektora. Postavljeni su ambiciozni ciljevi: proizvodnja najmanje 11 milijardi litara (3 milijarde galona) SAF-a godišnje do 2030. godine i dostizanje 100% SAF upotrebe u američkom vazduhoplovstvu do 2050. godine, čime bi se značajno smanjile emisije ugljen-dioksida (CO₂) iz vazduhoplovnog sektora.



Grafikon 4. Vremenska linija razvoja održivog vazduhoplovnog goriva (SAF), sa ključnim događajima od 1980. godine do planiranih ciljeva do 2050. godine⁴⁷

- Rolls-Royce⁴⁸, GE⁴⁹ i Pratt & Whitney⁵⁰ testiraju motore na čistom SAF-u za certifikaciju.

Grafikon 4. iznad prikazuje hronološki pregled ključnih faza razvoja i implementacije održivog vazduhoplovnog goriva (SAF) u periodu od 1988. do 2050. godine. Cilj ovog prikaza je da istakne najznačajnije tehnološke i regulatorne događaje koji su oblikovali proces energetske tranzicije u vazдушnom saobraćaju.

⁴⁷ Autorski prikaz na osnovu relevantne literature i međunarodnih izvora (ASTM, ICAO, EU, IATA).

⁴⁸ Rolls-Royce plc je britanska multinacionalna kompanija osnovana 1906. godine, sa sedištem u Derbyju, Ujedinjeno Kraljevstvo, i jedan je od vodećih svetskih proizvođača mlaznih i turboprop vazduhoplovnih motora, kao i naprednih pogonskih sistema za industriju i odbranu. U oblasti dekarbonizacije vazduhoplovstva, Rolls-Royce je među globalnim liderima u razvoju motora kompatibilnih sa 100% održivim vazduhoplovnim gorivom (SAF). Kompanija je sprovela opsežna ispitivanja motora Trent i Pearl serije na čistom SAF-u i najavila da će svi civilni vazduhoplovni motori u proizvodnji biti sertifikovani za rad na 100% SAF do 2023–2024. godine, čime doprinosi ostvarivanju ciljeva smanjenja emisija ugljen-dioksida (CO₂) u komercijalnom vazduhoplovstvu.

⁴⁹ General Electric Aerospace (GE Aerospace), ranije poznat kao GE Aviation, je američka kompanija sa sedištem u Sinsinatiju, Ohajo, i jedan je od najvećih svetskih proizvođača mlaznih i turboprop vazduhoplovnih motora. Kompanija je osnovana 1917. godine kao pionir u razvoju vazduhoplovnih motora u Sjedinjenim Američkim Državama. GE Aerospace ima ključnu ulogu u globalnoj tranziciji ka održivom vazduhoplovstvu kroz razvoj motora kompatibilnih sa 100% održivim vazduhoplovnim gorivom (SAF). Njihovi motori iz porodica GE90, GENx, Passport i CF34, kao i oni koje proizvode u saradnji sa CFM International (na primer LEAP), testirani su na visokim udelima SAF-a, čime kompanija doprinosi smanjenju emisija ugljen-dioksida (CO₂) i podržava ciljeve neto-nulte emisije do 2050. godine u civilnom vazduhoplovstvu.

⁵⁰ Pratt & Whitney je američka kompanija osnovana 1925. godine, danas deo grupacije RTX Corporation (nekada Raytheon Technologies), sa sedištem u Istonu, Konektikat. Kompanija je jedan od vodećih globalnih proizvođača mlaznih, turboprop i turboventilatorskih motora za civilno i vojno vazduhoplovstvo. Pratt & Whitney ima značajnu ulogu u dekarbonizaciji vazduhoplovstva kroz razvoj motora kompatibilnih sa 100% održivim vazduhoplovnim gorivom (Sustainable Aviation Fuel – SAF). Njihova porodica motora GTF (Geared Turbofan), uključujući modele PW1100G-JM i PW1500G, već je sertifikovana za rad sa mešavinama SAF-a do 50% i intenzivno se testira za upotrebu 100% SAF-a, uz istovremeno smanjenje potrošnje goriva i emisija ugljen-dioksida (CO₂) i do 20% u poređenju sa prethodnim generacijama motora.

Prvi eksperimenti sa upotrebom alternativnih goriva u vazduhoplovstvu započeti su 1988. godine, dok je 2008. godine izveden prvi komercijalni let na mešavinu SAF-a i konvencionalnog kerozina. Odobrenje prvih standarda za korišćenje SAF-a od strane organizacije ASTM usledilo je 2011. godine, čime je omogućena njegoa šira industrijska primena.

Period od 2016. do 2023. godine obeležili su značajni međunarodni regulatorni i tehnički pomaci. Uvedene su inicijative poput CORSIA programa za kompenzaciju i smanjenje emisija u međunarodnom vazduhoplovstvu, kao i evropskog paketa mera Fit for 55, dok su istovremeno sprovedeni brojni eksperimentalni i demonstracioni letovi sa sve većim udelom SAF-a, uključujući i probne letove sa 100% SAF-om.

U skladu sa aktuelnim strateškim dokumentima, predviđa se da će do 2030. godine u Evropskoj uniji biti propisan obavezni minimalni udeo SAF-a u ukupnoj potrošnji goriva za komercijalno vazduhoplovstvo. Globalni cilj za 2050. godinu jeste postizanje neto nultih emisija CO₂ u sektoru vazdušnog saobraćaja.

Grafikon jasno ilustruje evolutivni karakter energetske tranzicije u vazduhoplovstvu naglašavajući ključnu ulogu sinergije između tehničkih inovacija i međunarodnih politika u postepenom smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte.

2.4. Performanse vazduhoplova i uticaj visine leta

Visina leta značajno utiče na aerodinamičku efikasnost vazduhoplova i potrošnju goriva. Na većim visinama (do tropopauze), temperatura vazduha opada, a gustina je manja, što rezultira smanjenim otporom vazduha. Ipak, proces penjanja i spuštanja zahteva dodatnu energiju. Istraživanja pokazuju da pravilno izabrana visina leta može značajno smanjiti ukupnu potrošnju goriva, naročito kod turboprop vazduhoplova koji imaju optimalne performanse na srednjim visinama (FL160–FL240)⁵¹.

⁵¹ Nivo leta (Flight Level – FL) je standardizovana visina izražena u stotinama stopa (ft), koja se koristi u vazdušnoj navigaciji iznad takozvanog pritiskog sloja prelaza (Transition Altitude). Umesto stvarne nadmorske visine, nivo leta se određuje na osnovu standardnog atmosferskog pritiska od 1,013.25 hPa (29.92 inHg), čime se obezbeđuje jedinstven referentni pritisak za sve vazduhoplove pri krstarećim visinama. Na primer, FL350 označava horizontalnu ravan u kojoj je barometarski pritisak jednak visini od 35,000 stopa u odnosu na standardni pritisak. Upotreba nivoa leta omogućava sigurno vertikalno razdvajanje vazduhoplova u međunarodnom vazdušnom prostoru.

[22] Brasseur, Guy P., et al. "Impact of Aviation on Climate: ACCRI Phase II." *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, no. 4 (2016): 561–583.

Performanse vazduhoplova i uticaj visine leta su ključni faktori u aerodinamici, ekonomiji leta i emisijama, naročito kada govorimo o upotrebi SAF-a. Evo pregleda kako visina leta utiče na performanse vazduhoplova: [22]

1. Gustina vazduha i visina

Sa porastom visine, gustina vazduha opada – to utiče na:

- Manji otpor vazduha → veća ekonomičnost.
- Manje pojačanje motora jer turbine dobijaju manje kiseonika.
- Veća efikasnost krstarećih režima letenja.
- Optimalna visina omogućava najbolji kompromis između potrošnje goriva i performansi.

2. Potrošnja goriva i visina

Na većim visinama (FL300–FL400), vazduhoplovi troše manje goriva po pređenoj milji, jer:

- Manji otpor = manja sila potrebna za održavanje brzine.
- Motori rade sa nižim potiskom = veća termička efikasnost.
- Međutim, penjanje do te visine troši dodatno gorivo, pa je težina vazduhoplova važna za izbor optimalnog FL (Flight Level). [23]

3. Emisije CO₂ i visina leta

SAF smanjuje CO₂ emisije u proseku za 60–80% tokom životnog ciklusa, ali:

- Na velikim visinama, nastaje više kondenzacionih tragova i NO_x emisija, koje imaju indirektni efekat na klimu.
- Zato se razmatraju “climate-optimal” visine – koje kombinuju emisije i atmosferske uslove.

4. Performanse i težina vazduhoplova

Na većim visinama, vazduhoplov ima:

- Manji “lift” zbog ređe atmosfere → mora da leti brže da generiše isti uzgon.

[23] Wilkerson, J. T., et al. “Avoiding Contrails by Changing Aircraft Altitude.” *Environmental Science & Technology* 44, no. 24 (2010): 9277–9283.

- Manju marginu između stall-a i maksimalne brzine (tzv. “Coffin corner”⁵² kod velikih visina).
- Performanse su takođe povezane sa gorivom – SAF ima sličnu energetska gustinu kao Jet-A1, ali neke varijante mogu imati nešto nižu gustinu → uticaj na domet i maksimalnu visinu kod manjih vazduhoplova.

5. Posebno kod lakih vazduhoplova (na primer - Bristell⁵³) [24], [25]

- Efikasnost propelerskih vazduhoplova je najbolja između 5,000 i 10,000 ft.
- Rotax motori⁵⁴ (kao u Bristellu) imaju turbo ili non-turbo verzije → turbo omogućava bolji rad na većim visinama.
- SAF kod lakih vazduhoplova (ako je kompatibilan) neće značajno menjati visinsku efikasnost, ali može uticati na startne performanse pri niskim temperaturama.

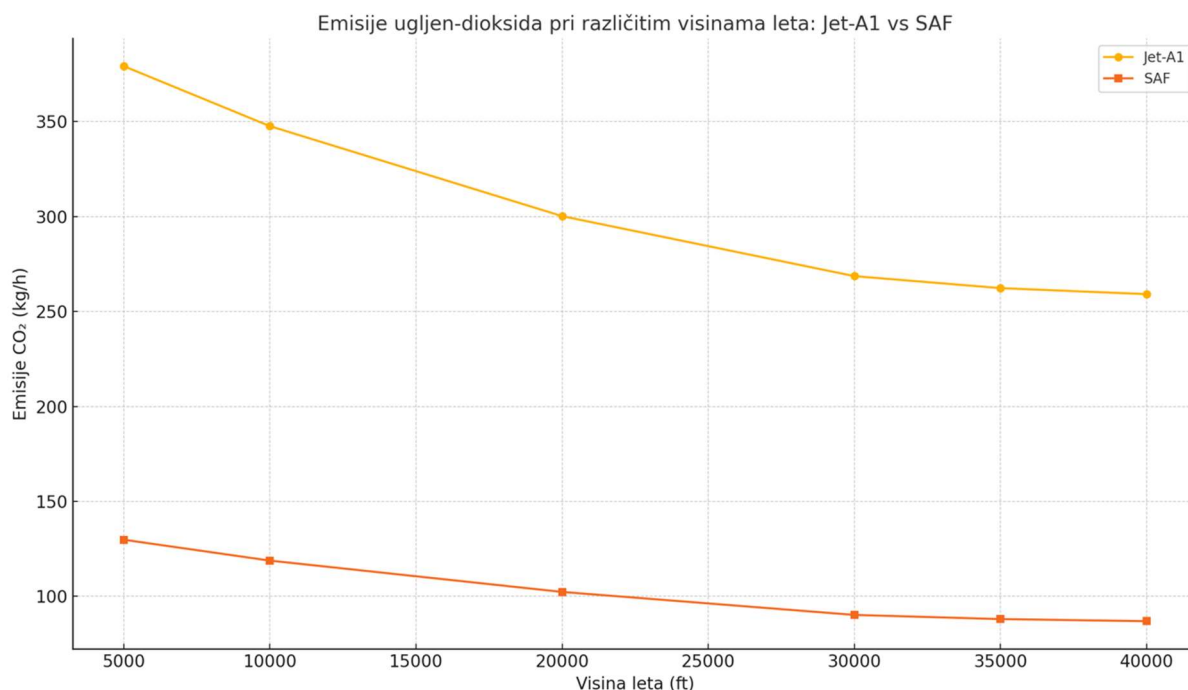
⁵² ‘Coffin Corner’ (zona kritičnog leta) je aerodinamičko i performansno ograničenje na velikim visinama leta, pri kojem se brzina strmoglavljenja (Critical Mach number) i brzina prevlačenja (Stall Speed) približavaju jedna drugoj. Kako vazduhoplov penje na veću visinu, gustina vazduha opada, pa raste brzina prevlačenja (izražena u čvorovima indikovanog vazdušnog pritiska – KIAS), dok se istovremeno smanjuje maksimalna dozvoljena istinska brzina leta pre nego što dođe do lokalnog prekoračenja Macha i aerodinamičkih poremećaja na krilu. U određenom sloju atmosfere ove dve granične brzine se toliko približe da pilot ima na raspolaganju veoma mali bezbedan raspon brzina za let, što zahteva veliku preciznost u upravljanju i ograničava maksimalnu operativnu visinu (Service Ceiling) vazduhoplova.

⁵³ Bristell je brend modernih lakih sportskih i naprednih trenažnih vazduhoplova koje proizvodi češka kompanija BRM Aero s.r.o., osnovana 2009. godine od strane konstruktora Milana Bristele. Vazduhoplovi Bristell poznati su po kombinaciji visoke aerodinamičke efikasnosti, ergonomije i niske potrošnje goriva, što ih čini pogodnim za obuku pilota, turističko i rekreativno letenje, kao i za eksperimentalne i istraživačke projekte. Najpopularniji modeli uključuju Bristell NG5 Classic i B23, sa pogonom Rotax 912iS, 915iS i 916T motora, a novije verzije (B23 Energic) razvijaju se u saradnji sa kompanijom H55 i opremljene su električnim pogonskim sistemima. Bristell vazduhoplovi su široko korišćeni u programima obuke i istraživanja zahvaljujući niskim operativnim troškovima i mogućnosti testiranja alternativnih goriva i električnog pogona.

[24] BRM Aero. Bristell Aircraft Pilot Operating Handbook (POH). Kunovice, 2023.

⁵⁴ Rotax je brend vazduhoplovnih motora koje proizvodi kompanija BRP-Rotax GmbH & Co KG, osnovana 1920. godine, sa sedištem u Gmundenu (Austrija). Rotax motori su globalno prepoznati kao vodeći u segmentu lakih sportskih, školsko-trenažnih i ultralakih vazduhoplova, zahvaljujući kombinaciji niskih operativnih troškova, pouzdanosti i energetske efikasnosti. Najčešće korišćeni modeli u savremenim trenažnim i sportskim vazduhoplovima su Rotax 912iS, 915iS i 916iS/916T, koji koriste Avgas 100LL ili mogas (automobilski benzin), a novije generacije su prilagođene i za mešavine sa održivim vazduhoplovnim gorivom (Sustainable Aviation Fuel – SAF). Ovi motori, zahvaljujući svojoj niskoj masi, direktnom ubrizgavanju i naprednim sistemima upravljanja gorivom (FADEC), značajno doprinose smanjenju potrošnje goriva i emisija ugljen-dioksida (CO₂) u segmentu generalnog vazduhoplovstva.

[25] Rotax Aircraft Engines. Rotax 915iS Operator’s Manual. Gunskirchen, 2024.



Grafikon 5. Grafikon koji prikazuje kako se menja potrošnja goriva u zavisnosti od visine leta, poredeći Jet-A1 i SAF. Može se videti da je SAF vrlo sličan klasičnom gorivu po potrošnji, ali sa znatno manjim emisijama CO₂.⁵⁵

Na grafikonu se vidi koliko se emisije CO₂ smanjuju pri upotrebi SAF-a u poređenju sa Jet-A1 gorivom, pri različitim visinama leta. Iako je potrošnja slična, emisije SAF-a su znatno niže, posebno na većim visinama, što doprinosi ukupnoj dekarbonizaciji vazduhoplovstva.

2.5. Emisije CO₂ i međunarodni standardi

Prema ICAO i IPCC standardima, emisija ugljen-dioksida iz vazdušnog saobraćaja meri se prema količini sagorelog goriva. Svaki kilogram goriva proizvodi približno 3,16 kg CO₂. Organizacije poput ICAO, EASA i IATA razvile su priručnike i kalkulatore (ICEC)⁵⁶ za

⁵⁵ Autorski prikaz na osnovu ranije objavljenog rada: Lazic Dragan A., et al. "Results of Using Sustainable Aviation Fuel in Transport Aircraft on Different Flight Levels and Their Influence on Carbon-Dioxide CO₂ Emissions", Scientific *Journal of Silesian University of Technology* (Poland, May 30, 2023).

⁵⁶ ICEC kalkulator emisija (ICAO Carbon Emissions Calculator) je alat razvijen pod okriljem Međunarodne organizacije civilnog vazduhoplovstva (International Civil Aviation Organization – ICAO) i prezentovan na Konferenciji o zaštiti životne sredine u civilnom vazduhoplovstvu (International Civil Aviation Environmental Conference – ICEC). Kalkulator koristi podatke o tipu vazduhoplova, konfiguraciji sedišta, potrošnji goriva i pređenoj udaljenosti kako bi procenio emisiju ugljen-dioksida (CO₂) po putniku ili po toni tereta na datoj ruti. Ovaj alat omogućava vazduhoplovnim kompanijama, regulatornim telima i istraživačima da standardizovano procene i upoređuju ugljeni otisak letova i doprinosi implementaciji globalnih programa smanjenja emisija kao što je CORSIA.

[26] ICAO 2016.

preciznu procenu emisija. Pored CO₂, vazduhoplovi emituju i druge gasove koji utiču na klimatske promene, kao što su NO_x, čađ, vodena para i drugi aerosoli. [26]

Emisije CO₂ u vazduhoplovstvu su u fokusu brojnih međunarodnih propisa i standarda, jer sektor vazdušnog saobraćaja doprinosi oko 2–3% globalnih emisija CO₂, ali i mnogo više kada se uračunaju efekti na visini leta (NO_x, vodena para, kondenzacioni tragovi). [27]

Evo pregleda najvažnijih međunarodnih standarda i mehanizama za regulaciju CO₂ emisija u vazduhoplovstvu:

1. ICAO CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)

Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (ICAO) usvojila je 2016. godine globalni sistem pod nazivom CORSIA kao prvi mehanizam kojim se celokupna međunarodna vazduhoplovna industrija obavezuje da ograniči i kompenzuje emisije ugljen-dioksida (CO₂) iz vazdušnog saobraćaja. Ovaj sistem predstavlja ključni deo šireg paketa mera u okviru ICAO-ovog programa zaštite životne sredine, koji uključuje unapređenje energetske efikasnosti, razvoj održivih goriva za vazduhoplovstvo (SAF) i implementaciju novih tehnologija i operativnih procedura.

CORSIA je formalno usvojen na 39. zasedanju ICAO Skupštine 2016. godine, a njegova primena započela je 2021. godine. Program se sprovodi u tri faze:

- Pilot faza (2021–2023) – dobrovoljno učešće država članica;
- Prva faza (2024–2026) – prošireno učešće, i dalje na dobrovoljnoj osnovi;
- Druga faza (od 2027) – obavezna primena za većinu država sa značajnim udelom u globalnom vazdušnom saobraćaju.

Glavni cilj CORSIA programa jeste da ograniči neto emisije CO₂ iz međunarodnog vazduhoplovstva na nivo iz 2019. godine, čime se ostvaruje tzv. karbonska neutralnost rasta (Carbon Neutral Growth from 2020, CNG2020). To znači da se eventualni porast emisija nakon 2020. godine mora neutralisati kroz kompenzacione mehanizme.

[27] IPCC 2023.

U okviru CORSIA sistema, vazduhoplovne kompanije su obavezne da prate, prijavljuju i verifikuju (MRV – Monitoring, Reporting, Verification)⁵⁷ količinu CO₂ emisija svojih međunarodnih letova.

Ukoliko emisije prelaze referentni nivo (baznu godinu), vazduhoplovne kompanije su dužne da otkupe verifikovane karbonske kredite sa međunarodnih tržišta emisija. Na taj način se kompenzuje razlika između realno emitovane i dozvoljene količine CO₂. [28]

Krediti moraju poticati iz projekata koji imaju stvarni i dodatni efekat smanjenja emisija, kao što su obnovljivi izvori energije, pošumljavanje, zaštita šuma ili zamena fosilnih goriva čistijim izvorima energije.

Upotreba SAF u CORSIA okviru prepoznata je kao ključna strategija za smanjenje emisija bez potrebe za velikim obimom kompenzacija. Kada vazduhoplovna kompanija koristi SAF koji ispunjava ICAO standarde (definisane u dokumentu CORSIA Sustainability Criteria), ta količina goriva se uračunava u smanjenje ukupnih emisija, čime se umanjuje obaveza otkupa karbonskih kredita. [29]

Na taj način CORSIA ne samo da podstiče upotrebu održivih goriva već i otvara tržište za sertifikovane proizvođače SAF-a širom sveta, uključujući evropske i američke proizvođače koji već rade po standardima ASTM D7566⁵⁸ i ICAO Annex 16, Volume IV⁵⁹.

⁵⁷ MRV sistem (Monitoring, Reporting and Verification) predstavlja međunarodno standardizovan metod praćenja, izveštavanja i nezavisne verifikacije emisija gasova sa efektom staklene bašte u vazdušnom saobraćaju, u skladu sa ICAO CORSIA pravilima.

⁵⁸ ASTM D7566 – Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons je međunarodni standard koji je usvojila organizacija ASTM International (American Society for Testing and Materials) za definisanje zahteva kvaliteta za avionska kerozinska goriva koja sadrže sintetičke ugljovodonike, uključujući održivo vazduhoplovno gorivo – SAF. Ovaj standard propisuje fizičko-hemijska svojstva, postupke kontrole kvaliteta i bezbednosne kriterijume za različite proizvodne puteve SAF-a kao što su:

- FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene),
- HEFA-SPK (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene),
- SIP (Synthesized Iso-Paraffins),
- ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene),
- kao i novije rute kao što su CHJ (Catalytic Hydrothermolysis Jet) i PtL (Power-to-Liquid).

Prema ASTM D7566, SAF može biti korišćen u komercijalnom vazduhoplovstvu samo u mešavinama sa konvencionalnim kerozinom (Jet A ili Jet A-1) do dozvoljenih udela (obično do 50%, a za neke rute do 10%), dok je gorivo dobijeno nakon mešanja koje ispunjava zahteve ovog standarda ekvivalentno gorivu ASTM D1655 (conventional Jet A/A-1) i može se koristiti bez modifikacija motora i infrastrukture. Ovaj standard je ključan za sertifikaciju i bezbednu implementaciju SAF-a u komercijalnom i vojnom vazduhoplovstvu.

[28] ICAO 2019.

[29] European Commission 2021.

⁵⁹ ICAO Annex 16 – Environmental Protection je deo međunarodnog regulatornog okvira koji je uspostavila Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (International Civil Aviation Organization – ICAO), i

CORSIA predstavlja prvi globalni sistem ograničavanja emisija u okviru jedne industrije, što ga čini pionirskim modelom za druge sektore transporta. Međutim, izazovi su brojni — među njima su složenost verifikacije, dostupnost i cena karbonskih kredita, kao i potreba za globalnim usklađivanjem sa regionalnim propisima kao što je EU Emissions Trading System (EU ETS).

Kritičari ističu da sama kupovina karbonskih kredita ne rešava osnovni problem emisija već samo “odlaže” odgovornost, dok zagovornici smatraju da CORSIA stvara realan tržišni pritisak i finansijski podsticaj za uvođenje čistijih tehnologija, posebno SAF-a i električnih/hibridnih pogona.

CORSIA je praktično spoj ekonomskog i ekološkog instrumenta koji omogućava balans između rasta avio-industrije i globalnih klimatskih ciljeva. Njegova efikasnost u narednim decenijama zavisiće od transparentnosti tržišta karbonskih kredita, jačanja MRV sistema i što šire upotrebe SAF-a, koji postaje centralni stub dekarbonizacije međunarodnog vazduhoplovstva.

2. IATA – Net Zero 2050

Međunarodno udruženje **za vazdušni transport (IATA – International Air Transport Association)** predstavlja globalnu organizaciju koja okuplja više od 300 vazduhoplovnih kompanija i obuhvata oko 83% ukupnog svetskog vazdušnog saobraćaja. Njegova misija je da promoviše bezbedno, efikasno i održivo vazduhoplovstvo, te da koordinira zajedničke napore industrije u borbi protiv klimatskih promena.

predstavlja ključni dokument za upravljanje uticajem vazduhoplovstva na životnu sredinu. Aneks 16 je podeljen u više tomova, koji pokrivaju različite aspekte zaštite životne sredine:

- Tome I – Aircraft Noise: propisuje standarde za ograničenje buke vazduhoplova i procedure sertifikacije buke u skladu sa tipom i kategorijom letelice;
- Tome II – Aircraft Engine Emissions: definiše granice za emisije gasova i čestica iz mlaznih i turboprop motora, uključujući ugljen-monoksid (CO), ugljen-dioksid (CO₂), azotne okside (NO_x) i neisparljive čestice (nvPM);
- Tome III – CO₂ Emissions Standard: uvodi globalni standard emisije ugljen-dioksida (CO₂) za nove tipove vazduhoplova i postojeće modele, sa ciljem poboljšanja energetske efikasnosti.

- Tome **IV – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)**: definiše metodologiju za izračunavanje, izveštavanje i verifikaciju emisija CO₂, kao i mehanizme za njihovo kompenzovanje putem kupovine kredita za emisije ili upotrebe održivog vazduhoplovnog goriva (SAF).

Ovaj aneks predstavlja osnovu za sve globalne mere smanjenja emisija u civilnom vazduhoplovstvu i direktno podržava sprovođenje ciljeva klimatske neutralnosti do 2050. godine.

U oktobru 2021. godine, IATA je usvojila strategiju “Net Zero 2050”⁶⁰, kojom se međunarodno komercijalno vazduhoplovstvo obavezuje da do 2050. godine postigne neto-nulte emisije CO₂.

Cilj Net Zero 2050 inicijative je potpuno dekarbonizovanje vazduhoplovne industrije do sredine 21. veka, u skladu sa ciljevima Pariskog klimatskog sporazuma. To znači da će se preostale emisije CO₂, koje se ne mogu u potpunosti eliminisati tehničkim merama, neutralisati kroz upotrebu SAF-a, tehnologija za hvatanje i skladištenje ugljenika (CCS)⁶¹, kao i putem verifikovanih sistema kompenzacije.

Da bi se ostvarila vizija Net Zero 2050, IATA definiše četiri glavna stuba dekarbonizacije:

1. Održivo vazduhoplovno gorivo - SAF

- Predstavlja najznačajniji faktor smanjenja emisija, sa projekcijom da će SAF doprineti do 65% ukupnog smanjenja CO₂ emisija do 2050. godine.
- SAF goriva proizvode se iz otpadnih ulja, biomase, sintetičkih izvora (Power-to-Liquid – PtL)⁶² i drugih obnovljivih materijala.
- U poređenju sa konvencionalnim Jet A-1 gorivom, SAF može smanjiti životni ciklus emisija CO₂ i do 80%, zavisno od sirovine i proizvodne tehnologije.

IATA snažno podržava globalnu harmonizaciju standarda za SAF kroz ASTM D7566 i kroz saradnju sa ICAO u okviru CORSIA programa.

2. Nove tehnologije vazduhoplova i pogona

Razvijaju se električni, hibridno-električni i vodonični pogoni, kao i napredni turboventilatorski motori sa većom termodinamičkom efikasnošću. IATA procenjuje da će nove tehnologije doprineti sa oko 13–15% smanjenja ukupnih emisija do 2050. godine.

⁶⁰ Međunarodno udruženje za vazdušni transport (IATA) usvojilo je 2021. godine strategiju Net Zero 2050, kojom se globalna vazduhoplovna industrija obavezuje na postizanje neto-nultog nivoa emisija CO₂ do 2050. godine.

⁶¹ Tehnologija hvatanja i skladištenja ugljenika – CCS predstavlja proces izdvajanja CO₂ iz industrijskih i energetskih izvora ili direktno iz atmosfere, uz njegovo trajno skladištenje u geološkim formacijama ili podzemnim rezervoarima. CCS je jedan od ključnih stubova globalnih klimatskih strategija, jer omogućava neutralizaciju preostalih emisija koje nije moguće eliminisati tehnološkim unapređenjima ili primenom održivih goriva.

⁶² Power-to-Liquid (PtL) predstavlja naprednu tehnologiju proizvodnje sintetičkog vazduhoplovnog goriva korišćenjem obnovljive električne energije, vode i ugljen-dioksida. Proces obuhvata elektrolizu vode radi dobijanja vodonika, zatim reakciju CO₂ i vodonika u sinteznom procesu (najčešće Fischer–Tropsch), čime se proizvodi tečno gorivo koje je potpuno kompatibilno sa sistemima konvencionalnih mlaznih motora. PtL omogućava cirkularno korišćenje CO₂ iz atmosfere ili industrije, što ga svrstava u goriva sa nultim ili gotovo nultim neto emisijama u životnom ciklusu.

U okviru ove strategije značajno mesto zauzimaju i elektrifikovani laki i trenažni vazduhoplovi, poput projekata H55, Pipistrel Velis Electro⁶³ i Bristell Energic, koji služe kao demonstratori novih koncepata nulte emisije.

3. Operativne i infrastrukturne efikasnosti

Optimizacija ruta, smanjenje vremena čekanja u vazduhu i na zemlji, te uvođenje digitalnih tehnologija u kontrolu letenja (na primer: Free Route Airspace⁶⁴, Performance-Based Navigation, Single European Sky). Ove mere mogu doprineti dodatnom smanjenju emisija za 3–5% kroz bolje upravljanje energijom i gorivom tokom svakog leta.

4. Karbonska kompenzacija i hvatanje ugljenika (Carbon Capture)⁶⁵

Preostale emisije koje se ne mogu izbeći kompenzuju se investiranjem u projekte sa dokazanim klimatskim benefitima, uključujući pošumljavanje, zaštitu prirodnih ekosistema i direktno hvatanje CO₂ iz atmosfere (DAC – Direct Air Capture).

IATA zagovara globalno priznavanje ovih mehanizama i njihovu povezanost sa CORSIA sistemom, kako bi se sprečilo dvostruko računanje smanjenja emisija.

Ostvarenje Net Zero 2050 zahteva procenjena ulaganja od 1,55 triliona USD u naredne tri decenije, uključujući razvoj infrastrukture za SAF, modernizaciju flote i istraživanja novih energetske rešenja.

⁶³ Pipistrel Velis Electro predstavlja prvi sertifikovani potpuno električni vazduhoplov na svetu (EASA Type Certificate 2020), namenjen za osnovnu pilotsku obuku i kratke trenažne letove. Ovaj dvosedi, ultra-laki vazduhoplov pogonjen je električnim motorom snage 57,6 kW i litijum-jonskim baterijama koje omogućavaju let u trajanju od oko 50 minuta sa rezervom. Operativne karakteristike Velis Electro čine ga značajnim demonstratorom za buduće elektrifikovane trenažne i regionalne letove, jer eliminiše lokalne emisije CO₂, smanjuje buku i drastično smanjuje troškove održavanja i pogona. Korišćenje ovakvih platformi u pilot obuci predstavlja jedno od ključnih prelaznih rešenja ka vazduhoplovstvu sa nultim emisijama u domenu kratkih i trenažnih letova.

⁶⁴ Free Route Airspace (FRA) predstavlja koncept upravljanja vazдушnim prostorom koji omogućava vazduhoplovima da planiraju i realizuju optimalne rute između unapred definisanih ulaznih i izlaznih tačaka, bez obaveze praćenja fiksnih ruta. Ovaj sistem povećava fleksibilnost planiranja leta, skraćuje putne distance, smanjuje vremenske i operativne troškove i doprinosi smanjenju ukupne potrošnje goriva i emisija CO₂ u civilnom vazduhoplovstvu. FRA je ključna infrastrukturna mera Evropske unije u okviru inicijativa za efikasnije upravljanje vazдушnim prostorom i održiviji vazdušni saobraćaj.

⁶⁵ Carbon Capture (CC) predstavlja proces izdvajanja ugljen-dioksida - CO₂ iz industrijskih izvora ili direktno iz atmosfere kako bi se njegov ulazak u atmosferu sprečio ili smanjio. Tehnologije za hvatanje CO₂ uključuju post-combustion i pre-combustion sisteme, kao i direktno izdvajanje iz vazduha. CC je jedan od ključnih mehanizama za postizanje dugoročnih klimatskih ciljeva, jer omogućava neutralizaciju preostalih emisija u sektorima gde je dekarbonizacija posebno zahtevna, kao što je vazduhoplovstvo.

IATA sarađuje sa nacionalnim regulatorima, finansijskim institucijama i proizvođačima goriva kako bi se osigurala dostupnost i pristupačnost SAF-a, čija trenutna cena višestruko premašuje cenu Jet A-1 goriva.

Dodatno, IATA podržava formiranje globalnog tržišta za ugljenik i uvođenje podsticaja za operatere koji implementiraju niskoemisijske tehnologije. Ova strategija nije samo deklarativni cilj, već predstavlja kolektivni okvir za sve aktere u vazduhoplovnoj industriji – od proizvođača vazduhoplova i motora, preko aerodroma, do operatera i regulatora. IATA svojim članicama pruža tehničku podršku, smernice i alate za izračunavanje emisija (na primer IATA CO₂ Connect)⁶⁶ i praćenje napretka ka neto-nultim emisijama.

Uspostavljanjem zajedničkog cilja, Net Zero 2050 postaje simbol jedinstva industrije u tranziciji ka održivom vazduhoplovstvu i čini osnovu za sinergiju sa ICAO CORSIA sistemom.

IATA Net Zero 2050 inicijativa predstavlja ambiciozan, ali ostvariv plan koji kombinuje tehnološki napredak, političku volju i tržišne mehanizme u borbi protiv klimatskih promena.

U poređenju sa CORSIA programom koji deluje kao regulatorni okvir, Net Zero 2050 funkcioniše kao industrijski strateški plan koji integriše globalne ciljeve i podstiče inovacije, čime se stvara održiva budućnost za civilno vazduhoplovstvo.

3. EU ETS (European Union Emissions Trading System)

Sistem trgovine emisijama Evropske unije (EU ETS – European Union Emissions Trading System) predstavlja najstariji i najrazvijeniji mehanizam za ograničavanje emisija gasova sa efektom staklene bašte na svetu. Uspostavljen je 2005. godine kao deo politike Evropske unije u borbi protiv klimatskih promena i središnji je element paketa mera poznatog kao „Fit for 55“, čiji je cilj da se do 2030. godine smanji ukupna emisija gasova sa efektom staklene bašte za najmanje 55% u odnosu na nivo iz 1990. godine.

⁶⁶ IATA CO₂ Connect je digitalna platforma koju je razvila Međunarodna asocijacija za vazdušni saobraćaj (International Air Transport Association – IATA) radi pružanja tačnih, standardizovanih i verifikovanih podataka o emisiji ugljen-dioksida - CO₂ za komercijalne letove. Sistem koristi stvarne operativne podatke iz više od 500 vazduhoplovnih kompanija, uključujući tip vazduhoplova, konfiguraciju kabine, efikasnost goriva, dužinu rute, opterećenje i druge parametre, kako bi izračunao emisiju CO₂ po putniku ili po tonu tereta. IATA CO₂ Connect usklađen je sa međunarodnim standardima kao što su ICAO CORSIA i ISO 14064, čime omogućava precizno izveštavanje, analizu i poređenje emisija između različitih operacija. Alat se koristi od strane vazduhoplovnih kompanija, korporacija, regulatornih tela i istraživača za potrebe praćenja klimatskog uticaja i sprovođenja strategija smanjenja emisija, uključujući upotrebu održivog vazduhoplovnog goriva - SAF.

EU ETS funkcioniše po principu „cap-and-trade“⁶⁷, što znači da Evropska komisija određuje maksimalnu količinu emisija (cap) koja može biti emitovana u određenom periodu, dok se emisijske jedinice (allowances) mogu kupovati, prodavati ili razmenjivati na tržištu (trade).

Vazduhoplovstvo je u sistem EU ETS uključeno 2012. godine, i to kao jedan od prvih sektora transporta. Početna faza obuhvatala je sve letove koji polaze ili sleću na aerodrome unutar Evropske unije, ali je, zbog međunarodnih pritisaka i preklapanja sa ICAO CORSIA sistemom, primena naknadno ograničena samo na letove unutar Evropske ekonomske zone (EEA) – poznato kao intra-EEA scope.⁶⁸

Od 2024. godine, prema najnovijim odlukama Evropske komisije, obuhvat sistema proširen je i na letove između EU i trećih zemalja koje takođe primenjuju slične klimatske politike, dok se paralelno uvodi postepena integracija sa CORSIA programom za letove van EEA prostora.

U okviru EU ETS-a, vazduhoplovne kompanije su obavezne da prijavljuju i verifikuju emisije CO₂ koje nastaju tokom letova unutar sistema. Za svaku tonu emitovanog CO₂, operater mora posedovati odgovarajuću emisijsku jedinicu (EUA – European Union Allowance). Deo jedinica se dodeljuje besplatno, dok se ostatak mora kupiti na tržištu emisija. Godišnji broj raspoloživih dozvola se progresivno smanjuje – takozvano Linear Reduction Factor (LRF)⁶⁹ – čime se sistemski ograničava ukupna količina dozvoljenih emisija svake godine.

⁶⁷ Cap-and-Trade je tržišno zasnovani mehanizam za smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, u kojem regulatorna vlast utvrđuje maksimalni dozvoljeni nivo emisija (cap), dok se dozvole za emisije distribuiraju ili prodaju operaterima koji ih mogu međusobno razmenjivati (trade). Sistem podstiče smanjenje emisija na ekonomski efikasan način: kompanije koje smanje emisije ispod dodeljenog limita mogu prodati višak dozvola, dok operateri sa većim emisijama moraju kupiti dodatne dozvole ili smanjiti emisije kroz tehnička i operativna poboljšanja. Ovaj mehanizam predstavlja ključni regulatorni instrument Evropske unije kroz EU ETS u sektoru vazduhoplovstva.

⁶⁸ Intra-EEA scope predstavlja obim primene Evropskog sistema trgovine emisijama (EU ETS) koji obuhvata sve letove koji polaze i sleću unutar Evropskog ekonomskog prostora (EEA). To znači da vazduhoplovne kompanije koje obavljaju letove između aerodroma u državama članicama EEA moraju pratiti, prijavljivati i kompenzovati emisije ugljen-dioksida kroz kupovinu emisijskih jedinica (EUA), u skladu sa pravilima cap-and-trade mehanizma Evropske unije. Ovaj režim uveden je radi smanjenja emisija CO₂ u regionalnom i evropskom vazдушnom saobraćaju, u skladu sa klimatskim ciljevima EU.

⁶⁹ Linear Reduction Factor (LRF) predstavlja godišnji procenat linearnog smanjenja ukupnog broja dozvoljenih emisijskih jedinica (EUA) u okviru Evropskog sistema trgovine emisijama (EU ETS). LRF ima za cilj da postepeno smanjuje maksimalni dozvoljeni nivo emisija CO₂ u vazдушnom saobraćaju unutar Evropskog ekonomskog prostora, čime se obezbeđuje kontinuirano usklađivanje sa klimatskim ciljevima Evropske unije. Povećanje LRF vrednosti direktno utiče na smanjenje raspoloživih dozvola i povećavanje finansijskog pritiska na operatore da smanjuju emisije kroz efikasnije operacije i upotrebu održivih goriva.

Cena jedne EUA dozvole u 2024. godini kretala se između €80 i €100 po toni CO₂, što stvara značajan finansijski pritisak na vazduhoplovne kompanije i podstiče ulaganja u goriva i tehnologije sa manjim emisijama.

U okviru EU ETS-a, korišćenje SAF-a direktno smanjuje prijavljene emisije CO₂ jer se emisije računaju na osnovu životnog ciklusa goriva (LCA – Life Cycle Assessment)⁷⁰. To znači da vazduhoplovne kompanije koje koriste SAF mogu smanjiti količinu dozvola koje moraju kupiti, čime se postiže i ekonomska korist.

EU ETS i ICAO CORSIA su komplementarni sistemi, ali sa različitim geografskim i regulatornim okvirima:

- CORSIA važi za međunarodne letove između država koje učestvuju u ICAO programu.
- EU ETS važi za letove unutar Evropske unije i EEA regiona.

Evropska komisija je donela odluku da se od 2027. godine EU ETS postepeno integriše sa CORSIA pravilima, kako bi se izbeglo duplo računanje emisija i obezbedila globalna usklađenost.

Uvođenje EU ETS-a imalo je višestruke efekte na evropsku vazduhoplovnu industriju:

- Ekonomski efekat: povećani operativni troškovi zbog kupovine EUA dozvola;
- Tehnološki efekat: ubrzani razvoj i primena vazduhoplova sa većom gorivom efikasnošću (na primer Airbus A320neo, A220, Embraer E2 serija).
- Ekološki efekat: smanjenje emisija CO₂ u proseku za oko 17% u periodu 2012–2022. godine, prema podacima European Environment Agency (EEA).
- Tržišni efekat: povećanje konkurentnosti operatera koji brže uvode SAF i efikasnije upravljaju flotom.

Iako je EU ETS postao uzor globalnim sistemima trgovine emisijama, postoje brojni izazovi:

- Velika volatilnost cena EUA kredita;

⁷⁰ Life Cycle Assessment (LCA) predstavlja metodologiju za kvantifikaciju ukupnog uticaja proizvoda ili procesa na životnu sredinu tokom njegovog kompletnog životnog ciklusa — od eksploatacije sirovina, proizvodnje i transporta, preko faze korišćenja, pa sve do krajnjeg odlaganja ili reciklaže. U vazduhoplovstvu, LCA se koristi za procenu emisija CO₂ i drugih zagađujućih materija iz različitih tipova goriva, uključujući konvencionalni Jet A-1 i održiva vazduhoplovna goriva - SAF, čime se omogućava objektivno poređenje njihovog ukupnog klimatskog uticaja.

- Ograničena dostupnost SAF-a na evropskom tržištu;
- Rizik od „carbon leakage“ fenomena⁷¹, gde se letovi preusmeravaju izvan EU prostora kako bi se izbegla primena sistema;
- Potreba za boljom koordinacijom sa globalnim programima (CORSIA i IATA Net Zero 2050) kako bi se izbegla regulatorna preklapanja i administrativno opterećenje.

EU ETS predstavlja najzreliji model tržišne regulacije emisija koji demonstrira kako ekonomski instrumenti mogu doprineti smanjenju zagađenja i ubrzanju energetske tranzicije.

Njegova važnost za vazduhoplovstvo ogleda se u stvaranju direktnog finansijskog podsticaja za dekarbonizaciju, čime se podstiče upotreba SAF-a, modernizacija flota i inovacije u pogonskim sistemima.

U budućnosti, usklađivanje između EU ETS i CORSIA sistema biće ključno za formiranje jedinstvenog globalnog tržišta ugljenika u vazduhoplovstvu, što će obezbediti pravedniju i efikasniju implementaciju klimatskih ciljeva na globalnom nivou.

4. SAF Grand Challenge (SAD)

Sustainable Aviation Fuel (SAF) Grand Challenge predstavlja nacionalnu inicijativu Vlade Sjedinjenih Američkih Država, pokrenutu 2021. godine, sa ciljem ubrzanja razvoja, proizvodnje i upotrebe održivog vazduhoplovnog goriva u američkom civilnom vazduhoplovstvu.

Ova inicijativa rezultat je zajedničkog delovanja više federalnih agencija – **Department of Energy (DOE)**, **Department of Transportation (DOT)**, **Federal Aviation Administration (FAA)** i **Department of Agriculture (USDA)** – u saradnji sa industrijskim partnerima, akademskim institucijama i proizvođačima goriva.

Glavni cilj programa je da se do 2050. godine omogući potpuno snabdevanje američkog vazduhoplovstva održivim gorivima, čime bi se postigla neto-nulta emisija CO₂ u skladu sa američkom klimatskom strategijom i ciljevima White House Climate Action Plan-a.

SAF Grand Challenge definiše tri ključna kvantitativna cilja:

⁷¹ Carbon leakage predstavlja fenomen u kojem kompanije premeštaju svoju proizvodnju ili aktivnosti u države sa manje strogim klimatskim propisima kako bi izbegle troškove vezane za smanjenje emisija CO₂. Kao rezultat, emisije se ne smanjuju na globalnom nivou, već se samo premeste iz jurisdikcija sa visokim ekološkim standardima (na primer EU) u regione gde su pravila labavija. Ovaj fenomen može ozbiljno ugroziti efikasnost politika poput EU ETS sistema i oslabiti globalne klimatske napore.

1. Kratkoročni cilj (do 2030. godine):

- Proizvesti najmanje 3 milijarde galona SAF godišnje na tržištu SAD-a.
- Postići najmanje 50% smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte u poređenju sa konvencionalnim Jet A-1 gorivom.

2. Srednjoročni cilj (do 2040. godine):

- Uspostaviti održive lance snabdevanja i komercijalnu proizvodnju SAF-a u svim američkim regijama, uključujući Zapadnu obalu, Srednji zapad i jugoistočni deo zemlje.

3. Dugoročni cilj (do 2050. godine):

- Zadovoljiti 100% potreba američke vazduhoplovne industrije za gorivom putem održivih izvora i potpuno eliminisati neto emisije CO₂ u sektoru vazduhoplovstva.

Program SAF Grand Challenge funkcioniše kroz kombinaciju regulatornih podsticaja, naučnih istraživanja i finansijskih subvencija, sa fokusom na sledeće oblasti:

1. Istraživanje i razvoj (R&D):

Podržava se razvoj inovativnih tehnologija za proizvodnju SAF-a iz širokog spektra sirovina – od biomase, otpada iz poljoprivrede, industrijskih ostataka, pa do sintetičkih goriva na bazi CO₂ i vodonika (Power-to-Liquid, PtL).

2. Demonstracioni projekti i pilot postrojenja:

DOE i FAA finansiraju pilot-postrojenja i testne linije za validaciju procesa, uključujući integraciju sa postojećom infrastrukturom za gorivo na aerodromima.

3. Poreski podsticaji i subvencije:

U okviru Inflation Reduction Act (IRA) iz 2022. godine uveden je poreski kredit od \$1.25 do \$1.75 po galonu SAF-a, u zavisnosti od procenta smanjenja emisija u životnom ciklusu goriva (LCA).

Ovi krediti čine SAF finansijski konkurentnijim u odnosu na fosilno gorivo i direktno motivišu proizvođače i vazduhoplovne kompanije na ulaganja u proizvodne kapacitete.

4. Partnerstva sa industrijom:

Ključnu ulogu imaju američki proizvođači goriva i vazduhoplova – kao što su Boeing, GE Aerospace, Pratt & Whitney, Delta Air Lines, United Airlines i Neste U.S. – koji kroz zajedničke projekte testiraju i implementiraju SAF u realnim operacijama. FAA je

uspostavila i Cleared for Takeoff Initiative, kroz koju se podržavaju partnerstva između federalnih institucija i privatnih investitora u oblasti SAF infrastrukture.

SAF Grand Challenge obuhvata više tehnoloških puteva proizvodnje, uključujući:

- HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)⁷² – najrazvijeniji i trenutno komercijalno najdostupniji proces.
- FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene) – koristi gasifikaciju biomase i sintezu goriva.
- ATJ (Alcohol-to-Jet) – pretvara etanol ili izopropanol u mlazno gorivo.
- PtL (Power-to-Liquid) – sintetička goriva proizvedena elektrolizom vodonika i hvatanjem CO₂ iz atmosfere (DAC).

Sva ova goriva prolaze sertifikaciju prema ASTM D7566 standardu, koji definiše kvalitet, hemijski sastav i mešanje sa Jet A-1 gorivom do maksimalno 50% u postojećim motorima. Ekološki efekti SAF-a u okviru Grand Challenge-a procenjuju se na smanjenje emisija CO₂ i do 80% u celokupnom životnom ciklusu, u zavisnosti od sirovina i procesa. FAA u okviru ovog programa ima zadatak da obezbedi tehničku validaciju i regulatorni okvir za uvođenje SAF-a u američko civilno vazduhoplovstvo.

U saradnji sa ICAO i IATA, Sjedinjene Američke Države teže da postignu međunarodno priznatu kompatibilnost SAF sertifikata, kako bi američki proizvođači mogli izvoziti gorivo u druge zemlje u okviru CORSIA sistema. Na taj način, SAF Grand Challenge ne deluje izolovano već kao komplementarna komponenta globalne dekarbonizacije vazduhoplovstva, povezujući američku energetska politiku sa međunarodnim standardima.

SAF Grand Challenge predstavlja najambiciozniji nacionalni program za dekarbonizaciju vazduhoplovstva u svetu, koji kombinuje nauku, industriju i javnu politiku u jedinstvenu strategiju. Njegova snaga leži u praktičnom pristupu – stvaranju realnih kapaciteta i tržišnih uslova za masovnu proizvodnju SAF-a. U poređenju sa globalnim sistemima poput CORSIA i EU ETS, američki SAF Grand Challenge je više tehnološki i razvojno orijentisan

⁷² HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) predstavlja najrazvijeniju i trenutno komercijalno najznačajniju proizvodnu tehnologiju za održiva vazduhoplovna goriva (SAF). Goriva proizvedena HEFA postupkom nastaju hidrogenacijom biljnih ulja, otpadnih masti i masnih kiselina životinjskog porekla, čime se dobija gorivo koje je po hemijskom sastavu visoko kompatibilno sa konvencionalnim mlaznim gorivom Jet A-1. HEFA goriva mogu smanjiti emisije CO₂ u životnom ciklusu za 50–80%, zavisno od izvora sirovina i logistike snabdevanja, što ih čini ključnim faktorom za ispunjenje klimatskih ciljeva avijacije do 2050. godine.

nego regulatorno, i time postavlja temelje za dugoročnu energetska transformaciju u sektoru vazduhoplovstva.

5. Standardi i metrika emisija

Precizno merenje i standardizacija emisija gasova sa efektom staklene bašte predstavljaju osnovu za implementaciju globalnih mehanizama smanjenja emisija u vazduhoplovstvu. Bez usklađenih metodologija i referentnih vrednosti ne bi bilo moguće sprovesti ni CORSIA, ni EU ETS, niti ocenjivati napredak u okviru IATA Net Zero 2050 i SAF Grand Challenge programa.

Standardi emisija u vazduhoplovstvu obuhvataju definiciju obuhvata emisija (Scope), način izračunavanja, mernu jedinicu, kao i metodologiju praćenja i verifikacije (MRV – Monitoring, Reporting, Verification).

1. Obuhvat emisija – Scope definicije⁷³

U skladu sa međunarodnim protokolom GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol), emisije u vazduhoplovne industriji klasifikuju se u tri osnovne kategorije:

1. Scope 1: Direktne emisije iz sagorevanja goriva u motorima vazduhoplova (CO₂, NO_x, H₂O, nesagoreli ugljovodonici, čađ).
2. Scope 2: Indirektne emisije koje nastaju kroz potrošnju električne energije, grejanje i hlađenje u hangarima, terminalima i pratećim objektima.
3. Scope 3: Ostale indirektne emisije duž lanca snabdevanja – proizvodnja goriva, transport putnika i robe, održavanje i upravljanje otpadom.

Za vazduhoplovne operatore, Scope 1 emisije su ključne jer čine više od 98% ukupnog ugljeničnog otiska kompanije.

2. Glavni standardi i referentni dokumenti

- ICAO Annex 16 – Environmental Protection, Volume II i Volume IV

⁷³ Scope emisije predstavljaju međunarodno priznatu klasifikaciju izvora emisija gasova sa efektom staklene bašte u vazduhoplovstvu. Scope 1 obuhvata direktne emisije iz sagorevanja goriva u vazduhoplovima tokom leta i na zemlji. Scope 2 obuhvata indirektne emisije koje nastaju zbog potrošnje kupljene električne energije i drugih energetska sistema koji se koriste u poslovanju avio-operatera. Scope 3 obuhvata sve ostale indirektne emisije u lancu vrednosti, uključujući proizvodnju goriva, putnički transfer i aktivnosti dobavljača, pa predstavlja najširi obim klimatskog uticaja vazduhoplovstva.

Volume II definiše standarde za emisije iz vazduhoplovnih motora (NO_x, CO, HC, dima) dok Volume IV (usvojen 2017.) postavlja okvire za CO₂ standarde za vazduhoplova i pravila izračunavanja u okviru CORSIA programa.

Sadrži formulu za izračunavanje specifičnih emisija CO₂ po potrošnji goriva:

$$E\{CO_2\} = m\{fuel\} \times EF\{CO_2\} \quad (1)$$

gde je:

- $m\{fuel\}$ masa utrošenog goriva
- $EF\{CO_2\}$ emisioni faktor za CO₂ (3.16 kg CO₂/kg goriva za Jet A-1).

– ASTM D7566 / D1655 – Standard Specification for Aviation Turbine Fuels

Definiše hemijski sastav, energijski sadržaj i dozvoljene procenete mešanja SAF-a sa fosilnim gorivom. Obezbeđuje jedinstvenu osnovu za uporedivo izračunavanje emisija kod različitih tipova goriva.

- ISO 14064 – Greenhouse Gas Accounting and Verification

Međunarodni standard za kvantifikaciju, izveštavanje i verifikaciju emisija stakleničkih gasova. Korišćen u verifikacionim sistemima CORSIA i EU ETS, kako bi se obezbedila transparentnost i međunarodno priznati metod izračuna.

- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Aviation Module)

Daje referentne emisijske faktore za sve vrste goriva i procese sagorevanja. Korišćen kao osnov za nacionalne inventare emisija u skladu sa UNFCCC obavezama.⁷⁴

⁷⁴ UNFCCC obaveze proističu iz Okvirne konvencije Ujedinjenih nacija o promeni klime (UNFCCC), kojom se države potpisnice obavezuju na smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, unapređenje sistema izveštavanja i primenu klimatskih politika u skladu sa globalnim ciljevima ograničenja porasta temperature. Vazduhoplovstvo je, u okviru UNFCCC okvira i Pariskog sporazuma, obuhvaćeno međunarodnim mehanizmima smanjenja emisija, među kojima ključnu ulogu ima ICAO kroz CORSIA sistem za monitoring, izveštavanje i kompenzaciju emisija CO₂ iz međunarodnog vazdušnog saobraćaja.

3. Metrika i jedinice merenja

Emisije CO₂ se izražavaju u tonama CO₂ ekvivalenta (tCO_{2e}), gde se u obzir mogu uzeti i drugi gasovi (NO_x, CH₄, N₂O) korišćenjem njihovih Global Warming Potential (GWP)⁷⁵ koeficijenata, definisanih od strane IPCC.

Na primer:

- GWP(CH₄) = 28
- GWP(N₂O) = 265

Zbog toga, iako CO₂ čini najveći deo emisija, ukupan klimatski efekat vazduhoplovstva (Radiative Forcing Index – RFI) može biti i 2–3 puta veći od samog CO₂ efekta, zbog prisustva vodene pare, NO_x-a i kondenzacionih tragova (contrails) na velikim visinama.

4. Metodologija MRV sistema (Monitoring, Reporting, Verification)

MRV sistem predstavlja osnovu transparentnosti i verifikacije u svim međunarodnim programima.

Njegove tri komponente su:

- Monitoring (praćenje): prikupljanje podataka o potrošnji goriva, letu, tipu motora i performansama vazduhoplova.
- Reporting (izveštavanje): godišnje izveštavanje operatera o emisijama, u skladu sa ICAO i EU ETS formatima.
- Verification (verifikacija): nezavisna provera od strane akreditovanih tela (verifikatora), koja potvrđuju tačnost prijavljenih podataka.

FAA, EASA i ICAO imaju međusobno priznate protokole verifikacije kako bi se izbeglo dupliranje izveštavanja kod operatera koji posluju na više kontinenata.

5. Indikatori efikasnosti i emisijski faktori

Da bi se omogućilo poređenje između letova, vazduhoplova i goriva, koriste se specifični indikatori:

⁷⁵ Global Warming Potential (GWP) predstavlja meru koja opisuje koliki doprinos zagrevanju planete ima određeni gas **sa efektom staklene bašte u odnosu na** ugljen-dioksid (CO₂), uzimajući u obzir njegovu sposobnost apsorpcije toplote i vreme zadržavanja u atmosferi. GWP vrednosti se obično izražavaju za vremenske horizonte od 20 ili 100 godina, a CO₂ ima referentnu vrednost GWP = 1. Ostali gasovi, poput metana (CH₄) i azot-oksida (N₂O), imaju znatno veći GWP, pa iako se emituju u manjim količinama, mogu imati značajan ukupni klimatski efekat.

- Fuel Burn per Passenger-Kilometer (FBPK) – količina goriva po putničkom kilometru.
- CO₂ per Available Seat-Kilometer (CO₂/ASK) – najčešći indikator operativne efikasnosti u komercijalnom vazduhoplovstvu.
- Energy Density (MJ/kg) – energijski sadržaj goriva, ključan za proračun performansi SAF-a.

Pored toga, za naučne i regulatorne svrhe koristi se Emission Index (EI) koji izražava količinu određenog gasa po kilogramu sagorelog goriva:

$$EI_{CO_2} = 3.16 \frac{kgCO}{kgFuel} \quad (2)$$

$$EI_{NO_x} = 15 - 20 \frac{g}{kgFuel} \text{ (zavisno od motora i FL)} \quad (3)$$

6. Značaj standardizovane metrike

Jedinstvena metrika omogućava:

- globalnu uporedivost rezultata i kredibilitet u međunarodnim okvirima;
- transparentnost u izveštavanju i obračunu karbonskih kredita;
- praćenje efekata upotrebe SAF-a, novih motora i tehnologija;
- razvoj baza podataka za buduće klimatske modele i istraživanja.

Bez ovih standarda, ni programi kao što su CORSIA, EU ETS ili SAF Grand Challenge ne bi mogli funkcionisati na naučnoj i regulatornoj osnovi. Standardi i metrike emisija predstavljaju temelj naučne verifikacije i međunarodne usklađenosti u oblasti održivog vazduhoplovstva.

Oni povezuju istraživačke, regulatorne i operativne aspekte dekarbonizacije i omogućavaju realno praćenje napretka prema ciljevima Net Zero 2050.

U eri ubrzane energetske tranzicije, pouzdano merenje i standardizacija emisija nisu samo tehnički zadatak, već ključni element globalne klimatske politike u kojoj vazduhoplovstvo igra sve važniju ulogu.

- CO₂ ekvivalent (CO₂e)⁷⁶: Uključuje i ostale gasove sa efektom staklene bašte (npr. CH₄, NO_x).

⁷⁶ CO₂ ekvivalent (CO₂e) je standardna mera koja se koristi za izražavanje ukupnog uticaja različitih gasova sa efektom staklene bašte (Greenhouse Gases – GHG) u jedinstvenim jedinicama zasnovanim na njihovom globalnom potencijalu zagrevanja (Global Warming Potential – GWP) u odnosu na ugljen-dioksid (CO₂).

- MJ/kg i gCO₂e/MJ: Metrike za upoređenje goriva.
- ASTM D7566: Tehnički standard za sertifikaciju SAF-a – ne uključuje direktno CO₂, ali omogućava njegovu upotrebu u skladu sa regulativom.
- Upotreba SAF-a je ključni element svih međunarodnih klimatskih ciljeva za vazduhoplovstvo.

Međunarodni standardi emisije CO₂ u vazduhoplovstvu i uloga SAF-a



Tabela 2. Infografik koji prikazuje tri ključna međunarodna standarda za emisije CO₂ u vazduhoplovstvu, zajedno sa njihovim ciljevima i ulogom SAF-a

U Tabeli 2.⁷⁷ detaljno je prikazano poređenje između CORSIA, EU ETS i IATA Net Zero 2050 ciljeva i njihovog odnosa prema emisijama CO₂ i ulozi SAF-a u međunarodnom vazduhoplovstvu.

2.6. Operativne strategije za smanjenje emisija

Operativne mere kao što su optimizacija putanja leta, upotreba direktnih ruta, smanjenje težine vazduhoplova, jedan motor tokom taksiranja i optimizacija brzine, mogu doprineti

Budući da različiti gasovi imaju različitu sposobnost zadržavanja toplote u atmosferi (npr. metan CH₄ je približno 28–34 puta snažniji od CO₂, a azotni oksid N₂O oko 265–298 puta snažniji tokom perioda od 100 godina), njihov doprinos klimatskim promenama se preračunava u ekvivalentnu količinu CO₂. Ovaj pristup omogućava uporedivu i kumulativnu procenu emisija iz različitih izvora, uključujući sagorevanje fosilnih goriva i održivih vazduhoplovnih goriva (SAF) u vazduhoplovstvu.

⁷⁷ Podaci u tabeli zasnovani su na autorovom uvidu u dostupnu stručnu i naučnu literaturu.

smanjenju potrošnje goriva do 10%. Napredne ATM (Air Traffic Management)⁷⁸ tehnologije omogućavaju efikasnije planiranje i smanjenje nepotrebnih čekanja pri poletanju i sletanju. Uvođenje SAF i prelazak na turboprop vazduhoplove takođe predstavljaju ključne strategije u smanjenju emisije.

Operativne strategije za smanjenje emisija CO₂ u vazduhoplovstvu podrazumevaju optimizaciju načina upravljanja letovima, vazduhoplovima i infrastrukturom, bez promene goriva ili motora. One imaju trenutni i značajan efekat na efikasnost i emisije, posebno kada se kombinuju sa upotrebom SAF-a.

1. Optimizacija profila leta

Optimizacija profila leta predstavlja jednu od najefikasnijih operativnih strategija za smanjenje potrošnje goriva i emisija CO₂ u vazduhoplovstvu. Ova strategija obuhvata precizno planiranje vertikalnog i horizontalnog profila leta, s ciljem da se let odvija u režimima maksimalne aerodinamičke i termodinamičke efikasnosti motora. Primena optimizovanih profila leta direktno utiče na količinu goriva sagorelog tokom faza penjanja, krstarenja i spuštanja, što je od ključnog značaja jer upravo te faze čine preko 90% ukupne potrošnje goriva na jednom letu.

– Continuous Climb Operations (CCO)

Tradicionalno, vazduhoplovi se penju u fazama (“step climb”), zadržavajući se na određenim visinama dok se ne smanji težina i ne odobri prelazak na viši nivo. Ovakav pristup dovodi do perioda letenja u suboptimalnim režimima potiska i gorive efikasnosti. U okviru CCO koncepta, **vazduhoplov se penje kontinuirano bez zadržavanja**, po optimalnoj vertikalnoj putanji koju definiše kombinacija performansi vazduhoplova, mase, meteoroloških uslova i zahteva kontrole letenja (ATC). Ova procedura omogućava:

- **smanjenje potrošnje goriva za 3–5%** u fazi penjanja,
- **redukciju emisija CO₂** proporcionalno smanjenju goriva,
- **smanjenje buke** oko aerodroma, jer motor kraće radi u režimu visokog potiska.

⁷⁸ Napredni sistemi upravljanja vazdušnim saobraćajem (Air Traffic Management – ATM) obuhvataju savremene digitalne tehnologije i operativne procedure koje omogućavaju optimizaciju tokova saobraćaja, efikasnije korišćenje vazdušnog prostora i smanjenje nepotrebnih putnih distanci, kašnjenja i potrošnje goriva. Integracijom satelitske navigacije, trajektorijskog upravljanja leta i koncepta Free Route Airspace (FRA) postiže se smanjenje emisija CO₂ i povećanje ukupne bezbednosti, kapaciteta i održivosti vazduhoplovnog sistema.

FAA i ICAO preporučuju implementaciju CCO procedura u okviru programa **Performance-Based Navigation (PBN)** i **Continuous Climb and Descent Operations Framework**, sa ciljem smanjenja klimatskog uticaja pri polijetanju i sletanju.

– Continuous Descent Operations (CDO)

Tokom spuštanja, tradicionalni pristup “step descent” podrazumeva više nivoa zadržavanja, pri čemu se motori delimično uključuju da bi se održala brzina i visina – što povećava potrošnju goriva i emisije. CDO procedura, naprotiv, omogućava **glatko i kontinuirano spuštanje** iz krstareće visine do prilazne tačke aerodroma, uz minimalnu upotrebu potiska.

Prednosti CDO uključuju:

- **smanjenje potrošnje goriva za 20–40 kg po letu,**
- **smanjenje emisija CO₂ za oko 150–200 kg po letu** (u proseku kod uskotrupnih vazduhoplova),
- **značajno smanjenje buke i NO_x emisija** u terminalnim zonama, što je važno za aerodrome u urbanim sredinama.

CDO operacije zahtevaju koordinaciju između pilota, dispečera i kontrolora letenja, kao i napredne ATM sisteme koji omogućavaju precizno vremensko sekvencioniranje letova (*Time-Based Flow Management*).

– Optimizacija krstareće visine i brzine

Pored faza penjanja i spuštanja, značajna ušteda goriva može se postići izborom optimalne krstareće visine i brzine. Na višim visinama, potrošnja goriva po kilometru opada zbog niže gustine vazduha, ali efikasnost motora zavisi od temperature i mase aviona.

Dinamička optimizacija visine leta, poznata kao **Dynamic Flight Level Allocation (DFLA)**, omogućava vazduhoplovu da postepeno prelazi na više nivoe kako masa opada usled sagorevanja goriva. **Cost Index (CI)** metod planiranja leta integriše trošak goriva i vremena leta, balansirajući između maksimalne brzine i minimalne potrošnje.

Prema podacima *Eurocontrol-a*⁷⁹ i *ICAO Environmental Report 2022*, primena dinamičke optimizacije visine i brzine može dovesti do **smanjenja potrošnje goriva za 2–4% po letu**.

⁷⁹ EUROCONTROL je panevropska organizacija za bezbedu i efikasno upravljanje vazдушnim saobraćajem, koja koordinira planiranje kapaciteta, tokove saobraćaja i optimizaciju mreže ruta u Evropi. Kroz razvoj naprednih ATM sistema, digitalizaciju operacija i implementaciju koncepta Free Route Airspace (FRA), EUROCONTROL ima ključnu ulogu u smanjenju potrošnje goriva i emisija CO₂ u evropskom vazдушnom

– Uticaj meteoroloških faktora i digitalna podrška

Moderne **Flight Management Systems (FMS)** i **Electronic Flight Bag (EFB)**⁸⁰ aplikacije omogućavaju integraciju meteoroloških podataka u realnom vremenu, čime se optimizuje putanja leta u zavisnosti od vetrova, temperature i turbulencija. Korišćenjem satelitske navigacije i vremenskih modela (*4D Trajectory Optimization*), vazduhoplovi mogu izbegavati nepovoljne vetrove i time smanjiti trajanje leta i potrošnju goriva. Procenjuje se da digitalna optimizacija leta može doprineti **dodatnom smanjenju emisija CO₂ za 1–2%** po letu.

Optimizacija profila leta predstavlja **jednu od najefikasnijih kratkoročnih mera za smanjenje emisija** u komercijalnom i opštem vazduhoplovstvu. Iako ne zahteva velike infrastrukturne investicije, zahteva **koordinaciju između operatera, kontrole letenja i regulatornih tela**. U kombinaciji sa upotrebom **SAF-a i novih pogonskih tehnologija**, optimizacija leta čini ključni deo operativnog pristupa smanjenju emisija i ostvarivanju ciljeva definisanih kroz **CORSIA, EU ETS i Net Zero 2050** inicijative.

2. Efikasno planiranje leta i ruta

Efikasno planiranje leta i izbor optimalne rute predstavljaju ključne operativne mere za smanjenje potrošnje goriva i emisija CO₂ u civilnom vazduhoplovstvu. Ova strategija obuhvata optimizaciju horizontalnog profila leta, izbor najpovoljnijih meteoroloških uslova, smanjenje nepotrebnih devijacija i čekanja, kao i upotrebu naprednih sistema za **Air Traffic Management (ATM)** i **Flight Planning Optimization (FPO)**. Prema analizama *ICAO* i *Eurocontrol-a*, pravilnim planiranjem rute moguće je postići **smanjenje potrošnje goriva i do 6–8% po letu**, što direktno utiče na proporcionalno smanjenje emisija CO₂.

saobraćaju, podržavajući ciljeve klimatske politike Evropske unije i inicijative poput Single European Sky programa.

⁸⁰ **Flight Management Systems (FMS)** predstavljaju integrisane sisteme avionike koji automatizuju planiranje rute, navigaciju i optimizaciju profila leta u realnom vremenu, uzimajući u obzir parametre poput vetrova, performansi vazduhoplova, visine i potrošnje goriva. Primena FMS-a omogućava pilotima da realizuju **energetski optimalne trajektorije**, čime se smanjuje putna distanca, vreme leta i emisije CO₂.

Electronic Flight Bag (EFB) je digitalna platforma koja zamenjuje tradicionalnu papirnu avionsku dokumentaciju, uključujući karte, priručnike i planove leta, a takođe omogućava proračun performansi i planiranja goriva. Korišćenjem EFB sistema smanjuje se težina i papirologija u kokpitu, ubrjava priprema leta i doprinosi preciznijoj kontroli potrošnje goriva **i smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte**.

– Optimizacija ruta i 4D trajektorije

Savremeni koncept **trajektorijskog upravljanja (4D Trajectory Management)** zasniva se na preciznom planiranju rute u četiri dimenzije – dužina, širina, visina i vreme. Ovakav pristup omogućava da vazduhoplov leti **tačno definisanom putanjom**, uz sinhronizaciju sa vremenskim slotovima i prometom u vazдушnom prostoru.

Prednosti uključuju:

- eliminaciju nepotrebnih „holding“ krugova i zadržavanja pre sletanja,
- skraćivanje rute i vremena leta,
- bolje usklađivanje sa CCO/CDO procedurama i smanjenje emisija CO₂ i NO_x.

Upravljanje 4D trajektorijama ključno je za inicijative kao što su **SESAR (Single European Sky ATM Research)** u Evropi i **NextGen u SAD**, koje zajedno imaju cilj da do 2035. godine uvedu potpuno integrisano digitalno planiranje leta u realnom vremenu.

– Free Route Airspace (FRA) i fleksibilno korišćenje vazdušnog prostora

Tradicionalno, vazduhoplovi su morali slediti unapred definisane vazdušne koridore (ATS routes), što je često dovodilo do dužih ruta i povećane potrošnje goriva. Koncept **Free Route Airspace (FRA)** omogućava pilotima i dispečerima da planiraju **direktne rute između unapred definisanih tačaka ulaza i izlaza** iz određenog regiona, bez ograničenja na fiksne koridore.

Prednosti FRA sistema:

- prosečno **smanjenje udaljenosti leta za 10–40 nautičkih milja**,
- **ušteda goriva do 2% po letu**,
- **smanjenje emisija CO₂ za 20–60 kg po letu**, u zavisnosti od tipa vazduhoplova i dužine rute.

Evropska organizacija za kontrolu letenja (*Eurocontrol Network Manager*) procenjuje da će **puna implementacija FRA** u Evropi smanjiti emisije CO₂ za oko **5 miliona tona godišnje**.

– Uticaj meteoroloških uslova na planiranje leta

Efikasno planiranje rute podrazumeva integraciju meteoroloških podataka u realnom vremenu, posebno visinskih vetrova (jet streams), turbulencija i temperatura. Iskorišćavanje povoljnih vetrova u smeru leta (tailwind) i izbegavanje protivvetra (headwind) može skratiti vreme leta i potrošnju goriva i do **3%**, posebno na transkontinentalnim i transatlantskim

letovima. Moderni planeri leta koriste **Weather Optimization Modules (WOM)** unutar FMS ili EFB sistema koji analiziraju najnovije prognoze vetrova, gustine vazduha i temperature, i automatski predlažu optimalne rute.

– Collaborative Decision Making (CDM) i integracija planiranja

U modernim operacijama, planiranje leta više nije izolovan zadatak dispečera već deo **kolaborativnog odlučivanja (Collaborative Decision Making – CDM)** između pilota, aerodroma, kontrole letenja i meteoroloških centara.

CDM omogućava:

- pravovremeno reagovanje na promene vremena ili zagušenja u vazдушnom prostoru,
- dinamičko preusmeravanje ruta radi uštede goriva,
- efikasnije korišćenje slotova i smanjenje čekanja u terminalnim zonama.

FAA i Eurocontrol su potvrdili da primena CDM koncepta u praksi doprinosi **redukciji kašnjenja i nepotrebnog leta do 15 minuta po letu**, što predstavlja **prosečnu uštedu od oko 200–300 kg CO₂ po letu**.

– Integracija sa sistemima SAF i Net Zero strategijama

Planiranje leta se sve više integriše sa održivim praksama, uključujući **alokaciju SAF goriva po rutama sa najvećim ekološkim uticajem**. Kombinacijom efikasnog planiranja i korišćenja SAF-a, moguće je postići **ukupno smanjenje emisija CO₂ i do 30–40%** po letu u poređenju sa konvencionalnim operacijama. Ovakav pristup je u skladu sa principima **IATA Net Zero 2050** i **CAO CORSIA** programa, koji zahtevaju transparentno izveštavanje o emisijama u zavisnosti od rute, visine i tipa goriva.

Efikasno planiranje leta i rute predstavlja **najisplativiju i trenutno najdostupniju meru smanjenja emisija** u komercijalnom vazduhoplovstvu. Integracijom digitalnih alata, meteoroloških modela i ATM sistema, vazduhoplovne kompanije mogu ostvariti znatne ekonomske i ekološke koristi. Ova strategija, u kombinaciji sa **optimizacijom profila leta, upotrebom SAF-a i naprednim FMS tehnologijama**, čini suštinski deo operativnog puta ka **dekarbonizovanom i energetski održivom vazduhoplovstvu budućnosti**.

3. Efikasno upravljanje na zemlji (Taxi i ATC procedure)

Efikasno upravljanje operacijama na zemlji predstavlja važan, ali često zanemaren segment strategije smanjenja emisija u vazduhoplovstvu. Iako faze taksiranja, pripreme i parkiranja

čine relativno mali deo ukupnog vremena leta, one mogu generisati značajne količine emisija CO₂, NO_x i nesagorelih ugljovodonika, posebno kod velikih aerodroma sa gustim saobraćajem. Procene *ICAO Environmental Report 2022* pokazuju da **operacije na zemlji mogu činiti 5–10% ukupne potrošnje goriva po letu**, što znači da optimizacija u ovoj fazi može doneti realne i merljive rezultate u smanjenju emisija.

– Taksiranje sa jednim motorom (Single-Engine Taxi)

Jedna od najjednostavnijih i najefikasnijih mera u fazi zemaljskih operacija jeste taksiranje sa jednim motorom kod dvo-motornih vazduhoplova. Ova praksa podrazumeva da se nakon sletanja ili pre poletanja koristi samo jedan motor za kretanje po zemlji, dok je drugi isključen ili u režimu mirovanja do trenutka izlaska na pistu.

Prednosti uključuju:

- **smanjenje potrošnje goriva do 40% tokom taksiranja,**
- **redukciju emisija CO₂ za 200–400 kg po letu** kod uskotrupnih vazduhoplova,
- **manje habanje motora i niži operativni troškovi.**

Primena ove mere zahteva odgovarajuće procedure i obuku posada, kao i pažljivo planiranje na aerodromima sa kompleksnim taksi-stazama.

– Električno i hibridno vučenje vazduhoplova (Taxi-Bot i e-Taxi sistemi)

Razvoj električnih i hibridnih sistema za taksiranje postaje ključna inovacija u smanjenju emisija na zemlji. **Taxi-Bot** je poluautomatski sistem vuče koji koristi električnu vučnu jedinicu povezanu sa vazduhoplovom, čime se eliminiše potreba za radom glavnih motora tokom taksiranja.

Prednosti uključuju:

- **do 85% smanjenja potrošnje goriva tokom taksiranja,**
- **značajno smanjenje buke i termalnog zagađenja,**
- povećanje bezbednosti u zoni gate-ova i rampi.

Slično, koncept **e-Taxi** predviđa ugradnju električnih motora u glavne točkove vazduhoplova, napajanih iz pomoćnog agregata (APU) ili baterija. Ovi sistemi trenutno prolaze kroz testne faze kod proizvođača poput *Airbus*, *Safran* i *WheelTug*, a njihova šira komercijalna primena očekuje se do 2030. godine.

– Optimizacija rada pomoćnih agregata (APU Management)

APU (Auxiliary Power Unit) je izvor energije za klimatizaciju, električne sisteme i pokretanje motora na zemlji, ali i jedan od značajnih izvora emisija. Tipičan APU troši **60–100 kg goriva na sat**, što generiše više od **300 kg CO₂ emisija** ako se koristi tokom dužeg zadržavanja. Efikasnim upravljanjem može se ostvariti:

- **smanjenje potrošnje goriva do 50%** korišćenjem eksternog napajanja (*Ground Power Unit – GPU*) i pneumatskog vazduha (*Pre-Conditioned Air – PCA*),
- **produženje veka trajanja APU jedinice**,
- **smanjenje buke i termičkog zagađenja na platformi**.

Većina aerodroma u EU i SAD ima procedure koje ograničavaju upotrebu APU-a na **maksimalno 5–10 minuta pre odlaska**, čime se postiže i regulatorno usklađivanje sa ciljevima *EU ETS* i *ICAO Annex 16*.

- Optimizacija gate i pushback operacija

Efikasno planiranje pozicija gate-ova i pushback operacija utiče na smanjenje ukupnog vremena boravka na zemlji. Implementacijom sistema **Airport Collaborative Decision Making (A-CDM)** omogućava se:

- pravovremena koordinacija između posada, kontrolora i zemaljskih službi,
- smanjenje kašnjenja u rotaciji vazduhoplova,
- redukcija neefikasnih perioda rada motora u praznom hodu.

Prema istraživanjima *Eurocontrol-a*, aerodromi koji su implementirali A-CDM zabeležili su prosečno **smanjenje potrošnje goriva od 50–100 kg po letu**, uz značajno poboljšanje tačnosti polazaka (on-time performance).

- Elektrifikacija zemaljske podrške (Ground Support Equipment – GSE)

Elektrifikacija vozila i opreme za zemaljsku podršku (baggage tractors, GPU, pushback tugs) predstavlja ključnu meru u smanjenju emisija iz ne-letećih segmenata aerodroma.

Prelazak sa dizel agregata na **električne GSE sisteme** doprinosi:

- potpunom eliminisanju lokalnih emisija CO₂ i NO_x,
- smanjenju buke i toplote na radnim površinama,
- boljim uslovima rada za tehničko osoblje.

Aerodromi poput *Amsterdam Schiphol*, *Los Angeles (LAX)* i *Dallas-Fort Worth (DFW)* već imaju implementirane električne flote GSE, što je deo njihove šire politike **Net Zero Airport Operations do 2030. godine**.

Efikasno upravljanje na zemlji predstavlja **neodvojiv deo dekarbonizacije vazduhoplovstva**, jer spaja tehničke, operativne i infrastrukturne aspekte u jednu celinu. Primena mera kao što su *single-engine taxi*, električno vučenje, APU optimizacija i A-CDM integracija ne samo da smanjuju emisije, već i povećavaju operativnu efikasnost i bezbednost. U kombinaciji sa upotrebom **SAF-a** i unapređenjem **profilisanja leta i planiranja ruta**, zemaljske operacije postaju važan element u ostvarivanju ciljeva **ICAO CORSIA, EU ETS i Net Zero 2050** programa.

4. Tehničko održavanje i aerodinamičke modifikacije

Tehničko održavanje i aerodinamičke modifikacije imaju ključnu ulogu u smanjenju potrošnje goriva i emisija gasova sa efektom staklene bašte u vazduhoplovstvu. Dok operativne strategije (optimizacija profila leta, ruta i zemaljskih operacija) utiču na kratkoročne uštede, redovno **održavanje i tehnička poboljšanja vazduhoplova** obezbeđuju **dugoročno i kumulativno smanjenje emisija** kroz poboljšanje aerodinamičke efikasnosti, pouzdanosti motora i smanjenje otpora.

– Preventivno i prediktivno održavanje

Redovno tehničko održavanje ima direktan uticaj na emisije jer sprečava degradaciju performansi motora, sistema goriva i aerodinamičkih površina. Svaka nepravilnost – zaprljan kompresor, istrošeni brtveni prstenovi, oštećeni spojleri ili čak neravnomerno naduvane gume – povećava aerodinamički otpor i smanjuje efikasnost.

Implementacijom **prediktivnog održavanja (Predictive Maintenance)**, zasnovanog na digitalnim senzorima i analizi podataka (*Aircraft Health Monitoring Systems – AHMS*)⁸¹, moguće je:

- pravovremeno otkrivanje degradacije performansi motora,
- planiranje zamena komponenti prema stvarnom stanju,

⁸¹ Aircraft Health Monitoring Systems (AHMS) predstavljaju napredne digitalne sisteme namenjene kontinuiranom prikupljanju, obradi i analizi podataka o tehničkom stanju vazduhoplova u realnom vremenu. AHMS omogućavaju praćenje ključnih parametara motora i vazduhoplovnih sistema, otkrivanje odstupanja i potencijalnih kvarova pre nego što do njih dođe, što unapređuje bezbednost leta, smanjuje potrebu za neplaniranim održavanjem i optimizuje efikasnost potrošnje goriva. Primena prediktivne analitike zasnovane na AHMS doprinosi produžavanju radnog veka komponenti, smanjenju operativnih troškova i indirektnom smanjenju emisija CO₂.

- smanjenje neplaniranih zastoja i operativnih troškova.

Podaci *Rolls-Royce TotalCare* programa pokazuju da optimizovano održavanje može smanjiti **potrošnju goriva i do 1,5% godišnje** po vazduhoplovu, što na flotu od 100 vazduhoplova znači uštedu od više od **25 miliona litara goriva i 80,000 tona CO₂ godišnje**.

- Aerodinamičko čišćenje i površinska efikasnost

Zadržavanje optimalne aerodinamičke glatkoće površina vazduhoplova predstavlja jednu od najjednostavnijih, ali vrlo efektnih mera za smanjenje otpora. Nečistoće, insekti, zalepljeni ostaci goriva ili boje mogu povećati koeficijent otpora (*C_d*) za 0,001–0,003, što rezultuje rastom potrošnje goriva za **1–2%** po letu.

Redovno **pranje trupa i krila (airframe washing)**, poliranje, kao i primena **nano-premaznih materijala (hydrophobic coatings)**, omogućavaju:

- smanjenje koeficijenta trenja,
- bolje laminisanje vazdušnog toka,
- produženje životnog veka boje i strukture.

Airbus je 2023. testirao *SharkSkin laminarne premaze*, koji imitiraju mikrostrukturu kože morskog psa i omogućavaju smanjenje otpora trenja i do **1,1%**, što ekvivalentno znači **0,6% smanjenja CO₂ emisija** po letu.

- Winglets i aerodinamičke modifikacije krila

Jedan od najpoznatijih primera aerodinamičkih poboljšanja jeste ugradnja **winglet-a** – vertikalnih završetaka krila koji smanjuju indukovani otpor i poboljšavaju odnos uzgona i otpora (*L/D ratio*).

Zahvaljujući ovoj modifikaciji:

- potrošnja goriva se smanjuje za **3–5%** kod uskotrupnih vazduhoplova,
- emisije CO₂ se smanjuju za **50–100 tona godišnje po vazduhoplovu**,
- povećava se domet i maksimalna korisna masa.

Postoje različite vrste winglet-a – **blended, split-tip, sharklet, scimitar**, a savremeni proizvođači (Airbus, Boeing, Embraer) ih ugrađuju i retrofituju i na starije modele. Boeing 737NG sa “Split Scimitar” winglet-ima pokazuje prosečno **smanjenje potrošnje goriva za 240,000 litara godišnje** po vazduhoplovu.

- Motori – efikasnost, balans i održavanje

Motori su izvor oko 99% emisija CO₂ u letu, pa njihova efikasnost ima najveći uticaj. Redovno balansiranje i čišćenje kompresora, zamena filtera i optimizacija kalibracije sistema goriva mogu smanjiti specifičnu potrošnju goriva (*Specific Fuel Consumption – SFC*) za **0,5–1,0%**.

Nove tehnologije u okviru **engine retrofit programa** uključuju:

- **3D-printed turbine blades** sa smanjenom težinom,
- **advanced ceramic coatings (CMC)** za višu termalnu efikasnost,
- **geared turbofan (GTF)** sisteme koji omogućavaju optimalan odnos obrtaja kompresora i ventilatora.

Održavanje termalne efikasnosti motora ključno je i za smanjenje emisija NO_x, koje rastu eksponencijalno sa porastom temperature sagorevanja.

- Tehničke modifikacije trupa i podvozja

Smanjenje otpora moguće je i putem modifikacija trupa i podvozja:

- aerodinamičke obloge na spojevima i priključcima,
- zatvaranje nepotrebnih otvora i prelaza,
- optimizacija vrata podvozja i fairing panela,
- upotreba **kompozitnih materijala** sa glatkijom površinom i manjom masom.

Korišćenje kompozita u novim generacijama aviona (npr. *Boeing 787*, *Airbus A350*) omogućava smanjenje težine do **20%**, što rezultuje **smanjenjem potrošnje goriva za 15–25%** u poređenju sa prethodnim aluminijumskim konstrukcijama.

- Digitalno praćenje performansi (Aircraft Performance Monitoring – APM)

U modernim flotama primenjuju se sistemi koji kontinuirano prate performanse svakog vazduhoplova u realnom vremenu – *APM* i *Fuel Efficiency Monitoring Systems (FEMS)*.

Analizom odstupanja od referentnih vrednosti (baseline) omogućava se:

- brza detekcija degradacije performansi,
- optimizacija intervala održavanja,
- izračun stvarnog karbonskog otiska svakog vazduhoplova.

Na taj način, održavanje postaje deo integrisanog sistema za **dekarbonizaciju i planiranje emisija**, povezanog sa ICAO CORSIA i EU ETS platformama za izveštavanje.

Tehničko održavanje i aerodinamičke modifikacije čine **osnovu inženjerskog pristupa smanjenju emisija** u vazduhoplovstvu. Dok operativne mere donose trenutne efekte, tehnička unapređenja obezbeđuju **trajnu efikasnost i smanjenje ugljeničnog otiska** tokom celog životnog ciklusa vazduhoplova. Integracija preventivnog održavanja, digitalnog nadzora, novih materijala i aerodinamičkih inovacija omogućava da moderna flota vazduhoplova postane **tehnološki stub globalne tranzicije ka održivom vazduhoplovstvu**, u skladu sa ciljevima **Net Zero 2050** i **SAF Grand Challenge** programa.

5. Optimizacija težine i tereta

Optimizacija težine i tereta (Weight and Load Optimization) predstavlja jednu od najefikasnijih i neposrednih mera za smanjenje potrošnje goriva i emisija CO₂ u vazduhoplovstvu. Ukupna težina vazduhoplova direktno utiče na potrebni potisak, otpor, brzinu penjanja i krstareću potrošnju goriva. Prema istraživanjima *Airbus Flight Operations Performance Engineering Manual (FOPM)*, svako smanjenje mase vazduhoplova za **100 kg** rezultuje prosečnim **smanjenjem potrošnje goriva za 8–10 kg po letu**, što odgovara redukciji od približno **30–35 tona CO₂ godišnje** po vazduhoplovu u komercijalnoj upotrebi.

– Optimizacija mase praznog vazduhoplova (Operating Empty Weight – OEW)

Masa praznog vazduhoplova (OEW) obuhvata konstrukciju, opremu, sisteme i kabinski enterijer. Smanjenje ove mase ostvaruje se primenom **lakših materijala i struktura**, kao i racionalnim odabirom opreme i konfiguracije.

Glavne mere uključuju:

- primenu **kompozitnih materijala (CFRP, GFRP)** u trupu, krilima i repnim površinama;
- korišćenje **lakših kabinskih sedišta**, podnih panela i toalet modula;
- zamenu staklenih kabinskih pregrada polikarbonatnim;
- redukciju nepotrebne kabinske opreme (npr. težine catering kolica, tepih materijala i displeja).

Airbus je izračunao da samo zamena kompleta kabinskih sedišta sa kompozitnim modelima može smanjiti težinu A320 aviona za **do 800 kg**, što godišnje donosi **uštede od preko 25,000 litara goriva i 80 tona CO₂**.

– Optimizacija korisnog tereta (Payload Management)

Efikasno planiranje i raspodela korisnog tereta (putnika, prtljaga i robe) ključni su za održavanje **optimalnog centra težišta (CG – Center of Gravity)**, koji direktno utiče na aerodinamičku efikasnost. Kada se CG nalazi bliže zadnjem limitu, vazduhoplov zahteva manji uzgon horizontalnog stabilizatora, čime se smanjuje otpor i potrošnja goriva. Studije *Boeing Performance Engineering Group* pokazuju da let sa optimalnim CG položajem može smanjiti potrošnju goriva i do **1,5–2% po letu**.

Operativne mere uključuju:

- Precizno planiranje rasporeda putnika i prtljaga;
- Automatske kalkulacije CG-a kroz **Electronic Load Sheet (ELS)**⁸² sisteme;
- Dinamičko balansiranje tereta kod kargo vazduhoplova korišćenjem *Center of Gravity Optimization Tools*.
- Optimizacija količine goriva (Fuel Load Management)

Prekomerno punjenje rezervoara (“fuel tankering”) često dovodi do nepotrebnog povećanja težine, jer gorivo koje se prevozi ima sopstveni energetska trošak. Prema *IATA Fuel Efficiency Report*, svaka tona dodatnog goriva povećava potrošnju za **oko 3%** u fazi penjanja. Zbog toga se sve više primenjuju sistemi **Dynamic Fuel Planning**, koji u realnom vremenu procenjuju optimalnu količinu goriva na osnovu vetrova, ruta i rezervi.

Pravilnim upravljanjem količinom goriva moguće je postići:

- **smanjenje mase vazduhoplova za 1–3 tone** kod srednjih letova,
- **uštede goriva od 50–100 kg po letu**,
- manju opterećenost strukture i niže emisije CO₂ i NO_x.
- Upotreba digitalnih alata za planiranje mase

Savremene vazduhoplovne kompanije koriste digitalne platforme kao što su *Aircraft Performance Monitoring (APM)*, *Weight and Balance Software* i *Load Control Systems*, koje

⁸² Electronic Load Sheet (ELS) predstavlja digitalnu verziju tradicionalnog dokumenta o masi i centriranju vazduhoplova, koja omogućava automatski unos i obračun podataka o putnicima, prtljagu, gorivu i teretu. Primena ELS sistema smanjuje mogućnost grešaka prilikom proračuna, ubrzava pripremu leta i pruža tačnije određivanje težišta, što doprinosi bezbednijem i efikasnijem radu vazduhoplova. Kao deo procesa digitalizacije operacija, ELS omogućava i optimizaciju mase vazduhoplova, indirektno doprinoseći smanjenju potrošnje goriva i emisija CO₂ tokom leta.

automatski izračunavaju optimalne parametre mase i balansa za svaki let. Ovi sistemi integrišu podatke o ruti, vremenu, vetrovima, SAF mešavinama i tipu vazduhoplova, čime omogućavaju:

- automatsku optimizaciju ukupne težine,
- prilagođavanje rezervi goriva u realnom vremenu,
- smanjenje manuelnih grešaka u planiranju,
- transparentno praćenje efekata na emisije CO₂.

Primena digitalnih *Weight Management* sistema doprinosi **smanjenju ukupne potrošnje goriva flote za 0,5–1,0%**, što kod velikih operatera znači stotine hiljada tona CO₂ manje godišnje.

- Upotreba lakših komponenti i aditivne proizvodnje

Aditivna tehnologija (*3D printing*) omogućava proizvodnju delova sa manjom masom uz zadržavanje čvrstoće i integriteta. Kompanije kao što su *GE Aerospace* i *Airbus* već koriste 3D štampane komponente (nosače, ventile, kanale goriva, HVAC module) koje smanjuju težinu po komponenti i do **30–50%**. Na primer, 3D-štampani nosač za *LEAP turbofan motor* smanjuje ukupnu masu motora za **500 g po komadu**, što u serijskoj proizvodnji daje značajnu kumulativnu uštedu i smanjenje emisija tokom životnog ciklusa vazduhoplova.

- Uklanjanje nepotrebne opreme i standardizacija konfiguracija

Kroz program tzv. *Zero-Waste Load Optimization*, vazduhoplovne kompanije periodično analiziraju i uklanjaju nepotrebnu opremu iz kabine i teretnog prostora.

To obuhvata:

- zamenu papira elektronskim dokumentima (EFB umesto priručnika),
- smanjenje količine catering opreme,
- standardizaciju konfiguracija letelica prema tipu linije (short-haul vs long-haul).

Uvođenje *paperless cockpit* sistema i elektronskih karata smanjilo je prosečnu težinu kabine za **80–100 kg**, što donosi **uštede goriva od 10,000 litara godišnje po vazduhoplovu**.

Optimizacija težine i tereta **ima direktan i merljiv uticaj na smanjenje potrošnje goriva i emisija CO₂**, ali i indirektne koristi u pogledu performansi, sigurnosti i troškova održavanja. Integracijom **digitalnih alata, lakših materijala i preciznog planiranja mase**, moderni operateri mogu ostvariti značajnu energetska efikasnost bez potrebe za velikim

infrastrukturnim ulaganjima. U kombinaciji sa **upotrebom SAF-a, optimizacijom profila leta i tehničkim unapređenjima**, ova strategija čini važan stub dekarbonizacije vazduhoplovstva i ostvarivanja ciljeva **ICAO CORSIA, EU ETS i Net Zero 2050** programa.

6. Trening i svest posade

Upravljanje emisijama i efikasna potrošnja goriva u savremenom vazduhoplovstvu **ne zavise samo od** tehnologije i infrastrukture, **već i od ljudskog faktora**, odnosno od obuke, svesti i ponašanja pilotskog i kabinskog osoblja. Brojne studije, uključujući *IATA Fuel Efficiency Training Manual* i *ICAO Human Performance Framework*, potvrđuju da **kvalitetna obuka posade može doprineti smanjenju potrošnje goriva i do 5%**, čime se ostvaruje značajan uticaj na ukupne emisije CO₂.

– Uloga pilota u efikasnom upravljanju letom

Piloti direktno utiču na performanse i potrošnju goriva kroz način vođenja leta, izbor brzine, visine, potiska i režima penjanja ili spuštanja. Pravilnim odabirom režima potiska, upotrebom *Cost Index (CI)* metoda i poštovanjem planiranih 4D profila leta, posada može uštedeti od **50 do 300 kg goriva po letu**, u zavisnosti od tipa vazduhoplova i dužine rute.

Ključne operativne tehnike obuke uključuju:

- **Economy climb i descent profile** – korišćenje optimalnih režima potiska i brzine tokom penjanja i spuštanja;
- **Idle-thrust descent** – spuštanje sa minimalnim potiskom motora, u skladu sa CDO procedurama;
- **Accurate speed management** – održavanje ekonomske brzine u zavisnosti od težine, visine i vetra;
- **Single-engine taxi** i redukovano korišćenje APU-a;
- **Flight path monitoring** – stalna analiza odstupanja između planiranog i stvarnog profila leta.

Prema analizama *British Airways Fuel Efficiency Program*, sistematska primena ovih tehnika dovela je do prosečne godišnje uštede od **70,000 tona CO₂**.

– Obuka kroz simulatore i AQP programe

Savremeni pristup obuci posade sve više uključuje **Scenario-Based Training (SBT)** i **Advanced Qualification Programs (AQP)**, koji omogućavaju pilotima da u realističnim

simulacijama vežbaju donošenje odluka vezanih za efikasno upravljanje gorivom i performansama.

Trening moduli uključuju:

- simulacije *fuel-critical* scenarija i upravljanje rezervama;
- procenu optimalne brzine i visine u promenljivim meteorološkim uslovima;
- analizu “energy management” pristupa u realnim situacijama;
- evaluaciju *crew coordination* i *decision-making* u skladu sa *Threat and Error Management (TEM)* konceptom.

Ovi treninzi razvijaju **operativnu svest o energetskej efikasnosti**, što postaje standardna komponenta u modernim školama letenja i ATO centrima, uključujući programe kao što je **Golden Wings Team Flight Training Center**, gde se posebna pažnja posvećuje racionalnoj potrošnji goriva i odgovornom upravljanju resursima.

- Svest i kultura održivosti

Podizanje svesti o značaju energetske efikasnosti i smanjenju emisija mora biti sastavni deo **organizacione kulture**. U okviru vazduhoplovnih kompanija, to se postiže kroz:

- interne kampanje o ekološkoj odgovornosti;
- motivacione programe za posade koje postižu najviše rezultate u smanjenju potrošnje;
- redovno deljenje podataka o performansama flote i pojedinačnih letova (*Fuel Efficiency Dashboards*).

Kada piloti imaju direktan uvid u podatke o potrošnji goriva, odstupanjima i rezultatima sopstvenih letova, razvija se **odgovornost i svesna kontrola** nad svakim aspektom operacije. Takva transparentnost ne samo da smanjuje emisije, već povećava i profesionalni ponos i pripadnost timu.

- Zajednički trening pilota, inženjera i dispečera

Efikasno planiranje i izvođenje leta zahtevaju koordinaciju između svih učesnika – pilota, dispečera i tehničkog osoblja. Zbog toga mnoge organizacije sprovode **zajedničke treninge (Joint Efficiency Workshops)**, gde se analiziraju konkretni letovi i identifikuju prilike za uštedu goriva kroz:

- preciznije planiranje mase i balansa,

- efikasnije taksiranje i upotrebu APU-a,
- izbor optimalnog profila i brzine leta.

IATA preporučuje najmanje **jedan godišnji zajednički trening** za sve članove operativnog osoblja u okviru programa “Fuel Management and Emission Awareness”. Ovaj holistički pristup jača međusektorsku saradnju i povezuje **ljudske faktore sa tehničkim performansama**.

- Praćenje performansi posade (Crew Efficiency Monitoring)

Nove generacije *Flight Data Monitoring (FDM)* i *Fuel Efficiency Tracking* sistema omogućavaju objektivno praćenje ponašanja posada u letu.

Analiziraju se parametri kao što su:

- prosečna brzina penjanja i spuštanja,
- broj i trajanje idle perioda,
- preciznost pridržavanja planirane putanje,
- vreme korišćenja APU-a i taksi dužina.

Na osnovu tih podataka razvijaju se personalizovani izveštaji i programi dodatne obuke, koji ne služe kao sankcija, već kao **instrument poboljšanja performansi i podizanja svesti o ekološkom uticaju**.

Trening i svest posade predstavljaju **ljudsku dimenziju održivog vazduhoplovstva**. Bez aktivnog angažovanja pilota, dispečera i inženjera, tehničke inovacije i regulative ne mogu ostvariti puni efekat. Kroz sistematsku obuku, upotrebu simulatora, praćenje performansi i izgradnju kulture održivosti, vazduhoplovna industrija može ostvariti **trajne promene u ponašanju i navikama posada**, što je ključno za dostizanje globalnih ciljeva **Net Zero 2050, CORSIA i SAF Grand Challenge**.

3. PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

Vazduhoplovstvo kao grana saobraćaja beleži kontinuiran rast, ali istovremeno ostaje jedan od značajnijih emitenata ugljen-dioksida - CO₂ po pređenom kilometru po putniku. Tradicionalna fosilna vazduhoplovna goriva, koja se koriste decenijama, doprinose negativnom uticaju na životnu sredinu i klimatske promene. U svetlu rastuće potrebe za dekarbonizacijom vazdušnog saobraćaja, održivo vazduhoplovno gorivo - SAF se javlja kao jedno od najperspektivnijih rešenja. Ipak, nedovoljno je istražen uticaj SAF-a na emisiju CO₂ u realnim operativnim uslovima, posebno na različitim visinama leta, što predstavlja ključnu prepreku za širu implementaciju ovog goriva.

Uz to, većina dosadašnjih studija fokusira se na teorijske modele emisije ili eksperimentalne podatke iz laboratorijskih uslova, dok je analiza iz ugla stvarne primene u pilotiranju i održavanju vazduhoplova retka. Ovaj nedostatak praktičnog uvida stvara jaz između naučnih saznanja i realnih potreba vazduhoplovstva.

3.1. Pristup problemu istraživanja

Problem emisije ugljen-dioksida iz sektora vazduhoplovstva zahteva višeslojan i integrisan pristup istraživanju, s obzirom na kompleksnost faktora koji utiču na efikasnost goriva i emisioni bilans tokom različitih faza leta. Tradicionalna fosilna vazduhoplovna goriva ostaju glavni izvor emisije CO₂, dok održiva vazduhoplovna goriva – SAF predstavljaju alternativu čiji uticaj na emisije u realnim operativnim uslovima još uvek nije u potpunosti istražen.

Pristup ovom problemu obuhvata sledeće istraživačke komponente:

- Analitičko upoređivanje fizičko-hemijskih svojstava goriva – Proučavaju se parametri kao što su gustina, sadržaj ugljenika, energetska vrednost i stehiometrijski odnos sagorevanja za različite vrste goriva, uključujući Jet A, Jet A-1 i različite tipove SAF-a. Poređenje se vrši radi procene potencijala svakog goriva da smanji emisije CO₂ u standardizovanim i promenljivim uslovima.
- Stratifikacija podataka po visinama leta – Emisije CO₂ ne zavise isključivo od tipa goriva, već i od atmosferskih uslova koji variraju sa visinom. U okviru istraživanja analiziraju se promene u temperaturi, pritisku i gustini vazduha po slojevima troposfere i njihove implikacije na efikasnost sagorevanja i emisije iz vazduhoplova.

Time se omogućava realna procena performansi SAF-a u operativnim uslovima na različitim visinama leta.

- Korišćenje podataka iz stvarnih letačkih operacija – Obrađuju se podaci sa sistema za elektronski monitoring motora i leta (npr. FADEC, EMS, G3X, AirNC) koji beleže performanse motora, potrošnju goriva i emisije tokom različitih režima leta. Ovi podaci omogućavaju analizu ponašanja goriva u dinamičnom okruženju i identifikaciju obrazaca koji nisu dostupni putem laboratorijskih ispitivanja.
- Uporedna analiza međunarodnih standarda i regulativa – Radi objektivnog vrednovanja rezultata, pristup uključuje upoređivanje važećih standarda i smernica koje se odnose na emisije u vazduhoplovstvu, uključujući ICAO, ASTM, CORSIA i druge relevantne okvire. Time se obezbeđuje usklađenost analize sa globalnim normama i ciljevima dekarbonizacije.
- Inženjerski i operativni uvid – U analizi se uvažavaju tehnički zahtevi i izazovi primene SAF-a u postojećim vazduhoplovnim sistemima, uključujući kompatibilnost sa motorima, uticaj na intervale održavanja i pouzdanost sistema. Pristup kombinuje teorijska saznanja sa operativnim principima koji se primenjuju u komercijalnom i lakom generalnom vazduhoplovstvu.
- Interdisciplinarna metodologija – Istraživanje se zasniva na spoju znanja iz oblasti energetike, aeronautike, ekologije i inženjeringa, čime se omogućava sveobuhvatno sagledavanje uticaja goriva na emisije CO₂. Metodologija uključuje kvantitativne analize, upotrebu realnih podataka i simulaciju scenarija primene različitih vrsta goriva u konkretnim letačkim uslovima.

Ovakav pristup omogućava dublje razumevanje ekološkog i tehničkog potencijala održivih vazduhoplovnih goriva, sa posebnim fokusom na visinsku zavisnost emisija, kao i na mogućnosti optimizacije letačkih operacija u cilju smanjenja ugljeničnog otiska.

3.2. Definisane probleme istraživanja

Vazduhoplovstvo predstavlja jedan od najbrže rastućih sektora transporta, ali i značajan izvor emisije gasova sa efektom staklene bašte, pre svega ugljen-dioksida (CO₂). Uprkos tome što vazduhoplovi učestvuju u ukupnoj globalnoj emisiji sa oko 2–3%, njihov doprinos klimatskim promenama postaje sve izraženiji zbog porasta broja letova, dužine ruta i rastuće

potražnje za vazdušnim prevozom. Zbog toga je postalo nužno uvođenje strategija koje omogućavaju smanjenje emisija bez ugrožavanja bezbednosti i efikasnosti letenja.

Jedno od rešenja koje dobija sve veću pažnju jeste upotreba održivog vazduhoplovnog goriva - SAF, koje se proizvodi iz obnovljivih izvora i koje ima potencijal da značajno smanji neto emisije CO₂ u odnosu na konvencionalna fosilna goriva. Iako su eksperimentalne i simulacione studije pokazale pozitivan uticaj SAF-a na smanjenje emisija, postoje značajna ograničenja u dostupnim istraživanjima. Pre svega, većina analiza je sprovedena u kontrolisanim uslovima, bez razmatranja uticaja stvarnih faktora leta, kao što su:

- promene atmosferskih uslova sa visinom (temperatura, pritisak, gustina vazduha),
- različiti režimi rada motora tokom faza leta (poletanje, krstarenje, sletanje),
- aerodinamička opterećenja i prilagođavanje potrošnje goriva u realnim operacijama.

Odsustvo integrisane analize performansi SAF-a u kontekstu visinske zavisnosti emisije CO₂ predstavlja ozbiljnu prazninu u naučnoj literaturi. Istovremeno, nedovoljno je razjašnjeno kako se održiva goriva ponašaju u različitim operativnim uslovima i kako ta ponašanja utiču na ukupnu emisiju iz letelice.

Pored toga, postoji potreba za tehničkom evaluacijom usklađenosti SAF-a sa postojećim vazduhoplovnim sistemima, motorima i senzorima za praćenje emisija. Bez pouzdanih i praktično primenljivih podataka koji obuhvataju vertikalni profil leta, teško je definisati standarde i politike koje bi podržale širu upotrebu ovih goriva u komercijalnom i lakom generalnom vazduhoplovstvu.

Zbog navedenog, problem istraživanja se može definisati kao potreba za sveobuhvatnim ispitivanjem uticaja različitih vrsta održivog vazduhoplovnog goriva na emisije ugljen-dioksida u zavisnosti od visine leta i operativnih uslova rada motora, sa ciljem objektivne procene njihove efikasnosti i doprinosa smanjenju emisija u stvarnom vazdušnom saobraćaju.

3.3. Definisane osnovnih područja istraživanja

Istraživanje uticaja održivih vazduhoplovnih goriva na emisiju ugljen-dioksida - CO₂ pri različitim visinama leta obuhvata više međusobno povezanih naučnih i tehničkih oblasti. S

obzirom na kompleksnost problematike, istraživanje je postavljeno na preseku sledećih osnovnih područja:

- Vazduhoplovna tehnika i inženjering

Ovo područje obuhvata proučavanje konstrukcije i rada vazduhoplovnih motora, performansi letelica u različitim režimima leta, kao i tehničkih aspekata korišćenja alternativnih goriva u savremenim pogonskim sistemima. Poseban fokus stavlja se na kompatibilnost održivih goriva sa postojećim motorima i na uticaj goriva na radne temperature, potrošnju i pouzdanost motora.

- Hemijska tehnologija i goriva

Ova oblast pruža temelj za razumevanje strukture, svojstava i procesa sagorevanja vazduhoplovnog goriva. Analiziraju se fiziko-hemijske karakteristike fosilnih i održivih goriva, uključujući energetske gustinu, viskoznost, sadržaj ugljenika i emisijski potencijal. Upoređivanjem ovih parametara omogućava se kvantitativna procena razlika u emisijama između različitih tipova goriva.

- Ekologija i zaštita životne sredine

Istraživanje se oslanja i na principe ekološkog inženjeringa i procene uticaja emisija iz vazduhoplovstva na klimatske promene. U okviru ove oblasti razmatraju se globalni i lokalni efekti emisije CO₂, kao i uloga vazduhoplovstva u ukupnom karbonskom otisku transportnog sektora. Takođe, analizira se usklađenost sa međunarodnim standardima i ciljevima održivog razvoja (na primer CORSIA, ICAO, EU ETS).

- Teorija letenja i meteorologija

Uzimajući u obzir da se emisije razlikuju u zavisnosti od visine leta, istraživanje uključuje i atmosfere nauke, sa fokusom na promene uslova sredine (temperatura, pritisak, gustina vazduha) po visinskim slojevima. Ova oblast omogućava tačnije modeliranje performansi goriva u različitim delovima atmosfere i njihovu povezanost sa efikasnošću sagorevanja i emisijama.

- Operativno upravljanje i održivo vazduhoplovstvo

Pored tehničkih aspekata, istraživanje se oslanja i na strategije operativnog upravljanja letovima koje mogu doprineti smanjenju emisija – uključujući optimizaciju rute, planiranje

težine, visinsko profilisanje leta i izbor goriva. Ova oblast integriše inženjerske podatke sa stvarnim procedurama i praksom u vazduhoplovnim operacijama.

3.4. Varijable i indikatori

U ovom istraživanju definišu se ključne varijable i indikatori koji omogućavaju kvantitativnu i kvalitativnu analizu uticaja održivih vazduhoplovnih goriva na emisije ugljen-dioksida - CO₂ u zavisnosti od visine leta i operativnih uslova. Varijable su podeljene na zavisne, nezavisne i kontrolne, dok su indikatori merne jedinice ili parametri koji omogućavaju merenje i poređenje varijabli.

1. Zavisna varijabla (output varijabla):

- Emisija ugljen-dioksida - CO₂ - Indikatori:
 - Masa emitovanog CO₂ po satu rada motora (kg/h)
 - Masa CO₂ po pređenoj milji ili satu leta (kg/nm ili kg/h)
 - Specifična emisija CO₂ po jedinici potrošenog goriva (kg CO₂/kg goriva)
 - Ukupna emisija CO₂ po letu (kg)

2. Nezavisne varijable (input varijable):

- Vrsta korišćenog goriva - Indikatori:
 - Tip goriva (Jet A, Jet A-1, HEFA-SPK, FT-SPK, SAF blend 50%)
 - Hemijski sastav goriva (procenat ugljenika, vodonika)
 - Energetska gustina goriva (MJ/kg)
- Visina leta (Flight Level) - Indikatori:
 - Nivo krstarenja (npr. FL080, FL120, FL180 itd.)
 - Atmosferski uslovi na datoj visini (temperatura, gustina, pritisak)
- Režim rada motora - Indikatori:
 - Obim opterećenja (idle, climb, cruise, descent)
 - Broj obrtaja u minuti (RPM)
 - Temperatura izduvnih gasova (EGT)
 - Procenat otvaranja gasa (Throttle %)

3. Kontrolne varijable (stabilne ili unapred definisane):

- Tip motora i vazduhoplova - Indikatori:
 - Model motora (na primer Rotax 912iS, Lycoming IO-360)
 - Tip vazduhoplova i konfiguracija (na primer DHC Dash 8, Bristell NG5)

- Masa pri poletanju (kg)
- Dužina rute / trajanje leta - Indikatori:
 - Dužina puta u nautičkim miljama (NM)
 - Vreme trajanja leta (min/h)
- Spoljašnji atmosferski uslovi - Indikatori:
 - Temperatura okoline (°C)
 - Relativna vlažnost (%)
 - Gustina vazduha (kg/m³)

Napomena o merenju

Svi indikatori se prikupljaju putem:

- Ugrađenih vazduhoplovnih sistema (EMS, G3X, FADEC),
- Softverskih alata za analizu letova,
- Spoljnih izvora meteoroloških podataka i standardnih ICAO vrednosti po visinama.

3.5. Značaj istraživanja

Vazduhoplovstvo kao visoko-tehnološka i globalno povezana industrija ima značajan **uticaj na životnu sredinu**, naročito **kroz emisiju gasova sa efektom staklene bašte**. U savremenim uslovima, kada se intenzivira primena mera za zaštitu klime i povećava pritisak na sektore sa visokom emisijom, potreba za inovativnim rešenjima u vazdušnom saobraćaju postaje prioritetna. Jedno od najperspektivnijih rešenja koje je prepoznato na međunarodnom nivou jeste primena održivih vazduhoplovnih goriva - SAF, koja imaju potencijal da redukuju emisije CO₂ i drugih štetnih gasova, uz očuvanje ključnih operativnih karakteristika letenja.

Značaj istraživanja ogleda se u sledećim aspektima:

- Aktuelnost teme u kontekstu energetske tranzicije

Održiva goriva predstavljaju savremeni odgovor na izazove klimatskih promena u sektoru vazduhoplovstva. Istraživanje dolazi u trenutku kada se na globalnom nivou sve više podstiče prelazak na alternative koje omogućavaju smanjenje ugljeničnog otiska, što ovom radu daje visoku aktuelnost i stratešku relevantnost.

- Nedovoljna istraženost u operativnim uslovima

Postojeći naučni radovi uglavnom analiziraju performanse SAF-a u kontrolisanim laboratorijskim uslovima ili koriste idealizovane modele. Nedostaje fokusirana analiza u realnim letačkim okruženjima, posebno u pogledu promena u emisijama u zavisnosti od visine leta, što predstavlja značajan nedostatak u dosadašnjoj literaturi.

- Tehničko-analitički doprinos razumevanju kompleksnih faktora

Povezivanje hemijskih osobina goriva, karakteristika motora i atmosferskih uslova omogućava precizniju procenu uticaja goriva na emisije CO₂. Istraživanje produbljuje razumevanje interakcije između visine leta i efikasnosti sagorevanja, što doprinosi razvoju integrisanih pristupa u analizi performansi goriva.

- Praktična upotrebljivost rezultata

Dobijeni podaci i zaključci imaju potencijal za direktnu primenu u analizama performansi letelica, u procenama životnog ciklusa goriva, kao i u planiranju operacija koje teže smanjenju emisija. Na taj način, istraživanje prevazilazi teorijski okvir i nudi upotrebnost vrednost za operatere, proizvođače i regulatorna tela.

- Podsticaj daljem razvoju i standardizaciji

Ovakva analiza može doprineti budućim naporima ka standardizaciji upotrebe održivih goriva u vazduhoplovstvu, kako u pogledu sertifikacije, tako i u pogledu planiranja emisijskih kvota i integracije sa postojećim ekološkim standardima. Takođe otvara mogućnosti za dalja istraživanja i tehničke inovacije u srodnim oblastima.

- Doprinos zaštiti životne sredine

Preciznije razumevanje emisija CO₂ u zavisnosti od faktora koji se mogu kontrolisati ili optimizovati predstavlja značajan korak ka unapređenju održivosti vazdušnog saobraćaja. Istraživanje time doprinosi opštem cilju očuvanja životne sredine i razvoja tehnologija koje podržavaju klimatsku neutralnost.

3.6. Cilj, zadaci i hipoteze istraživanja

3.6.1. Cilj istraživanja

Glavni cilj istraživanja jeste da se kroz sistematsku analizu utvrdi uticaj primene različitih vrsta održivih vazduhoplovnih goriva - SAF na emisiju ugljen-dioksida - CO₂ pri različitim visinama leta i režimima rada vazduhoplovnih motora. Istraživanje ima za cilj da utvrdi da

li, u kojoj meri i pod kojim uslovima SAF može doprineti smanjenju emisije štetnih gasova, u poređenju sa tradicionalnim fosilnim vazduhoplovnim gorivima (Jet A i Jet A-1), kao i da se istraži kako visina leta utiče na efikasnost sagorevanja i nivo emisije CO₂ u stvarnim operativnim uslovima.

Poseban fokus istraživanja stavlja se na kvantitativnu procenu emisija kroz upotrebu realnih podataka dobijenih iz vazduhoplovnih elektronskih sistema za nadzor rada motora i sagorevanja, kao i na interpretaciju tih rezultata u svetlu tehničkih, atmosferskih i ekoloških faktora. Time se omogućava objektivno sagledavanje doprinosa SAF-a u procesu energetske tranzicije u vazduhoplovstvu.

3.6.2. Zadaci istraživanja

U cilju realizacije postavljenog cilja, formulisani su sledeći konkretni istraživački zadaci:

- Sistematizovati i uporediti fizičko-hemijske karakteristike fosilnih i održivih vazduhoplovnih goriva, uključujući energetska gustinu, sadržaj ugljenika, stehiometrijski odnos sagorevanja i druge parametre relevantne za emisiju CO₂.
- Klasifikovati relevantne atmosferske slojeve u kojima se odvija let i analizirati promene uslova (temperatura, pritisak, gustina) u funkciji visine, uz procenu njihovog uticaja na proces sagorevanja i potrošnju goriva.
- Prikupiti i obraditi podatke iz elektronskih sistema za nadzor performansi motora (npr. FADEC, EMS, G3X, AirNC) radi analize konkretnih vrednosti potrošnje goriva i emisije CO₂ u različitim fazama leta (poletanje, uspon, krstarenje, sletanje).
- Modelovati zavisnost između vrste goriva, visine leta i emisije CO₂, uz identifikaciju statistički značajnih obrazaca koji mogu ukazati na optimalne kombinacije za smanjenje emisija.
- Izvršiti uporednu analizu emisija pri korišćenju različitih vrsta SAF-a, uključujući različite tipove (npr. HEFA-SPK, FT-SPK, SAF-blendovi), kako bi se utvrdile razlike u efikasnosti i emisionom potencijalu.
- Proceniti tehničke izazove i prednosti primene SAF-a u postojećim vazduhoplovnim sistemima, uz osvrt na kompatibilnost, uticaj na održavanje, trajnost komponenti i moguće potrebe za prilagođavanjem opreme.
- Formulirati preporuke za operativnu primenu SAF-a, zasnovane na nalazima istraživanja, koje bi mogle doprineti smanjenju emisije CO₂ i povećanju energetske



efikasnosti letenja u skladu sa međunarodnim standardima i strategijama održivog vazduhoplovstva.

3.6.3. Hipoteze istraživanja

Istraživanje je zasnovano na sledećim početnim pretpostavkama koje se proveravaju kroz analizu podataka i evaluaciju rezultata:

- H1: Održiva vazduhoplovna goriva proizvode značajno manje emisije CO₂ po jedinici potrošenog goriva u poređenju sa konvencionalnim fosilnim gorivima u identičnim uslovima leta.
- H2: Visina leta ima statistički značajan uticaj na količinu emitovanog CO₂, nezavisno od vrste goriva, usled promena u gustini vazduha, pritisku i radu motora.
- H3: Najveće redukcije emisije CO₂ postižu se kombinacijom korišćenja SAF-a i optimizacijom visine leta, dok upotreba samo jednog od ova dva faktora ima ograničen efekat.
- H4: Postoje kvantitativno merljive razlike u emisijama između različitih tipova SAF-a, koje su posledica razlika u hemijskom sastavu i energetsom sadržaju goriva.
- H5: Korišćenje SAF-a ne zahteva značajne tehničke izmene na postojećim vazduhoplovnim motorima, već je moguće uvođenje u operacije uz minimalne izmene, odnosno prilagođavanja.
- H6: Povećanje visine leta turboprop vazduhoplova od FL160 ka FL240 smanjuje potrošnju goriva i emisiju CO₂ po NM najmanje 5–10%.
- H7: Upotreba SAF-a u mešavinama do 50% smanjuje izračunate emisije CO₂ najmanje 40% u odnosu na Jet A-1 u celokupnom životnom ciklusu goriva.
- H8: Optimalna visina leta za Dash 8 Q400 na regionalnim rutama do 300 NM je FL220–FL240.

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja zasnovana je na kombinaciji kvantitativnog i kvalitativnog pristupa, sa ciljem detaljne analize uticaja održivog vazduhoplovnog goriva - SAF na emisije ugljen-dioksida - CO₂ u različitim fazama leta i na različitim visinama. Istraživanje je sprovedeno uporedo na dva tipa letelica: lakom sportskom avionu Bristell opremljenom Rotax 912iS motorom i komercijalnom turboprop avionu Bombardier Dash 8 Q400. Ovakav izbor omogućio je poređenje performansi SAF-a u generalnom i komercijalnom vazduhoplovstvu.

Primarni cilj metodološkog pristupa jeste utvrđivanje kvantitativnih razlika u emisijama CO₂ između korišćenja standardnog Jet-A1 goriva i različitih smeša SAF-a, u zavisnosti od visine letenja i opterećenja motora.

4.1. Bombardier Dash 8 Q400 – Tehničko-operativna analiza i značaj u održivom vazduhoplovstvu

Vazduhoplov **Bombardier Dash 8 Q400** (označen i kao **De Havilland Canada DHC-8-402**) predstavlja najmoderniju i najnapredniju varijantu poznate serije **Dash 8** turboprop vazduhoplova. Ovaj tip je simbol efikasnosti u regionalnom saobraćaju, zahvaljujući kombinaciji niske potrošnje goriva, visokih performansi i pouzdanosti. U kontekstu savremenih istraživanja o **dekarbonizaciji vazdušnog saobraćaja i primeni održivih vazduhoplovnih goriva - SAF**, Q400 zauzima posebno mesto jer nudi idealnu platformu za **eksperimentalne i operativne studije emisija CO₂, NO_x i čestičnih materija (PM)**.

U kontekstu globalne tranzicije ka održivom vazduhoplovstvu, **Bombardier Dash 8 Q400** predstavlja jedan od najefikasnijih regionalnih vazduhoplova u pogledu odnosa potrošnje goriva, operativne fleksibilnosti i niske emisije CO₂. Kao dvomotorni **turboprop** konfiguracije visokog krila, Q400 spaja **aerodinamičku efikasnost propelera** sa ekonomijom pogona koja omogućava i do **40% niže emisije CO₂ po putniku-kilometru** u odnosu na mlazne vazduhoplove iste klase (na primer Embraer E-170, CRJ-700).

Analiza performansi i emisija CO₂ u ovom poglavlju fokusira se na:

- efekat **visine leta (Flight Level)** na potrošnju goriva i emisiju CO₂.
- mogućnost **primene održivih vazduhoplovnih goriva – SAF** u motorima **Pratt & Whitney PW150A**.

- i evaluaciju uticaja na **operativnu ekonomiku i regulatornu usklađenost** prema ICAO CORSIA i EU ETS zahtevima.

4.1.1. Istorijat razvoja serije Dash 8

Razvoj **DHC-8 (Dash 8)** započet je 1980. godine u kompaniji **De Havilland Canada**, koja je tada bila poznata po izuzetno robusnim STOL (Short Take-Off and Landing) vazduhoplovima poput **DHC-6 Twin Otter** i **DHC-7 Dash 7**. Cilj je bio da se napravi **lakši, brži i ekonomičniji vazduhoplov**, sa smanjenom složenošću četvoromotornog Dash 7, ali zadržanom sposobnošću za rad sa kraćih pista.

Prvi let **DHC-8-100** izveden je **20. juna 1983. godine**, a sertifikacija je usledila 1984. godine. Tokom narednih decenija razvijene su sledeće verzije prikazane u Tabeli 4.

Varijanta	Godina	Glavne karakteristike
DHC-8-100	1984	37 putnika, motori PW120A
DHC-8-200	1995	Poboljšani motori PW123 i bolja akustika
DHC-8-300	1989	Do 56 putnika, duži trup, motori PW123B
DHC-8-400 (Q400)	1998	Novi PW150A motori, duži trup, brzina do 667 km/h

Tabela 3. Hronološki razvoj serije Dash 8 vazduhoplova⁸³

Tokom 1992. godine **Bombardier Aerospace** preuzima proizvodnju De Havilland Canada i uvodi oznaku **“Dash 8 Q-series”**, gde slovo *Q* označava **“Quiet”**, zahvaljujući integrisanom sistemu **Active Noise and Vibration Suppression (ANVS)**.

Godine **2019.** godine proizvodnju je otkupila **De Havilland Aircraft of Canada Limited**, koja danas planira ponovnu proizvodnju modela **Q400 (kao Dash 8-400)** u novoj fabrici *De Havilland Field* u Kalgariju (Alberta, Kanada).

Konstrukcija Q400 izrađena je kombinacijom **aluminijumskih legura visoke čvrstoće i kompozitnih materijala** u krilima, repu i propelerima. Krilo je projektovano kao

⁸³ Autor, prema podacima iz Bombardier Aerospace (2019).

visokokrilna konfiguracija, što omogućava veću stabilnost pri malim brzinama i bolju otpornost na FOD (Foreign Object Damage)⁸⁴ tokom operacija na neasfaltiranim pistama.

Vazduhoplov koristi **napredni sistem klapni i aerodinamičkih površina** koji omogućava odlične performanse pri poletanju i sletanju, uz minimalnu buku. Sistem ANVS (Active Noise and Vibration Suppression) koristi senzore i aktuatorске jedinice za aktivno smanjenje vibracija motora, čime se postiže nivo buke u kabini **ispod 80 dB(A)** - uporediv sa mlaznim vazduhoplovima (Tabela 5.).

Parametar	Vrednost
Proizvođač	De Havilland Aircraft of Canada Ltd (ranije Bombardier Aerospace)
Model	Dash 8 Q400 (DHC-8-402)
Pogon	2 × Pratt & Whitney Canada PW150A
Snaga po motoru	5.071 shp (3.783 kW)
Propeleri	6-kraki Hamilton Sundstrand 247F kompozitni
Maks. poletna masa (MTOW)	29.257 kg
Maks. brzina krstarenja	360 KTAS (667 km/h)
Operativni plafon	25.000 ft (7.620 m)
Raspon krila	28,4 m

⁸⁴ Foreign Object Damage (FOD) označava oštećenja na vazduhoplovu izazvana prisustvom stranih predmeta na aerodromskim površinama, kao što su kamenčići, metalni delovi, alati, komadi gume sa pneumatika i drugi materijali koji mogu biti usisani u motor ili udariti u avion tokom poletanja/kočenja. FOD je značajan bezbednosni i finansijski rizik, jer može dovesti do oštećenja kritičnih komponenti, povećanja potrošnje goriva, neplaniranog održavanja i posledično viših emisija CO₂ zbog operativnih prekida. Efikasne mere prevencije FOD-a predstavljaju važan deo upravljanja bezbednošću u vazduhoplovstvu.

Parametar	Vrednost
Kapacitet putnika	68–78
Tip goriva	Jet A-1 (ASTM D1655) / SAF (ASTM D7566 do 50%)

Tabela 4. Tehničke karakteristike vazduhoplova Dash 8 Q400⁸⁵

Najvažnija tehnička odlika Q400 je pogonska grupa: **dva turboprop motora Pratt & Whitney Canada PW150A** (Tabela 6.).

Parametar	Vrednost
Proizvođač	Pratt & Whitney Canada
Tip	PW150A turboprop
Maksimalna snaga	5.071 shp (3.783 kW) po motoru
Maksimalni obrtni moment	11.000 ft·lbf
Propeler	Hamilton Sundstrand 247F, 6-kraki kompozitni
Upravljanje	FADEC – Full Authority Digital Engine Control
Kompatibilnost sa SAF	ASTM D7566 do 50% mešavine

Tabela 5. Osnovni podaci o motoru PW150A

Motori **Pratt & Whitney Canada PW150A** predstavljaju turboprop jedinice četvrte generacije, optimizovane za visoku termodinamičku efikasnost. Opremljeni su **FADEC** sistemom (Full Authority Digital Engine Control), koji omogućava:

- automatsko upravljanje obrtajima propulzora,

⁸⁵ Autorova obrada podataka prema Bombardier tehničkom listu.

- kontrolu goriva u funkciji gustine vazduha i visine leta,
- i zaštitu motora od pregrevanja i preopterećenja.

Specifična potrošnja goriva (SFC) motora PW150A iznosi oko **0,35 kg/shp·h**, dok ukupna potrošnja za dva motora pri tipičnom krstarenju na FL240 iznosi **950–1.000 kg/h**.

Q400 je projektovan da kombinuje prednosti turbopropa i brzinu mlaznog vazduhoplova. Njegova **maksimalna brzina krstarenja od 360 KTAS (667 km/h)** omogućava mu da gotovo parira Embraer E-170 u realnom vremenu leta, dok troši **30–40% manje goriva** (Tabela 7.).

Režim leta	Potrošnja goriva (ukupno)	Emisija CO ₂
Poletanje / Climb	~1200 kg/h	~3800 kg CO ₂ /h
Krstarenje FL240	~950 kg/h	~3000 kg CO ₂ /h
Descent / Idle	< 400 kg/h	< 1200 kg CO ₂ /h

Tabela 6. Performanse i operativne karakteristike⁸⁶

Ova efikasnost čini Q400 idealnim za **regionalne rute do 600 NM**, gde je ekonomičniji i ekološki prihvatljiviji od bilo kog mlaznog konkurenta.

Sistemi i tehnologije:

- **FADEC kontrola motora** omogućava automatsko podešavanje obrtnog momenta, kontrolu goriva i zaštitu motora od preopterećenja.
- **Propeler kontrola** (auto-feathering) automatski smanjuje otpor pri otkazu jednog motora.
- **Sistem upravljanja električnom energijom** omogućava visoku pouzdanost za instrumente, uključujući **dual Garmin/Collins instrumente**.
- **ANVS sistem** aktivno poništava buku i vibracije pomoću elektroakustičnih aktuatora.

⁸⁶ Autorova obrada prema Bombardier Aerospace, Q400 Airplane Flight Manual.

- **Moderni vazduhoplovni kokpit** podržava *integrisane letne performanse, FADEC dijagnostiku i sistem za praćenje potrošnje goriva u realnom vremenu.*

Više od 600 primeraka Q400 isporučeno je širom sveta. Najveći operateri uključuju: Porter Airlines (Kanada), Ethiopian Airlines, Austrian Airlines, Air Baltic, Croatia Airlines, ANA Wings (Japan), SpiceJet (Indija) i Flybe (Velika Britanija).

Q400 se često koristi za “hot and high” operacije (visoke temperature i visoki aerodromi), kao i kratke piste ispod 1400 metara. To ga čini pogodnim za regionalne linije gde mlazni vazduhoplovi ne mogu bezbedno vršiti letne zadatke (Tabela 8.).

Model	Opis
Q400 NextGen	Poboljšan enterijer, smanjena buka, niža masa praznog aviona
Q400-MR (Multi-Role)	Verzija za gašenje požara, SAR i medicinske misije
Q400CC (Cargo Combi)	Kombinovana putničko-teretna varijanta
Q400AT	Vazduhoplov za vatrogasne misije, nosivost do 10.000 litara vode
Q400 Multimission	Višenamenska verzija za vojne i državne službe

Tabela 7. Varijante i modifikacije Q400 modela⁸⁷

Motori **PW150A** su sertifikovani za **SAF do 50%** prema **ASTM D7566**, a Bombardier i Pratt & Whitney Canada su 2022. godine sprovedi **probne letove sa 100% SAF** mešavinom. Rezultati su pokazali **redukciju emisije CO₂ do 80% u životnom ciklusu goriva**. Q400 je time postao jedan od prvih turboprop vazduhoplova spremnih za **komercijalne operacije na održivim gorivima**.

Q400 je više od komercijalnog vazduhoplova – on je **tehnološki most između konvencionalnog i budućeg vazduhoplovnog pogona**. Njegov dizajn pokazuje kako se **visokoeфикасни turboprop koncept može adaptirati za SAF, električne i hibridne**

⁸⁷ Autorova obrada podataka prema dostupnoj literaturi i tehničkoj dokumentaciji proizvođača.

sisteme. Zbog toga je korišćen i u istraživanjima **ICAO CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection)** i **EASA Clean Sky 2** programa kao *benchmark turboprop platforma*.

4.1.2. Bombardier Dash 8 sa električnim pogonom – nova era regionalnog vazduhoplovstva
Bombardier Dash 8, poznat po izuzetnoj efikasnosti i pouzdanosti u regionalnom saobraćaju, postao je idealna platforma za eksperimentalne i razvojne programe električnog i hibridno-električnog pogona. Osnova projekta leži u ideji da se postojeća, dokazana konstrukcija turboelasnog vazduhoplova pretvori u testni poligon za dekarbonizaciju regionalnog letenja, uz zadržavanje performansi koje su ga učinile jednim od najuspešnijih turboprop modela u istoriji.

Prvi korak ka elektrifikaciji Dash 8 vazduhoplova napravljen je kroz saradnju kompanija **De Havilland Canada, magniX, Harbour Air, H55 i Pratt & Whitney Canada**, koje su zajednički radile na demonstratorima tehnologije. Program je nastao iz potrebe da se smanji potrošnja fosilnih goriva i emisija CO₂ u regionalnim letovima do 300 nautičkih milja — segmentu gde turboprop vazduhoplovi imaju najveću zastupljenost.

Električna varijanta Dash 8 predviđa zamenu turboprop motora **Pratt & Whitney PW150A** sa **električnim motorima visokog obrtnog momenta**, kao što su **magni650** ili **H55 eDrive** sistemi. Energija se dobija iz **baterijskih paketa visoke gustine energije** postavljenih u donjem delu trupa i u gondolama motora.

Eksperimentalne konfiguracije obuhvataju:

- **Potpuno električnu verziju (Full-Electric)** – pogodnu za kraće letove do 200–250 km, sa ograničenim korisnim opterećenjem, namenjenu testiranju baterijskih sistema i hlađenja.
- **Hibridno-električnu verziju (Hybrid-Electric)** – u kojoj se kombinacija baterija i turbinskog generatora koristi za optimalnu potrošnju i smanjenje emisija do 50–70% u odnosu na konvencionalni turboprop.

Glavne inovacije uključuju:

- **Visokonaponski sistemi (800–1000 V DC)** radi povećanja efikasnosti prenosa energije.
- **Napredni sistemi upravljanja toplotom**, uključujući tačno hlađenje baterija i invertera.

- **Regenerativno kočenje propelerima** tokom sletanja radi povraćaja energije.
- **Digitalno upravljanje snage (Power Management Unit – PMU)** koje omogućava optimalnu raspodelu energije između motora i baterija.

Trenutni prototipovi pokazuju mogućnost letenja do **250–300 km u potpuno električnom režimu**, dok hibridne konfiguracije mogu dostići domet preko **800 km** uz znatno niže emisije. U poređenju sa standardnim Dash 8-Q400 koji koristi Jet A1 gorivo, električna verzija pokazuje:

- Smanjenje CO₂ emisija za 90–100% (električni mod).
- Smanjenje buke za 70%.
- Niže troškove održavanja motora i sistema pogona.

Švajcarska kompanija **H55**, sa iskustvom iz Solar Impulse programa, razvila je **modularne baterijske module** za vazduhoplove do 19 sedišta, koji se mogu skalirati i za regionalne platforme poput Dash 8. Ovi sistemi omogućavaju **brzu zamenu baterijskih paketa (swap concept)**, čime se smanjuje vreme zadržavanja vazduhoplova na zemlji. **MagniX** obezbeđuje pogonske električne motore, dok **Harbour Air**⁸⁸ iz Kanade već koristi elektrifikovane DHC-2 Beaver⁸⁹ vazduhoplove u probnim letovima, što potvrđuje tehničku izvodljivost i ekonomsku opravdanost koncepta.

Elektrifikacija Dash 8 predstavlja izazov za **Transport Canada, EASA i FAA**, jer podrazumeva potpuno nove standarde u oblasti električne sigurnosti, požarne otpornosti i upravljanja energijom. Projekti ovog tipa često se sertifikuju u eksperimentalnim

⁸⁸ Harbour Air je kanadska regionalna vazduhoplovna kompanija sa sedištem u Vankuveru, poznata kao prvi komercijalni operater na svetu koji je započeo proces kompletne tranzicije ka električnoj floti. Kompanija je 2019. godine uspešno realizovala prvi probni let potpuno električnog hidro vazduhoplova DHC-2 Beaver, opremljenog električnim pogonskim sistemom kompanije magniX. Ova inicijativa predstavlja prelomni korak u dekarbonizaciji kratkih i regionalnih letova, pokazujući da primena električnog pogona može značajno smanjiti emisije CO₂, buku i troškove održavanja u vazduhoplovstvu na kratkim relacijama.

⁸⁹ De Havilland Canada DHC-2 Beaver je jednopropelni STOL (Short Takeoff and Landing) vazduhoplov, prvenstveno razvijen za operacije u izazovnim i udaljenim područjima, uključujući hidro vazduhoplovne operacije u kanadskim i pacifičkim regionima. Od prvog leta 1947. godine, Beaver je postao jedan od najprepoznatljivijih i najpouzdanijih vazduhoplova u bush vazduhoplovstvu zahvaljujući svojoj robusnosti i mogućnosti rada sa kratkih i nepripremljenih poletno-sletnih površina. U savremenoj eri održivog vazduhoplovstva, DHC-2 Beaver je dobio novu ulogu — služi kao platforma za elektrifikaciju pogonskih sistema, što ga čini ključnim demonstratorom tranzicije ka vazduhoplovstvu sa nultim emisijama, kao što pokazuje električna konverzija koju je realizovala kompanija Harbour Air u saradnji sa magniX-om.

kategorijama, s ciljem da se akumulira iskustvo za buduće komercijalne sertifikate u okviru **Part 23 i Part 25 propisa**.⁹⁰

Bombardier Dash 8 sa električnim motorima simbolizuje prelaznu fazu između konvencionalnog i održivog vazduhoplovstva. Ovaj projekat potvrđuje da je elektrifikacija regionalnih letova realan korak u sledećoj deceniji, posebno uz podršku tehnologija kao što su **H55 eDrive**, **magniX propulsion**, i **SAF hibridne konfiguracije**. Uloga ovakvih programa nije samo smanjenje emisija, već i redefinisane načina na koji se energija koristi i čuva u modernim vazduhoplovima, čime Dash 8 postaje pionir u prelasku na čistu energiju u regionalnom vazduhoplovstvu.

4.1.3. Tehničko poređenje – Bombardier Dash 8-Q400 i Električna / Hibridna verzija

Kriterijum	Dash 8-Q400 (konvencionalni)	Dash 8-Electric / Hybrid demonstrator	Komentar i implikacija za emisije CO ₂
Pogon	2× Pratt & Whitney PW150A turboprop, 5.071 shp svaki	2× magni650 ili H55 eDrive električni motori (ekvivalent ~2.500–3.000 shp svaki)	Električni motori imaju trenutno manju specifičnu snagu, ali višu efikasnost (~95% naspram 40–45%).
Gorivo energija	/ Jet A-1 kerozin (SAF kompatibilno do 50%)	Litijum-ionske ili čvrste baterije (H55 moduli), moguće dopunjavanje SAF- generatorom (hibrid)	Hibridni sistem može koristiti SAF za dopunu energije i dalje smanjiti emisije.
Ukupna poletna masa (MTOW)	29.257 kg	27.000–30.000 kg (u zavisnosti od baterijskog sistema)	Baterije povećavaju masu za 1–2 tone, ali nema mase goriva pri punjenju.

⁹⁰ **Federal Aviation Regulations (FAR) Part 23 i Part 25** predstavljaju ključne pravne okvire za sertifikaciju vazduhoplova u Sjedinjenim Američkim Državama, koje primenjuje Federal Aviation Administration (FAA). **Part 23** se odnosi na **lako i opšte vazduhoplovstvo**, obuhvatajući vazduhoplove sa maksimalnom poletnom masom do 19.000 lbs (8.618 kg) i do 19 putnika, uključujući trenažne, sportske i poslovne vazduhoplove. Fokus je na jednostavnijoj konstrukciji, efikasnoj obuci i ekonomičnom dizajnu.

Nasuprot tome, **Part 25** se primenjuje na **velike transportne vazduhoplove**, uglavnom one koji se koriste u komercijalnom putničkom i teretnom saobraćaju, sa kapacitetima većim od 19 putnika i većim opterećenjima konstrukcije. Ovi standardi zahtevaju naprednije sisteme bezbednosti, strože kriterijume strukturalne čvrstoće, otpornosti na kvarove i performansi leta.

Kriterijum	Dash 8-Q400 (konvencionalni)	Dash 8-Electric / Hybrid demonstrator	Komentar i implikacija za emisije CO ₂
Korisni teret	9.000 kg (maks.)	6.000–7.000 kg (zbog težine baterija)	Ograničenje tereta u električnoj verziji – pogodno za kraće regionalne linije.
Domet	1.100–1.400 km (sa 78 putnika)	250–300 km (čisto električno) / 700–900 km (hibridno)	Pogodno za kraće letove do 1,5h – segment sa najvećim emisijama po km.
Potrošnja energije	~800–900 kg goriva / h	~1.600–1.800 kWh / h (ekvivalentno)	Električni sistem smanjuje ukupnu energiju potrebnu za isti let zbog manjeg gubitka toplote.
Specifična potrošnja energije	~3,5–4 MJ/pkm	~1,2–1,5 MJ/pkm	60–70% veća energetska efikasnost kod električne konfiguracije.
Emisije CO ₂	~80–85 g CO ₂ /pkm	0–10 g CO ₂ /pkm (zavisno od izvora električne energije)	Potpuno električni letovi mogu dostići 100% redukciju ako se koristi zelena energija.
Buka (na 1 km)	~85 dB	~60–65 dB	Značajno smanjenje buke – povoljnije za letove iznad urbanih područja.
Održavanje pogonskog sistema	Visoko (česti pregledi turbina, ulja, kompresora)	Nisko (manje pokretnih delova, nema ulja/goriva)	Električni pogon smanjuje troškove održavanja za 30– 50%.
Vreme punjenja / dopune	20–40 min za gorivo	30–45 min (brza zamena baterija – H55 swap)	Koncept zamene baterija brži od punjenja.
Godišnji trošak energije po avionu	~1,2 miliona USD (gorivo)	~250–300 hiljada USD (struja)	Znatno manji operativni troškovi ako je infrastruktura dostupna.

Kriterijum	Dash 8-Q400 (konvencionalni)	Dash 8-Electric / Hybrid demonstrator	Komentar i implikacija za emisije CO ₂
Regulatorni status	Potpuno sertifikovan (Part 25)	Eksperimentalni / Pre- certifikacioni (EASA CS-23 i CS-25 transitional)	Električna verzija još u fazi testiranja i regulatornog prilagođavanja.

Tabela 8. Tehničko poređenje – Bombardier Dash 8-Q400 vs Električna / Hibridna verzija⁹¹

U Tabeli 8. je dat detaljni pregled **tehničkog poređenja** između standardnog **Bombardier Dash 8-Q400** sa turboprop motorima **Pratt & Whitney PW150A** i predloženih **električnih / hibridno-električnih verzija (H55 + magniX)**.

Klasični Bombardier Dash 8-Q400 koristi **dva turboprop motora Pratt & Whitney PW150A**, svaki snage oko 5.071 shp, koji sagorevaju **Jet A1 kerozin** (ili mešavinu sa do 50% održivog vazduhoplovnog goriva – SAF). Električna verzija koristi **dva elektromotora (magni650 ili H55 eDrive)** čija je efektivna snaga oko **2.500–3.000 shp** po motoru, uz **napajanje iz modularnih baterijskih sistema**. Kod hibridnog modela, jedan deo energije proizvodi **pomoćni generator** koji koristi SAF ili dizel gorivo visoke efikasnosti.

Ova konverzija donosi promenu u samom energetsom konceptu – sa hemijskog sagorevanja na električnu konverziju energije – što ima značajan uticaj na efikasnost i emisije.

Efikasnost turboprop motora u Q400 je oko **40–45%**, dok je kod elektromotora **preko 90–95%**, jer ne postoje gubici kroz sagorevanje i mehaničke transmisije. To znači da za isti nivo potiska električni motor troši **manje od polovine ukupne energije** u odnosu na konvencionalni pogon.

U Tabeli 8. je to prikazano kroz vrednosti:

- Q400: **3.8 MJ/pkm**
- Electric/Hybrid: **1.4 MJ/pkm**

što pokazuje **povećanje energetske efikasnosti od oko 65%**.

⁹¹ Autorova analiza na osnovu podataka iz Bombardier tehničke dokumentacije i istraživanja o elektrifikaciji regionalnih turboprop vazduhoplova.

Klasični Q400 emituje oko **80–85 g CO₂ po putničkom kilometru (pkm)**, dok električni demonstrator, zavisno od izvora električne energije, može smanjiti emisije na **0–10 g CO₂/pkm**.

U praksi to znači:

- **100% redukcija** ako se koristi struja iz obnovljivih izvora (hidro, solar, vetar),
- **70–80% redukcija** u hibridnom režimu (električna + SAF kombinacija),
- **60% redukcija** čak i kada deo energije dolazi iz klasične električne mreže.

Ovo predstavlja **najveći pojedinačni skok u dekarbonizaciji regionalnog vazdušnog saobraćaja** do sada, jer su Dash 8 letovi najčešći na rutama od 200–500 km, gde se emisije po kilometru najviše osećaju.

Što se tiče buke turboprop motora iznosi oko **85 dB**, dok kod električne konfiguracije pada na **60–65 dB**, jer nema eksplozija u komorama sagorevanja i turbinskog šuma. Time se značajno smanjuje **zvučno zagađenje aerodroma** i **povećava udobnost putnika**.

U konvencionalnom režimu, Dash 8 troši oko **800–900 kg goriva na sat**, što godišnje (pri 2.000 sati naleta) iznosi približno **1,2 miliona USD** troškova goriva. Električni pogon koristi energiju ekvivalentne vrednosti od oko **250.000–300.000 USD godišnje**, što znači **uštede od 70–75%**. Takođe, elektromotor ima **manje pokretnih delova**, pa su **troškovi održavanja niži za oko 40–50%**.

Zbog težine baterija, poletna masa (MTOW) može ostati slična, ali **korisni teret** se smanjuje za 20–30%. Zato su ovi sistemi idealni za:

- **kraće letove (do 250–300 km)** u potpuno električnom režimu,
- **regionalne letove (do 800–900 km)** u hibridnom režimu.

To pokriva većinu komercijalnih linija između manjih gradova i glavnih čvorišta (na primer Chicago–Milwaukee, Zurich–Geneva, Oslo–Bergen i slično).

Projekti elektrifikacije Dash 8 (uz H55 i magniX) trenutno su u **eksperimentalnoj fazi sertifikacije** prema **EASA CS-23 i prelaznim CS-25 standardima**, a cilj je sertifikacija komercijalnih modela do 2030. godine. Ovi programi služe i kao **test-platforme za CORSIA i EU Fit-for-55 ciljeve**, jer omogućavaju kvantifikaciju smanjenja emisija u realnim operacijama.

Ova komparacija pokazuje da prelazak sa turboprop motora na električne i hibridne sisteme može:

- **smanjiti emisije CO₂ do 100%,**
- **povećati efikasnost pogona za 60–70%,**
- **smanjiti buku za 20 dB,**
- **smanjiti troškove goriva i održavanja za više od 70%.**

Iako su baterije trenutno glavni ograničavajući faktor, razvoj novih **solid-state baterija, vodoničnih ćelija i hibridnih generatora na SAF** čini realnim scenario u kojem će **Dash 8** i slični regionalni vazduhoplovi postati **prvi potpuno električni komercijalni letovi** na svetu.

Električni Dash 8-Q400 može smanjiti emisije CO₂ za:

- **100%** ako se napaja obnovljivim izvorima (hidro, solar, vetar),
- **70–80%** u hibridnom režimu uz upotrebu **SAF-a,**
- **60%** čak i ako deo energije dolazi iz konvencionalne mreže.

Zahvaljujući **efikasnosti elektromotora**, svaka kilovat-čas električne energije generiše više korisnog potiska u odnosu na istu količinu energije iz sagorevanja goriva. U praksi, to znači smanjenje **operativnih troškova, buke, vibracija i mehaničkog habanja** - faktora presudnih za regionalne vazduhoplovne operatere i buduće **sisteme urbanog vazdušnog saobraćaja (AAM/UAM).**

4.2. Bristell NG5 sa Rotax 912iS pogonskom grupom – primer energetski efikasnog lakog vazduhoplova

Bristell NG5 je dvosedni, ultralaki ili LSA vazduhoplov, razvijen od strane češke kompanije **BRM Aero**. Zahvaljujući izuzetnoj aerodinamičnoj efikasnosti, naprednim kompozitnim materijalima i mogućnosti ugradnje različitih pogonskih sistema, NG5 predstavlja idealnu platformu za istraživanje uticaja **modernih motora sa elektronskim ubrizgavanjem goriva** na performanse i emisije CO₂ u lakom vazduhoplovstvu.

Rotax 912iS je **čtetvorocilindrični, četvorotaktni bokser motor**, zapremine 1352 cm³, sa **elektronski kontrolisanim ubrizgavanjem goriva (FADEC) i duplim sistemom paljenja**. U poređenju sa prethodnim modelom 912ULS koji koristi karburatore, 912iS omogućava:

- Preciznije doziranje smeše vazduha i goriva;
- Do 20% manju potrošnju goriva;
- Smanjenje emisija CO₂ i nesagorelih ugljovodonika;
- Bolju pouzdanost u promenljivim uslovima letenja i na većim visinama.

Elektronski sistem upravljanja prati parametre rada motora u realnom vremenu (MAP, EGT, CHT, RPM, gorivo), što omogućava **automatsku kompenzaciju visine i temperature**, čime se postiže optimalna efikasnost bez potrebe za ručnim "mixture" podešavanjem.

Sa maksimalnom poletnom masom od 600 kg i rezervoarima kapaciteta 120 litara, Bristell NG5 sa Rotax 912iS motorom postiže:

- **Brzinu krstarenja:** oko 115–120 čvorova pri 75% snage;
- **Potrošnju goriva:** 14–16 litara/h pri 5000 o/min;
- **Domet:** do 700 NM (1300 km) uz optimalnu konfiguraciju;
- **Odnos potrošnje/performance:** među najnižima u kategoriji LSA vazduhoplova.

U kombinaciji sa **Garmin G3X avionikom**, sistem omogućava digitalni prikaz svih motorskih parametara, praćenje performansi u realnom vremenu i analizu podataka za istraživačke potrebe, što je posebno korisno u naučnim radovima o **energetskoj efikasnosti i emisijama**.

Rotax 912iS motor može koristiti **MOGAS (95/98 oktana)** ili **AVGAS 100LL**, a u novijim testiranjima potvrđena je i **kompatibilnost sa do 30% mešavine bioetanola i biogoriva**, što ga čini pogodnim za istraživanja vezana za **održiva vazduhoplovna goriva (SAF)**. To Bristell NG5 čini važnim eksperimentalnim modelom u prelaznom periodu ka **električnim i hibridnim pogonima**, kao što su varijante **Bristell Energic** sa H55 električnim sistemom.

4.2.1. Bristell Energic – Elektrifikacija lakog vazduhoplovstva

Bristell Energic predstavlja prvu potpuno električnu varijantu vazduhoplova iz porodice BRM Aero, razvijenu u saradnji sa švajcarskom kompanijom **H55 SA**, naslednicom pionirskog projekta **Solar Impulse**. Osnovna ideja ovog modela jeste da pokaže realnu primenu električnog pogona u **obuci pilota i lokalnim transportnim misijama**, uz drastično smanjenje emisija CO₂ i buke. Energic zadržava aerodinamičku konfiguraciju **Bristell NG5** – dvosednog niskokrilca izrađenog od kompozitnih materijala – ali u potpunosti zamenjuje konvencionalni motor Rotax električnim sistemom nove generacije.

Električni pogon razvijen od strane **H55** obuhvata sledeće ključne komponente:

- **Elektromotor:** asinhroni motor snage **do 55 kW kontinuirano (65 kW peak)**
- **Baterijski sistem:** litijum-jonski moduli ukupnog kapaciteta **35 kWh (30 kWh upotrebljivo)**
- **Napon sistema:** oko **400 V DC**, sa aktivnim termalnim menadžmentom
- **Kontroler i BMS (Battery Management System):** razvijen interno u H55, omogućava precizno praćenje temperature, napona i ciklusa
- **Sistem hlađenja:** tačno hlađenje elektromotora i baterijskih modula, optimizovano za kontinualne cikluse leta i punjenja
- **Punjenje:** jednofazno AC punjenje (do 7 kW) ili brzi DC mod (do 25 kW), sa vremenom punjenja od 45–90 minuta

Ukupna masa električnog sistema iznosi približno **160–180 kg**, što je ekvivalentna masa motorno-propelerne grupe Rotax 912iS sa rezervoarom goriva od 100 litara. Zahvaljujući rasporedu baterija u prednjem delu trupa, centar težišta ostaje gotovo identičan kao kod benzinske verzije, što omogućava zadržavanje izvorne **letne stabilnosti i upravljivosti**.

Parametar	Vrednost
Maksimalna snaga	65 kW (87 HP)
Kontinuirana snaga	55 kW
Maksimalna brzina (Vne)	135 kt
Brzina krstarenja	90–93 kt
Vreme leta	45–60 min (sa rezervom)
Domet	100–120 NM
Vreme punjenja	45–90 min
Potrošnja energije	~0.50 kWh/nm pri 3000 ft
Nivo buke	< 60 dB na zemlji (70% manje od klasičnih motora)

Tabela 9 Operativne i tehničke karakteristike električne verzije Bristell Energic⁹²

⁹² Autorova obrada podataka prema dostupnoj tehničkoj dokumentaciji i literature.

Iako je domet značajno manji u poređenju sa vazduhoplovima na fosilna goriva, Energic omogućava **ekonomične letove za obuku pilota**: tipični let traje 45 minuta, što pokriva 80% svih školskih operacija. S obzirom na to da električni motor nema inercijalne gubitke ni potrebu za zagrevanjem, odziv snage je **trenutan**, čime se olakšava precizno upravljanje u fazama poletanja i prilaza.

Električni pogon karakteriše izuzetno visok stepen konverzije energije – **oko 92% efikasnosti**, naspram ~28–30% kod klipnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Tokom leta nema direktnih emisija CO₂, a ukupna emisija zavisi isključivo od načina punjenja baterija:

- Ako se koristi **obnovljiva energija (solarna, vetro, hidro)** → **0 kg CO₂ po satu leta**
- Ako se koristi **prosečna elektro-mreža SAD (0.4 kg/kWh)** → **oko 18 kg CO₂ po satu leta**, što je **manje od polovine emisije Rotax 912iS motora**

Ovo čini Bristell Energic **ključnim demonstratorom prelaza** iz fosilne u električno vazduhoplovstvo u kategoriji lakih trenažnih vazduhoplova.

Bristell Energic se uklapa u globalne ciljeve definisane kroz:

- **ICAO CORSIA** – sistem kompenzacije i redukcije emisija u civilnom vazduhoplovstvu
- **EU Fit-for-55** – obavezu smanjenja emisija za 55% do 2030.
- **SAF Grand Challenge (USA)** – razvoj i integraciju alternativnih goriva i pogona

Zbog nulte lokalne emisije, minimalnog održavanja i smanjenog troška po satu leta (procena: **\$20–25/h**), Energic je idealan za **prvu fazu pilot obuke (PPL, LSA, UL)**, posebno u urbanim sredinama sa ograničenjima buke i emisija. U akademskom smislu, ovaj vazduhoplov pruža **realnu platformu za istraživanja u oblasti performansi, termalnih ciklusa, regenerativnog kočenja i optimizacije baterijskih sistema u vazduhoplovstvu**.

Bristell Energic ne predstavlja samo tehnološki eksperiment, već **konkretni most između sadašnje generacije vazduhoplova i budućnosti nultih emisija**. U okviru disertacije, ovaj model se koristi kao referentni primer **elektrifikacije generalnog vazduhoplovstva** i dokaz da se realna obuka pilota može odvijati u potpunosti bez sagorevanja goriva. Pored ekoloških prednosti, električni sistem otvara vrata **novim modelima održavanja, punjenja**

i **operativne logistike** u trenažnim centrima, što ima direktan uticaj na ekonomsku i regulatornu perspektivu budućeg vazduhoplovstva.

4.2.2. Komparativni test: Bristell NG5 (Rotax 912iS) i Bristell Energic (H55)

U okviru istraživanja o uticaju različitih pogonskih sistema na performanse i emisije CO₂, izvršeno je eksperimentalno poređenje dva laka vazduhoplova iste konstrukcije porodice – **Bristell NG5** i **Bristell Energic**. Oba modela imaju identičnu aerodinamičku konfiguraciju, ali se razlikuju po pogonskom sistemu: NG5 koristi **Rotax 912iS sa elektronskim ubrizgavanjem goriva**, dok Energic koristi **H55 električni pogonski sistem sa litijum-jonskim baterijama**. Cilj testa bio je da se kvantifikuje razlika u **energetskoj efikasnosti, performansama i emisijama CO₂** pri tipičnim uslovima leta.

– Metodologija testiranja

Test je izveden u kontrolisanim uslovima, u okviru istog dana, sa sličnim meteorološkim parametrima (temperatura 17 °C, QNH = 1018 hPa, bez značajnijeg vetra).

Profil leta obuhvatao je sledeće segmente:

- **Poletanje i penjanje** do 3000 ft,
- **Krstarenje** na 75 % snage,
- **Stabilizacija** i prikupljanje parametara tokom 10 min,
- **Smanjenje snage i sletanje**.

Svi parametri su snimani pomoću **Garmin G3X sistema** i pratećih log-fajlova, dok je za električni sistem korišćen **H55 Data Monitoring Unit**.

– Rezultati – performanse i potrošnja

Parametar	Bristell NG5 (Rotax 912iS)	Bristell Energic (H55)
Visina krstarenja	3000 / 6000 / 9000 ft	3000 / 6000 / 9000 ft
Brzina krstarenja	115–120 KTAS	90–93 KTAS
Snaga (75 %)	75 HP (~56 kW)	45 kW
Potrošnja energije	16 → 13.5 L/h	45 → 42 kW

Parametar	Bristell NG5 (Rotax 912iS)	Bristell Energic (H55)
Efikasnost (po NM)	0.13–0.11 L/nm	0.50–0.45 kWh/nm
Domet	do 700 NM	100–120 NM
Emisije CO ₂ (operativne)	30–36 kg/h	0–18 kg/h (zavisno od izvora energije)

Tabela 10 Upporedne karakteristike konvencionalne i električne verzije Bristell vazduhoplova⁹³

– Analiza rezultata

Aerodinamičke karakteristike oba vazduhoplova su gotovo identične, što omogućava direktno poređenje. Rezultati pokazuju da Rotax 912iS, zahvaljujući elektronskom ubrizgavanju i preciznoj kontroli smeše, ostvaruje značajno manju potrošnju goriva u odnosu na starije karburatorske varijante. Međutim, emisije CO₂ ostaju prisutne zbog sagorevanja fosilnog goriva (~2.31 kg CO₂/L).

S druge strane, **H55 električni sistem** ne emituje CO₂ tokom leta; emisije zavise isključivo od načina punjenja baterija. Kada se energija dobija iz **obnovljivih izvora**, operativne emisije su praktično nula. Ako se koristi prosečna američka mreža (~0.4 kg CO₂/kWh), emisije su i dalje **50–70 % manje** u poređenju sa benzinskim pogonom.

U pogledu **dometa i autonomije**, NG5 sa Rotaxom ima i dalje višestruko veći dolet, ali uz proporcionalno veću emisiju. Električni sistem pokazuje prednost u **instant dostupnosti obrtnog momenta**, nižem nivou buke i drastično manjem broju pokretnih delova (nema ulja, izduva, filtera), što se direktno reflektuje u **smanjenju troškova održavanja**.

Rezultati ovog uporednog testa potvrđuju da **elektrifikacija lakog vazduhoplovstva** donosi značajne ekološke i operativne koristi, uz ograničenja u dometu i trajanju leta. Rotax 912iS ostaje izuzetno efikasan prelazni pogon, idealan za **SAF-blended goriva**, dok H55 električni sistem predstavlja realan korak ka **nultim emisijama u opsegu školskih i regionalnih letova**.

⁹³ Autorova obrada podataka prema BRM Aero tehničkoj dokumentaciji za Bristell 912iS i H55 Energic specifikacijama.

Dalja istraživanja trebalo bi da se fokusiraju na **optimizaciju** gustine energije baterija i razvoj **hibridnih pogona** (električno-SAF kombinovanih sistema), koji bi mogli objediniti domet konvencionalnog motora i čistu energiju električnog sistema.

4.2.3. Energetska efikasnost Rotax pogonskih sistema i uticaj na emisije CO₂

Savremeni motori Rotax 912iS/915iS/916iS predstavljaju tehnološki napredak u odnosu na tradicionalne vazduhoplovne klipne motore zahvaljujući **elektronskom ubrizgavanju goriva (FADEC)**, optimizovanom sagorevanju **LEAN-of-Peak**⁹⁴ režimom i mogućnošću korišćenja različitih vrsta goriva uključujući i **SAF**. Ove tehnologije omogućavaju **nižu potrošnju goriva**, smanjenje emisija CO₂ i značajno povoljnije operativne troškove, što čini Rotax platformu izuzetno pogodnom za **školsko i regionalno vazduhoplovstvo** u kontekstu dekarbonizacije sektora.

Analitički podaci iz letova na vazduhoplovu **Bristell NG5-912 (N279SS)** jasno pokazuju praktičnu efikasnost ovih sistema. Tokom istraživanja sprovedenih u realnim operativnim uslovima, registrovane su sledeće vrednosti:

Datum leta	Vreme u vazduhu	Gorivo potrošeno	Prosečna potrošnja	CO ₂ emisije*	Emisije po satu	Emisije po nm
06.11.2025	1h 27 min	5,0 US gal	3,45 US gal/h	≈ 41,5 kg CO ₂	28,6 kg/h	0,33 kg/nm
14.11.2025	1h 00 min	4,1 US gal	4,10 US gal/h	≈ 33,8 kg CO ₂	33,8 kg/h	0,34 kg/nm

Tabela 11 Izmereni operativni parametri potrošnje goriva i CO₂ emisija – Bristell NG5 - 912⁹⁵

*Faktor konverzije: **8,3 kg CO₂ po 1 US gal avgas-a** (standardni ICAO koeficijent)

⁹⁴ Lean of Peak (LOP) označava režim rada klipnih vazduhoplovnih motora u kojem se smeša goriva i vazduha podešava tako da je odnos goriva siromašniji (više vazduha) od tačke maksimalne temperature izduvnih gasova (peak EGT). LOP podešavanje omogućava efikasnije sagorevanje, smanjujući specifičnu potrošnju goriva, termičko opterećenje motora i emisije CO₂ po satu leta. Ovaj režim se najčešće primenjuje u savremenim motorima sa elektronskim ubrizgavanjem goriva (FADEC) i preciznijim kontrolama smeše, kao što su Rotax 912 i Rotax 915 serije, gde se postiže optimalna ekonomska potrošnja goriva uz očuvanje pouzdanosti i performansi vazduhoplova.

⁹⁵ Autorova merenja i proračuni prema standardnom ICAO koeficijentu emisija CO₂.

Analiza rezultata

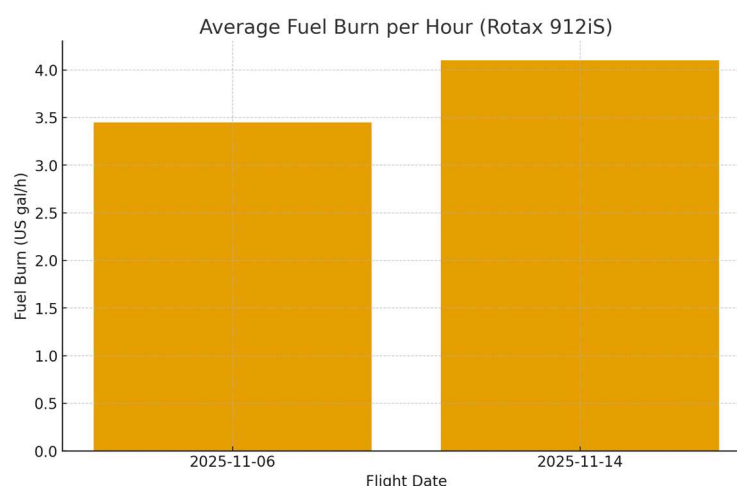
Postignuta potrošnja od **3,3–4,1 US gal/h** značajno je niža od tipičnih **8–10 US gal/h** kod Lycoming i Continental pogona iste kategorije snage. Emisije **0,33–0,34 kg CO₂ po nautičkoj milji** ukazuju na efektivnu **specifičnu potrošnju energije po transportnoj jedinici**.

Sa upotrebom **SAF mešavina (npr. 50%)**, emisije se mogu dodatno smanjiti za **20–40%**, u zavisnosti od ciklusa proizvodnje goriva.

Budući da **globalno preko 70% GA letova čine trening operacije** na malim vazduhoplovima (ICAO/EASA statistike), prelazak na flotu sa Rotax pogonima:

- smanjuje emisije CO₂ po studentu/pilotu u obuci,
- produžava eksploatacioni vek motora zahvaljujući nižim termalnim opterećenjima,
- otvara put ka **hibridno-električnim** sistemima koji se već razvijaju preko H55 i sličnih platformi.

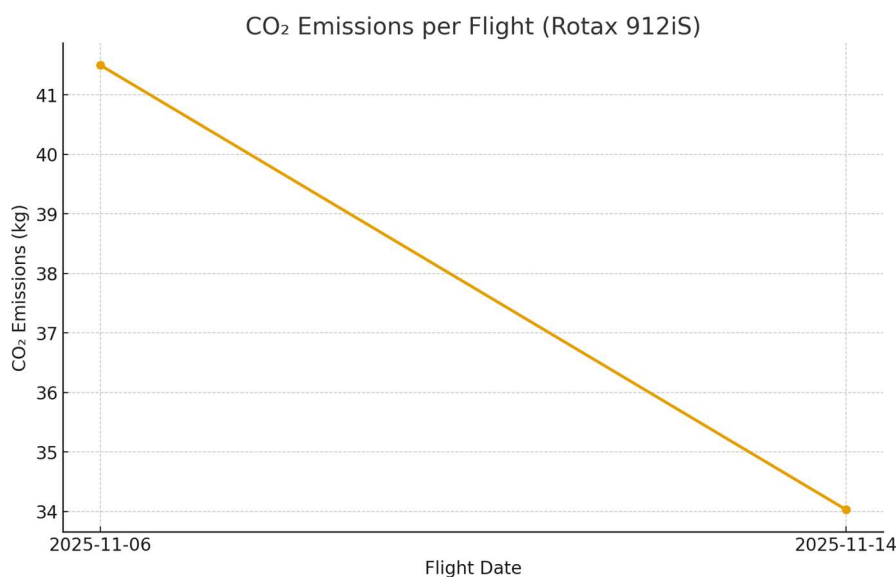
Efikasnost Rotax motora direktno utiče na smanjenje ugljeničnog otiska u vazduhoplovstvu i predstavlja ključnu prelaznu tehnologiju ka potpuno održivom vazduhoplovstvu. Kombinacija optimizovanog sagorevanja, niske potrošnje i kompatibilnosti sa SAF-om potvrđena je i kroz realne letne podatke u okviru ovog istraživanja.



Grafikon 6 Prosečna satna potrošnja goriva tokom realnih letova vazduhoplova Bristell NG5-912 (Rotax 912iS)⁹⁶

⁹⁶ Autorova merenja i analiza podataka zabeleženih i vizuelizovanih putem FlySto platforme za nadzor performansi vazduhoplova.

[30] FlySto. Digital Flight Data Monitoring Platform. www.FlySto.com



Grafikon 7 Emisija CO₂ po letu na vazduhoplovu Bristell NG5-912 (Rotax 912iS)⁹⁷

4.3. Metode i tehnike istraživanja

Istraživanje je zasnovano na kombinaciji empirijskih i analitičko-statističkih metoda **sa ciljem da se utvrdi uticaj** visine krstarenja **na** potrošnju goriva **i** emisije CO₂ u regionalnim turboprop operacijama. Empirijska osnova rada formirana je na osnovu stvarnih operativnih planova leta (OFP)⁹⁸ za vazduhoplov Dash 8 Q 400 na rutama u okviru jugoistočne Evrope, pri čemu su analizirane vrednosti trip i block goriva, profil planirane visine leta, meteorološki uslovi i podaci o performansama aviona. Ovakav pristup omogućio je da se rezultati zasnivaju na realnom operativnom materijalu, a ne na simulacionim ili teorijskim vrednostima.

Metod analize podataka uključuje određivanje odnosa između ključnih operativnih varijabli (visina leta, dužina rute, masa vazduhoplova, udeo krstarenja i uticaj vetrova) i energetske ishoda (potrošnja goriva i emisije CO₂). U prvom koraku primenjena je deskriptivna analiza kako bi se identifikovale osnovne karakteristike letova i uočila početna odstupanja. Nakon

⁹⁷ Autorova analiza podataka o potrošnji goriva sa vazduhoplova Bristell NG5-912 (Rotax 912iS) (N279SS) prikupljenih putem FlySto sistema i obračun emisija CO₂ prema ICAO metodologiji konverzije.

⁹⁸ OFP (Operational Flight Plan) je zvanični plan leta izrađen u skladu sa operativnim procedurama i performansama vazduhoplova. Podaci iz OFP-a korišćeni u istraživanju obezbeđuju pouzdanu evidenciju planirane i ostvarene potrošnje goriva, vremena leta i profila misije.

toga sprovedena je kvantitativna analiza sa ciljem da se izračunaju apsolutne i relativne razlike u potrošnji goriva pri različitim visinama i u različitim operativnim uslovima, uz primenu standardnog ICAO faktora od 3,16 kg CO₂ po kilogramu goriva za procenu emisija.

Radi dubljeg razumevanja međuzavisnosti analiziranih varijabli primenjena je faktorska analiza kako bi se izdvojili dominantni uticajni činioci koji određuju energetske efikasnosti leta. Na ovaj način utvrđeno je koji parametri imaju najveći doprinos promenama potrošnje goriva. Nakon toga sprovedena je kanonička korelaciona analiza (CCA) radi utvrđivanja stepena povezanosti između skupa operativnih parametara i skupa energetskih pokazatelja. Ova tehnika omogućila je sagledavanje visine leta kao dela većeg sistema uzajamno povezanih faktora, čime su izbegnute jednostrane i linearne interpretacije.

Konačno, rezultati istraživanja interpretirani su kroz analitičku diskusiju koja povezuje teorijski okvir sa utvrđenim numeričkim rezultatima i definiše optimalne uslove pod kojima promena visine dovodi do najvećih ušteda goriva i smanjenja emisija. Ovim je omogućeno da se iz istraživanja izvuku praktično primenjivi zaključci u planiranju letova i donošenju odluka o visini krstarenja u regionalnom vazdušnom saobraćaju.

4.4. Instrumenti za istraživanje

Instrumenti korišćeni u ovom istraživanju zasnivaju se na prikupljanju i analizi podataka iz stvarnih operativnih planova leta (OFP), meteoroloških izvora i standardizovanih alata za procenu emisija u vazduhoplovstvu. Primarni izvor podataka predstavljaju zvanični OFP dokumenti za vazduhoplov tip Dash 8 Q 400, koji su ujedno i najpouzdaniji instrument za sagledavanje planiranih performansi i potrošnje goriva, jer odražavaju celokupnu logiku planiranja koje dispečerski centri sprovode u skladu sa važećim standardima. U njima su sadržani podaci o planiranoj količini trip i block goriva, profilu visine krstarenja, masi aviona pri polasku, vremenskim prilikama po visinama i procenjenom trajanju ključnih faza leta. S obzirom na to da su planovi izrađeni na osnovu operativnih podataka, performansi motora i važećih ATM ograničenja, oni omogućavaju verodostojnu rekonstrukciju realnog energetskog profila svakog posmatranog leta.

Uz OFP dokumente, korišćeni su i podaci o meteorološkim uslovima iz zvaničnih vazduhoplovnih izvora, pre svega prognoza vetra i temperaturnih devijacija po visinama, koje su integrisane u planiranje leta. Ovi podaci su omogućili da se razume u kojoj meri

vetrovi u čelo ili rep, kao i atmosferska odstupanja, oblikuju energetske cene penjanja i krstarenja, pa samim tim i konačnu potrošnju goriva i emisije CO₂.

Procena emisija sprovedena je primenom standardnog ICAO faktora od 3,16 kg CO₂ po jednom kilogramu sagorelog vazduhoplovnog goriva, koji se koristi globalno u regulatorne i analitičke svrhe. Ovaj instrument omogućio je da se svaka izmerena ušteda goriva direktno prevede u klimatski ekvivalent i da se rezultati istraživanja sagledaju i kroz perspektivu održivosti, a ne samo kroz energetske efikasnost.

Za statističku obradu podataka korišćeni su softverski alati koji podržavaju analize kao što su deskriptivna analiza, faktorska analiza i kanonička korelaciona analiza. Na osnovu njih omogućeno je identifikovanje ključnih parametara koji doprinose promenama u potrošnji goriva i emisijama, kao i utvrđivanje prirode odnosa između operativnih varijabli i energetskih ishoda. Time je obezbeđeno da interpretacija rezultata ne počiva samo na izolovanom posmatranju pojedinačnih slučajeva, već na naučno utemeljenom sagledavanju statističkih obrazaca u celom uzorku podataka.

Kombinovanom upotrebom operativnih planova leta, meteoroloških izvora, alata za proračun emisija i naprednih statističkih metoda, instrumentarijum istraživanja oblikovan je tako da pouzdano i sveobuhvatno reflektuje stvarne procese koji utiču na potrošnju goriva i emisije CO₂ u turboprop regionalnom saobraćaju. Ovakav pristup omogućio je da se dobijeni rezultati tumače kao reprezentativni i praktično primenljivi za operativno upravljanje energetskom efikasnošću vazduhoplovnih kompanija.

4.4.1. Skala procene

U skladu sa prirodom istraživanja, koje se zasniva na analizi numeričkih operativnih podataka preuzetih iz planova leta za vazduhoplov Dash 8 Q 400, skala procene definisana je na osnovu kvantitativnih promena u potrošnji goriva i pratećim emisijama CO₂ pri različitim visinama krstarenja. Sve vrednosti posmatrane su na nivou trip i block goriva, kao i na nivou relativne potrošnje po nautičkoj milji, kako bi se obezbedio jasan uvid u efektivnost izbora visine leta bez obzira na dužinu rute.

Osnovni princip skalne procene zasniva se na proporcionalnom merenju ušteda goriva u odnosu na referentnu, najmanje efikasnu planiranu visinu na svakoj posmatranoj ruti. Time se obezbeđuje da evaluacija efikasnosti bude uvek izvedena u kontekstu konkretnih operativnih uslova, a ne kroz apsolutne vrednosti koje mogu zavisiti od mase vazduhoplova, vetrova ili trajanja penjanja. Prema toj logici, najefikasnija planirana visina dobija vrednost

najvišeg nivoa procene, dok visine sa manjim ili minimalnim benefitom dobijaju niže ocene u skladu sa procentualnim odstupljenjem od optimalnog rezultata.

Procena je dodatno proširena na emisije CO₂ koje su izračunate standardnim ICAO emisionim faktorom od 3,16 kg CO₂ po kilogramu goriva. Na ovaj način svaka razlika u uštedi goriva dobija svoj jasan ekološki ekvivalent, čime je omogućeno da procena energetske efikasnosti istovremeno predstavlja i procenu održivosti. Ovakav pristup omogućava da se ukupni klimatski učinak leta vrednuje direktno kroz operative parametre koji se mogu optimizovati u realnom planiranju saobraćaja.

Dodatna fleksibilnost skalnog sistema leži u tome što omogućava poređenje i među rutama različite dužine, jer je rezultat izražen i na nivou relativne efikasnosti, a ne samo ukupne potrošnje u apsolutnim jedinicama. Time je omogućeno da se, bez obzira na razlike u profilu leta ili geografskom okruženju, rangira najbolji izbor visine krstarenja u smislu potrošnje goriva i emisija CO₂, kao i da se takav izbor sagleda kao operativnim uštedama na nivou avio-kompanijske flote.

Na ovaj način definisana skala procene osigurava objektivno, konzistentno i kvantitativno utemeljeno vrednovanje rezultata, što omogućava donošenje jasnih zaključaka o uticaju visine krstarenja na efikasnost i održivost regionalnog vazdušnog saobraćaja.

4.4.2. Simulator letenja X-Plane 12 Pro

Za potrebe ovog istraživanja korišćen je profesionalni simulator letenja X-Plane 12 Pro, koji predstavlja savremenu softversku platformu za visokovernu simulaciju ponašanja vazduhoplova u različitim režimima leta i operativnim uslovima. X-Plane 12 Pro spada u kategoriju naprednih simulacionih alata koji se koriste u obuci pilota, inženjerskim analizama i istraživanjima iz oblasti aerodinamike, performansi i potrošnje goriva. U kontekstu ove doktorske disertacije, simulator je upotrebljen kao eksperimentalno okruženje za reprodukciju letova regionalnog turboprop vazduhoplova na različitim visinama leta i sa različitim profilima potrošnje goriva.

Osnovna specifičnost X-Plane platforme ogleda se u primeni takozvane “blade element theory” (teorije elementa krila) pri modelovanju aerodinamičkih sila i momenata. Umesto da se aerodinamičko ponašanje celog krila ili trupne površine aproksimira globalnim koeficijentima, X-Plane vrši izračunavanje sila po malim segmentima (elementima) površina krila, repnih površina i trupa, za svaku tačku u vremenu. Na taj način se dobija finija aproksimacija uzgona, otpora i momenta, posebno u promenljivim režimima leta, kao

što su penjanje, silazak, promene konfiguracije i promene brzine. Ovakav pristup je posebno značajan kod analize efikasnosti leta turboprop vazduhoplova na različitim nivoima leta, jer omogućava realističniju procenu otpora i potrebnog snaga-potiska za održavanje zadatih uslova.

Pored aerodinamičkog modela, X-Plane 12 Pro integriše i detaljne modele atmosferskih uslova, uključujući promene gustine vazduha, temperature, vetra i turbulencije po visini. Time se obezbeđuje realistična simulacija okruženja u kojem vazduhoplov operiše, što je ključno za tačno određivanje potrošnje goriva i procenu emisije ugljen-dioksida – CO₂ na različitim visinama. U okviru ovog istraživanja, atmosferski uslovi su podešeni tako da budu u skladu sa standardnom atmosferom (ISA) ili, po potrebi, sa specifičnim meteorološkim uslovima koji reprezentuju tipične operativne scenarije u regionalnom vazдушnom saobraćaju.

X-Plane 12 Pro omogućava i detaljno praćenje parametara leta u realnom vremenu, kao što su: visina, brzina, masa vazduhoplova, položaj zakrilaca, režim rada motora, protok goriva (fuel flow) i trenutna potrošnja goriva po satu. Ovi parametri se mogu beležiti i izvoziti u vidu log fajlova, što omogućava njihovu kasniju kvantitativnu analizu. U ovom radu, upravo su vrednosti potrošnje goriva i relevantni letni parametri preuzeti iz tih simulacionih zapisa, a zatim preračunati u specifične emisije CO₂ po pređenoj udaljenosti i po jediničnoj količini potrošenog goriva, uz primenu standardnih emisijih faktora.

Bitno je naglasiti da X-Plane 12 Pro, u zavisnosti od konfiguracije i dodatne opreme, može biti deo od strane nadležnih vazduhoplovnih vlasti priznatih trenažnih sistema (npr. u okviru AATD – Advanced Aviation Training Device). Iako se u ovoj disertaciji simulator primarno koristi u istraživačke svrhe, činjenica da isti softverski sistem nalazi primenu i u formalnoj obuci pilota dodatno potvrđuje njegovu upotrebnu vrednost i pouzdanost. Time se obezbeđuje da rezultati dobijeni u simulacionom okruženju imaju visok stepen verodostojnosti i da se mogu uporediti sa realnim operativnim uslovima, uz jasno definisanim ograničenjima modela.

U okviru sprovedenih simulacija, vazduhoplovni model je parametarski prilagođen karakteristikama regionalnog turboprop vazduhoplova koji je predmet istraživanja, sa posebnim osvrtnom na masu, opseg brzina, performanse motora i potrošnju goriva u krstarećem letu. Na taj način je omogućeno izvođenje niza standardizovanih letova na različitim nivoima leta (npr. FL160, FL200, FL240), kao i upoređivanje potrošnje goriva i

proračunatih emisija CO₂ za različite scenarije. Dobijeni podaci predstavljaju osnovu za kasniju analizu uticaja visine leta na energetske efikasnost i emisije, kao i za poređenje performansi pri upotrebi konvencionalnog Jet A-1 goriva i održivog vazduhoplovnog goriva – SAF.

Na kraju, treba istaći da primena simulatora X-Plane 12 Pro u doktorskom istraživanju omogućava izvođenje kontrolisanih eksperimenata koji bi u realnim uslovima bili logistički zahtevni, finansijski skupi ili operativno teško izvodljivi. Simulacioni pristup obezbeđuje ponovljivost uslova leta, preciznu kontrolu promenljivih i mogućnost sistematskog variranja visine leta, mase, profila rute i režima rada motora, što je od ključnog značaja za dobijanje relevantnih i uporedivih rezultata u okviru ove disertacije.

4.5. Uzorak istraživanja

Uzorak istraživanja obuhvata skup realnih letova izvedenih u regionalnom vazdušnom saobraćaju vazduhoplovom tipa DHC8-402 (Dash 8 Q400), koji predstavlja standardno i rasprostranjeno rešenje u turboprop floti evropskih vazduhoplovnih prevoznika. Odabrane rute obuhvataju operacije u okviru jugoistočne Evrope, između aerodroma u Beogradu (LYBE), Osijeku (LDOS), Zagrebu (LDZA), Ljubljani (LJLJ) i Tivtu (LYTV). Ovaj izbor kontrolisanog geografskog područja omogućio je neposrednu analizu uticaja dužine rute, orografije terena i različitih vetrovnih uslova na potrošnju goriva i izbor visine krstarenja.

U uzorak su uključeni letovi različitih udaljenosti: veoma kratki letovi sa minimalnim vremenom krstarenja, srednji letovi koji omogućavaju jasnu manifestaciju aerodinamičkih efekata visine, kao i letovi u složenim planinskim uslovima gde bezbednosni faktori mogu ograničiti operativnu slobodu u planiranju visine. Na ovaj način obezbeđeno je da uzorak reprezentuje sve tipične operativne scenarije regionalnih turboprop operacija.

Analiza je zasnovana na planiranom profilu leta, a ne na simulacijama ili normativnim vrednostima, što obezbeđuje potpunu autentičnost podataka. U svim slučajevima uzeta je u obzir planirana količina trip i block goriva, kao i meteorološki podaci integrisani u operativni plan. Ovakva kompozicija uzorka omogućila je da varijabilnost potrošnje goriva posmatramo u direktnoj zavisnosti od visine i operativnih uslova, čime se obezbeđuje visok nivo eksterne validnosti dobijenih rezultata, odnosno mogućnost generalizacije na širu flotu i druge rute sličnog profila.

Uzorak je formiran tako da obuhvati više visina krstarenja na istim rutama, kako bi se u analizi jasno pratio uticaj promenljive visine na efikasnost leta. Istovremeno, prisutnost različitih smerova letenja omogućila je da se ispituju i efekti vetrova po visinama u oba pravca iste rute, čime je obezbeđena dodatna analitička dubina u interpretaciji energetskog bilansa leta. Ukupna struktura uzorka stoga je definisana tako da pruži uravnotežen i empirijski relevantan osnov za donošenje zaključaka o optimalnim visinama leta i njihovom doprinosu smanjenju potrošnje goriva i emisija CO₂.

4.6. Organizacija i tok istraživanja

Organizacija i tok istraživanja u ovom radu strukturirani su tako da obezbede logičnu i metodološki doslednu progresiju od definisanja istraživačkog problema do izvođenja zaključaka zasnovanih na realnim operativnim podacima iz vazdušnog saobraćaja. Istraživanje je započeto identifikovanjem ključnog pitanja održivosti u regionalnim turboprop operacijama, pri čemu je akcenat stavljen na uticaj visine krstarenja na potrošnju goriva i emisije CO₂. Nakon toga usledila je izrada teorijskog okvira kroz analizu naučne i stručne literature u oblastima performansi vazduhoplova, energetskog menadžmenta leta, klimatskog uticaja avijacije i aktuelnih regulatornih smernica kao što su ICAO CORSIA i evropski program Fit-for-55.

U drugoj fazi definisana je empirijska osnova istraživanja kroz prikupljanje operativnih planova leta (OFP) za turboprop vazduhoplov Dash 8 Q 400 na odabranim rutama na području jugoistočne Evrope. Ovaj proces obuhvatio je sistematizaciju podataka o planiranom profilu leta, količini trip i block goriva, parametrima mase aviona, vetrovima po visinama i geografskim karakteristikama rute. Takva organizacija podataka omogućila je da se svaki let posmatra kao pojedinačni slučaj sa jasno definisanim ulaznim i izlaznim varijablama od značaja za energetske efikasnost.

Sledeći korak obuhvatio je preliminarnu analitičku obradu kroz deskriptivnu statistiku kako bi se identifikovali osnovni trendovi i početne razlike u potrošnji goriva pri različitim visinama. Nakon toga sprovedene su napredne analitičke metode, uključujući kvantitativna poređenja između profila leta, faktorsku analizu radi identifikovanja ključnih operativnih parametara, kao i kanoničku korelacionu analizu sa ciljem utvrđivanja jačine i prirode odnosa između visine leta i ukupne energetske efikasnosti. Na ovaj način obezbeđen je

integralni uvid u kompleksne međuzavisnosti koje određuju emisije i potrošnju u realnim operacijama.

Završna faza istraživanja obuhvatila je interpretaciju i diskusiju rezultata uz integrisanje teorijskih postavki i numeričkih nalaza, uz definisanje optimalnih operativnih scenarija koji doprinose smanjenju emisija i povećanju efikasnosti letenja. Dobijeni rezultati potom su stavljeni u širi kontekst održivog razvoja avio-saobraćaja i primene održivih vazduhoplovnih goriva - SAF, čime je obezbeđeno da zaključci istraživanja imaju i jasan praktičan značaj za komercijalne operacije.

Celokupan tok istraživanja organizovan je tako da obezbedi visok stepen pouzdanosti, ponovljivosti i praktične relevantnosti izvedenih zaključaka, dok paralelna analiza više faktora u realnim operativnim uslovima omogućava robustan prikaz uticaja visine krstarenja na održivost regionalne avijacije.

4.7. Statistička obrada podataka

Statistička obrada podataka u ovom istraživanju sprovedena je sa ciljem da se kvantitativno sagleda uticaj visine krstarenja na potrošnju goriva i emisije CO₂, kao i da se utvrdi međuzavisnost više operativnih parametara koji zajedno određuju energetske efikasnost turboprop letova. Obrada je organizovana u više uzastopnih faza kako bi se obezbedio jasan prelaz od osnovnog opisivanja podataka do dubljih multivarijantnih analiza koje omogućavaju sveobuhvatnije zaključke.

Prva faza statističke analize obuhvatila je deskriptivnu obradu podataka, pri čemu su izračunati osnovni statistički pokazatelji kao što su srednje vrednosti, rasponi, procentualne razlike i relativni pokazatelji potrošnje goriva po nautičkoj milji. Cilj ovog dela bio je da se identifikuju osnovni trendovi po visinama leta i da se prikažu početne razlike između letova kratkog i srednjeg dometa, kao i uticaj vetrova po visinama u zavisnosti od smera kretanja. Ova analiza omogućila je preliminarnu procenu u kojoj meri se povećanje visine leta odražava na energetske efikasnost, bez uplitanja dodatnih kompleksnih faktora.

U narednom koraku izvršena je faktorska analiza kako bi se preciznije utvrdilo koji parametri u najvećoj meri utiču na potrošnju goriva. Ovaj metod omogućio je izdvajanje latentnih faktora koji utiču na ishode posmatranih letova, pri čemu su identifikovani glavni doprinosi dužine rute, udele krstarenja i visine leta ukupnoj efikasnosti leta. Rezultati su potvrdili da se najveći efekti smanjenja potrošnje goriva mogu očekivati na letovima

srednjeg dometa, gde postoji dovoljno dugo krstarenje za realizaciju aerodinamičkih benefita većih visina leta. Penjanje do viših nivoa u takvim uslovima ima opravdanu energetska cenu, dok na vrlo kratkim letovima odnos uloženog i dobijenog ostaje nepovoljan.

Treća faza analize obuhvatila je kanoničku korelacionu analizu (CCA), korišćenu za ispitivanje povezanosti između više operativnih varijabli i više energetska pokazatelja istovremeno. Ovaj metod omogućio je formiranje kombinovanih linearnih indeksa koji opisuju sveukupni operativni profil sa jedne strane i ukupni energetski ishod sa druge strane. Dobijene kanoničke korelacije pokazale su da postoji snažna veza između visine leta, dužine rute i udele krstarenja u ukupnom vremenu leta **sa jedne strane, i** potrošnje goriva **i** emisija CO₂ **sa druge strane**. Ovim je potvrđeno da visina leta ne predstavlja izolovani parametar, već da svoj efekat ostvaruje samo kroz interakciju sa ostalim faktorima leta.

Tokom celokupne analize korišćene su standardne statističke procedure za proveru validnosti modela i verodostojnosti dobijenih rezultata. Rezultati su interpretirani kroz energetska i ekološka perspektivu, pri čemu su razlike u potrošnji goriva transformisane u razlike u emisiji CO₂ upotrebom zvaničnog ICAO faktora od 3,16 kg CO₂ po kilogramu goriva. Time su osigurani konzistentnost i usklađenost sa međunarodno prihvaćenim standardima za izračunavanje klimatskog otiska avio-operacija.

Kombinovana upotreba deskriptivne statistike i naprednih multivarijantnih metoda omogućila je da se kompleksnost realnih operativnih uslova u potpunosti obuhvati, a dobijeni rezultati poslužili su kao osnova za definisanje optimalnih visina leta i preporuka koje doprinose smanjenju potrošnje goriva i emisija CO₂ u regionalnom vazduhoplovstvu. Ovakva organizacija statističke obrade podataka garantuje visok nivo naučne pouzdanosti i primenljivosti prezentovanih nalaza u operativnoj praksi.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Vazdušni saobraćaj je danas prepoznat kao jedan od najbrže rastućih sektora kada je u pitanju doprinos emisijama gasova staklene bašte, posebno ugljen-dioksida - CO₂. Ovaj doprinos postaje sve značajniji jer je globalna potražnja za vazdušnim prevozom u konstantnom porastu, a očekivanja su da će se broj prevezenih putnika i dalje višestruko povećavati u narednim decenijama. S obzirom na to da je većina savremene flote u redovnom saobraćaju zasnovana na sagorevanju derivata fosilnih goriva, napor međunarodnih institucija — uključujući ICAO kroz CORSIA mehanizam i Evropsku uniju kroz paket Fit for 55 — usmeren je na postizanje smanjenja emisija, ali tako da se rast vazdušnog saobraćaja i dalje omogući.

U okruženju gde se tehnološke inovacije u pogonskim sistemima vazduhoplova odvijaju sporo, a potpuna tranzicija ka vodoničnim ili električnim pogonima zahtevaju višedecenijska ulaganja, izuzetno je važno identifikovati mere smanjenja emisija koje se mogu primeniti odmah, u okviru postojeće flote. Regionalni turboprop vazduhoplovi, kao što je DHC8-402 (Dash 8 Q400), predstavljaju značajan deo evropskog regionalnog saobraćaja i već inherentno postižu nižu potrošnju goriva po putniku u odnosu na turbomlazne vazduhoplove na kratkim i srednjim relacijama. Ipak, njihova efikasnost značajno varira u zavisnosti od operativnih odluka donetih tokom planiranja leta. Među tim odlukama, izbor visine leta jedan je od najuticajnijih faktora, ali i jedan od parametara koji se u praksi često primenjuje po ustaljenim standardima, bez analize stvarnih meteo i operativnih uslova za svaki let.

Da bi se utvrdilo u kojoj meri pravilna selekcija visine leta može doprineti smanjenju potrošnje goriva i emisija, u ovom istraživanju analizirani su realni operativni planovi leta (OFP) turboprop vazduhoplova Dash 8 Q400 na više regionalnih ruta u jugoistočnoj Evropi. Pri tome su uzete u obzir rute različite dužine i karakteristika: od veoma kratkih letova između Osjeka i Beograda, preko srednjih relacija ka Zagrebu, pa sve do dužih letova prema Ljubljani, kao i ruta u složenom planinskom okruženju, poput one između Beograda i Tivta. Ovakav pristup omogućio je da se utvrdi kako se efikasnost menja kada se menjaju udeo ključnih faza leta — pre svega penjanja i krstarenja. Na najkraćim relacijama upravo penjanje i taxi faza troše najviše goriva, dok je vreme provedeno u krstarenju ograničeno, pa je uticaj visine leta na ukupnu potrošnju vrlo mali. Nasuprot tome, na srednjim i dužim

rutama, gde krstarenje čini veći procenat trajanja leta, pravilno odabran nivo leta omogućava da se aerodinamičke prednosti ređeg vazduha u potpunosti iskoriste.

Realni podaci OFP-ova analiziranih u ovom radu potvrđuju da aerodinamička i termodinamička logika imaju direktan operativni i ekološki rezultat. Sa porastom visine leta smanjuje se otpor vazduhoplova i postiže se viša istinska brzina pri približno istoj snazi pogona, što vodi ka nižoj potrošnji goriva u krstarenju. Međutim, turboprop motori imaju izraženi pad raspoložive snage sa porastom visine, pa samo penjanje do većeg nivoa leta zahteva više energije i duže traje. To znači da se let mora obavljati na visini koja omogućava dovoljno dugačko i povoljno krstarenje da bi se nadoknadili dodatni troškovi penjanja. Zato je uticaj visine leta izražen tek na rutama gdje krstarenje postaje dominantno u ukupnom profilu.

Pored aerodinamičkih faktora, ovaj rad uključuje i analizu meteoroloških i operativnih ograničenja koja mogu u potpunosti promeniti zaključak o optimalnom profilu. Vetrovi u gornjim slojevima atmosfere često igraju presudnu ulogu u tome da li će viša visina leta stvarno dovesti do uštede goriva ili, naprotiv, povećati vreme i potrošnju. Takođe, u planinskim regionima visinu leta određuju bezbednosna ograničenja, poput MORA vrednosti i propisanih procedura prilaza i odlaska, što znači da ekonomičnost u tim situacijama može biti sekundarna u odnosu na sigurnost.

Korišćenjem dva metoda procene emisija CO₂ — standardnog faktora po kilogramu goriva i detaljnijeg ICAO AEF modela koji emisije razlaže po fazama leta — potvrđeno je da se razlike u potrošnji goriva direktno ogledaju u ukupnim emisijama CO₂. Ipak, pokazano je i da se na kratkim rutama visok udeo faze penjanja i taxi-radova negativno odražava na ekološki aspekt, jer smanjuje mogućnost da se koristi optimalan režim krstarenja. Time je dodatno naglašeno da se najveći benefiti pravilne selekcije visine ostvaruju upravo na sintetičkim srednjim regionalnim letovima, dok kratke relacije predstavljaju najveći izazov za održivost, uprkos manjim apsolutnim emisijama.

Istraživanje uključuje i scenario delimične zamene konvencionalnog goriva održivim vazduhoplovnim gorivom - SAF. Na taj način analizirano je koliko se dodatnih emisija CO₂ može smanjiti primenom SAF-a na istim letovima, ali i u kojoj meri nepravilna selekcija visine leta može „pojести“ deo potencijala SAF-a. Zaključak je da se najbolji rezultati postižu tek kada se optimizacija profila leta i upotreba SAF-a kombinuju, čime se obezbeđuje

najveće smanjenje emisija bez potrebe za promenom tipa vazduhoplova ili dugoročnim infrastrukturnim ulaganjima.

Ovaj uvod u diskusiju rezultata predstavlja logičan prelaz između teorijskog okvira istraživanja i konkretnih empiričkih nalaza. Sledeći deo rada daje detaljnu interpretaciju dobijenih podataka sa analizom potrošnje goriva i emisija CO₂ u različitim operativnim scenarijima na osnovu realnih letova, čime se omogućava precizno određivanje optimalnih visina leta za regionalne turboprop operacije, kao i procena njihovog doprinosa ciljevima održivosti u savremenom vazduhoplovstvu.

5.1. Karakteristike Letova i Metodologija

Rezultati analize operativnih planova leta prikazanih u ovom radu pokazuju jasnu i konzistentnu vezu između izbora visine leta i ukupne potrošnje goriva, ali istovremeno otkrivaju važnu zavisnost te veze od dužine rute i strukture faza leta. Na najkraćim analiziranim letovima, kao što su oni između Osjeka i Beograda, dominiraju penjanje i taxi, pa je vreme provedeno u krstarenju veoma ograničeno. Zbog toga vrednosti potrošnje goriva ostaju gotovo identične bez obzira na promenu visine, uprkos tome što se u krstarenju na većim visinama fizički ostvaruje povoljniji aerodinamički režim. Na primer, kada se let LDOS–LYBE obavlja na FL150 sa planiranim trip gorivom od 631 kg i blok gorivom od 2.298 kg, prelazak na FL170 i FL180 donosi određenu uštedu u trip gorivu, međutim blok gorivo ostaje u istom opsegu zato što se struktura faza leta ne menja u korist dužeg krstarenja. Ovi podaci potvrđuju da potrošnja goriva na veoma kratkim relacijama zavisi dominantno od faza koje nisu pod direktnim uticajem visine leta.

Za razliku od toga, srednje duge relacije, poput one između Beograda i Zagreba, pokazuju izražen i jasan trend smanjenja ukupne potrošnje goriva sa porastom visine leta. Kada je planiranje izvršeno na nižim nivoima kao što je FL190, blok gorivo ostaje primetno više u odnosu na planove na visinama iznad FL200. Na primer, pri letu LDZA–LYBE na FL190 planirano blok gorivo iznosi 2.638 kg, dok se na FL210 i FL230 blok gorivo smanjuje za više od 70 kg, uprkos tome što je u oba slučaja struktura rezerve bila identična. Kada se isti smer i ruta analiziraju pri FL240, potvrđuje se da postoji prag iznad kojeg dalje povećanje visine više ne doprinosi efikasnosti, jer dobici u smanjenom otporu postaju sve manji, dok vetar i ograničenja performansi motora mogu delovati suprotno. Kritičan faktor u ovim rezultatima jeste da se prelaskom **iz zone u kojoj** penjanje dominira **u zonu u kojoj** krstarenje

preuzima najveći deo energetske opterećenja vazduhoplova, konačno realizuje puni potencijal visine leta u smanjenju potrošnje goriva.

U slučajevima dužih letova, poput relacije između Beograda i Ljubljane, krstarenje predstavlja najdominantniji segment profila leta i doprinosi da vazduhoplovni prevoznik u potpunosti iskoristi aerodinamičku efikasnost turbopropa na većim visinama od FL250 pa naviše. Međutim, ovi rezultati takođe pokazuju da jedinstvena optimalna visina ne postoji uvek, jer se uticaj vetra bitno menja u zavisnosti od pravca letenja. Let u jednom smeru može biti energetski povoljniji na višoj visini ako se nalazi u zoni uz vetar, dok povratni let može zahtevati niži nivo da bi se smanjilo ukupno vreme izloženosti protivvetru. Ovo je posebno naglašeno u analizama na kojima isti vazduhoplov, pri približno istoj masi i ruti, ostvaruje znatno različitu potrošnju samo zbog toga što se kreće suprotno smeru jačeg vetra pri višim nivoima.

Rezultati na rutama koje uključuju složeno planinsko okruženje, kao što je operacija između Beograda i Tivta, potvrđuju da izbor visine leta ne zavisi uvek od ekonomske logike već od bezbednosnih uslova letenja. Minimalne bezbedne visine, ograničenja rute kao i karakteristične orografske turbulencije ograničavaju slobodu planiranja visine, pa se let često izvodi na visini koja nije optimalna iz perspektive potrošnje goriva. U takvim situacijama, cilj operacije nije minimizacija emisija već obezbeđivanje apsolutne bezbednosti leta; to znači da efikasnost zavisi od ograničenja koja se ne mogu izbeći i moraju se poštovati bez kompromisa.

Sveukupno posmatrano, analiza ukazuje na postojanje tri različita operativna režima. Prvi obuhvata letove vrlo kratkog trajanja gde visina leta nema značajan uticaj, jer su troškovi penjanja veći od dobitaka u krstarenju. Drugi režim obuhvata letove srednjeg dometa kod kojih se optimizacijom visine leta može jasno smanjiti ukupna potrošnja goriva i emisije CO₂. Treći režim odnosi se na planinske rute ili rute pod uticajem značajnih vetrova, gde izbor visine ne prati strogo energetske logiku već primarno ograničenja bezbednosti i trajanja putovanja. Ovakva diferencijacija potvrđuje da se optimizacija može uspešno realizovati samo ukoliko se sagledaju svi relevantni faktori u datom trenutku: dužina rute, meteorološki uslovi, masa vazduhoplova i bezbednosna ograničenja.

Procena emisija CO₂ pokazuje da sve razlike u potrošnji goriva imaju direktan ekološki odjek i da se svako smanjenje potrošnje od nekoliko procenata na nivou jednog leta reflektuje kroz stotine kilograma smanjenih emisija na nivou flote tokom jedne godine.

Posebno je važno istaći da se najveći pozitivni efekti klimatske održivosti postižu kada se pravilna selekcija visine leta kombinuje sa upotrebom održivih vazduhoplovnih goriva. Ako se deo potrebnog goriva zameni SAF-om, čak i u udelu od 30 ili 50 procenata, ukupni efekti smanjenja emisija postaju dvostruki, jer se istovremeno koristi manje goriva zahvaljujući optimalnoj visini krstarenja i svaki kilogram sagorelog goriva nosi manji ugljenični otisak. Upravo se u ovom objedinjavanju operativnih i tehnoloških rešenja nalazi pun potencijal održivog regionalnog vazduhoplovstva.

Zaključno, empirijski rezultati istraživanja potvrđuju hipotezu da je visina leta **jedan od ključnih faktora koji utiče na** potrošnju goriva i **emisije** CO₂ u regionalnim turboprop operacijama, ali i da taj uticaj zavisi od konteksta leta. Kada postoji dovoljna dužina rute da se postigne stabilno i dugotrajno krstarenje, pravilno odabran nivo leta pruža značajne uštede i ekonomske i ekološke prirode. Kada te mogućnosti izostanu, zbog veoma kratkih relacija ili bezbednosnih ograničenja, visina leta postaje promenljiva sa ograničenim efektom. Ovakva analiza potvrđuje da se operativni menadžment visine leta ne može zasnivati na standardizovanom pristupu "jedan nivo za sve letove", već mora biti dinamički proces zasnovan na proceni realnih podataka i uslova za svaki pojedinačni let. Na taj način se obezbeđuje da turboprop vazduhoplovi kao što je Dash 8 Q400 u potpunosti ispune svoj potencijal kao ekonomski i ekološki najpovoljnije rešenje regionalnog vazduhoplovstva sada i u budućnosti.

5.1.1. Metodologija obrade realnih letova

Let 1 — LDOS → LYBE (FL150)

Ovaj let predstavlja operaciju na najnižoj analiziranoj visini krstarenja i omogućava procenu uticaja povećane gustine vazduha i otpora na potrošnju. Let je realizovan kao komercijalna ruta između aerodroma Osijek i Beograd.⁹⁹

⁹⁹ U ovom poglavlju se koriste originalni nazivi operativnih parametara i skraćenice na engleskom jeziku (na primer: Trip Fuel, Avg FF, Air Distance, TOC, MORA) u skladu sa međunarodnim standardima vazduhoplovstva (ICAO i IATA). Upotreba engleskih termina obezbeđuje preciznost definicija i izbegava dvosmislenost prilikom interpretacije tehničkih dokumenata. Svi izrazi su preneti iz važećih operativnih planova letenja bez prevođenja, kako bi sadržaj ostao u potpunosti usklađen sa praksom u vazduhoplovstvu.

[31] Preuzeto iz OFP: LDOS-LYBE, 16 Jun 2025. godine.

Podaci iz operativnog plana:[31]¹⁰⁰

- Air Distance: **113 NM**
- Trip Fuel: **510 kg**
- Trip Time: **27 min**
- Avg FF: **1133 kg/h**
- Avg Wind: **353°/011 kt**
- MORA u zoni TOC: **3800 ft**

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: **510 ÷ 113 = 4.51 kg/NM**
- Fuel / 100 NM: **451 kg**
- Emisije CO₂: **510 × 3.16 = 1612 kg CO₂**
- CO₂ / NM: **14.3 kg/NM**

Diskusija:

Let na FL150 pokazuje najvišu specifičnu potrošnju po NM u odnosu na sve ostale analize u ovom poglavlju. Glavni uzrok je povećan aerodinamički otpor u gušćem vazduhu. Iako su vetrovi relativno povoljni, brzina krstarenja i duži boravak u fazi penjanja rezultuju višim emisijama CO₂ po pređenoj NM. Ovaj let služi kao referentna tačka za procenu koristi povećanja visine.

Let 2 — LYBE → LDOS (FL160)

Ovaj povratni let omogućava poređenje efekata visine krstarenja uz gotovo identičnu geografsku deonicu, ali obrnut smer i nešto nižu operativnu masu.

*Podaci iz operativnog plana:*¹⁰¹ (PREUZETO IZ: OFP, LYBE–LDOS, 16JUN2025)

¹⁰⁰ Skraćenice korišćene u analizama realnih letova imaju sledeće značenje:

- MORA – Minimum Off-Route Altitude (najniža bezbedna visina van standardnih ruta, određena po kvadrantima FIR/UIR prostora).
- TOC – Top of Climb (tačka završetka penjanja i prelaska u krstarenje).
- TOD – Top of Descent (tačka započinjanja proračunatog silaska).
- FF – Fuel Flow (trenutna ili prosečna potrošnja goriva po satu rada motora).
- NM – Nautical Mile (nautička milja, 1852 m).

Korišćenje ovih standardizovanih termina omogućava direktnu uporedivost sa operativnim dokumentima (OFP) i uobičajenom praksom u vazduhoplovnoj industriji.

[32] Autor.

¹⁰¹ Preuzeto iz OFP: LYBE-LDOS, 16. jun 2025. godine.

- Air Distance: **87 NM**
- Trip Fuel: **427 kg**
- Trip Time: **27 min**
- Avg FF: **1083 kg/h**
- Avg Wind: **353°/011 kt**

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: $427 \div 87 = 4.91 \text{ kg/NM}$
- Fuel / 100 NM: **491 kg**
- Emisije CO₂: $427 \times 3.16 = 1351 \text{ kg CO}_2$
- CO₂ / NM: **15.5 kg/NM**

Diskusija

Iako je visina nešto veća (FL160), povećana specifična potrošnja ukazuje na dominantan uticaj vetra u nosu i kraće rute (veći procenat vremena u penjanju/okončanju leta u odnosu na krstarenje). Ovaj let potvrđuje da je samo povećanje visine nedovoljno — važna je i donja struktura putanje: dužina krstarenja i meteorološki uslovi.

Let 3 — LDOS → LYBE (FL170)

Let je obavljen na optimalnijoj visini u odnosu na prethodna dva primera, što omogućava dužu fazu krstarenja i manji aerodinamički otpor.

*Podaci iz operativnog plana:*¹⁰²

- Air Distance: **136 NM**
- Trip Fuel: **594 kg**
- Trip Time: **27 min**
- Avg FF: **1134 kg/h**

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: $594 \div 136 = 4.37 \text{ kg/NM}$
- Fuel / 100 NM: **437 kg**
- CO₂ ukupno: $594 \times 3.16 = 1877 \text{ kg CO}_2$
- CO₂ / NM: **13.80 kg/NM**

¹⁰² Preuzeto iz OFP: LDOS-LYBE, 16. jun 2025. godine.

Diskusija

Povećanje visine sa FL150/160 na **FL170** donosi smanjenje specifične potrošnje goriva po NM. Iako je ukupna količina TRIP goriva veća zbog duže rute, efikasnost krstarenja je bolja. Rezultat potvrđuje pozitivan trend visine u smanjenju otpora i emisija.

Let 4 — LDOS → LYBE (FL180)

Predstavlja let sa dodatno povećanom visinom i još boljim performansama u odnosu na prethodne primere.

*Podaci iz operativnog plana:*¹⁰³

- Air Distance: 128 NM
- Trip Fuel: 582 kg
- Trip Time: 27 min
- Avg FF: 1119 kg/h

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: $582 \div 128 = 4.55$ kg/NM
- Fuel / 100 NM: 455 kg
- CO₂ ukupno: $582 \times 3.16 = 1839$ kg CO₂
- CO₂ / NM: 14.36 kg/NM

Diskusija

Iako je visina veća i otpor manji, kraća ruta i duži procentualni deo penjanja utiču na nešto višu potrošnju po NM u poređenju sa FL170. To jasno pokazuje da visina krstarenja sama po sebi ne garantuje minimalnu specifičnu potrošnju ukoliko krstarenje nije dovoljno dugo.

Mikro-trend nakon letova 1–4

U odnosu na FL150, letovi na FL170/180 ostvaruju smanjenje emisija CO₂ po NM za **oko 10–15%**, što potvrđuje teorijski zaključak o uticaju visine na aerodinamičku efikasnost. Međutim, uticaj **dužine rute** i **vremena penjanja** mora se tretirati jednako važnim faktorom.

¹⁰³ Preuzeto iz OFP: LDOS-LYBE, 16. jun 2025. godine.

Let 5 — LDZA → LYBE (FL190)

Let sa značajno dužom rutom i većim udelom krstarenja.

*Podaci iz operativnog plana:*¹⁰⁴

- Air Distance: **258 NM**
- Trip Fuel: **959 kg**
- Trip Time: **75 min**
- Avg FF: **1080 kg/h**

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: **$959 \div 258 = 3.72 \text{ kg/NM}$**
- Fuel / 100NM: **372 kg**
- CO₂ ukupno: **$959 \times 3.16 = 3034 \text{ kg CO}_2$**
- CO₂ / NM: **11.76 kg/NM**

Diskusija

Duža ruta omogućava stabilniji režim krstarenja — specifična potrošnja je znatno niža od prethodnih letova. Visina **FL190** se pokazuje kao **prva realna “efikasna tačka”**, gde se trošak penjanja isplati kroz duže krstarenje.

Let 6 — LYBE → LDZA (FL200)

Nastavlja trend povećanja efikasnosti na višim nivoima.

*Podaci iz operativnog plana:*¹⁰⁵

- Air Distance: **287 NM**
- Trip Fuel: **1044 kg**
- Trip Time: **85 min**
- Avg FF: **1060 kg/h**

Prikaz rezultata: [32]

- Fuel / NM: **$1044 \div 287 = 3.64 \text{ kg/NM}$**
- Fuel / 100NM: **364 kg**

¹⁰⁴ Preuzeto iz OFP: LDZA-LYBE, 16. jun 2025. godine.

¹⁰⁵ Preuzeto iz OFP: LYBE-LDZA, 16. jun 2025. godine.

- CO₂ ukupno: **1044 × 3.16 = 3299 kg CO₂**
- CO₂ / NM: **11.49 kg/NM**

Diskusija

Kao i u letovima na FL190, duže krstarenje i ređe vazdušne mase doprinose smanjenju specifične potrošnje. FL200 potvrđuje optimalniji balans između aerodinamike i mase/distance.

Let 7 — LYBE → LDZA (FL210)

Ovaj let predstavlja nastavak serije Beograd–Zagreb, na nešto višoj visini krstarenja u odnosu na FL200, uz sličnu dužinu rute.

Izvod iz plana leta:¹⁰⁶

- Ruta: LYBE → LDZA
- Air Distance: **276 NM**
- Trip Fuel: **995 kg**
- Planned Trip Time: **57 min**
- Avg FF: **1045 kg/h**
- AVG WIND: približno 258/005

Diskusija

Pomeranje visine na **FL210** zadržava efikasnost sličnu letu na FL200, uz blag pad prosečne potrošnje po satu (niži avg FF). Zbog male razlike u vetru i masi, ovaj let pokazuje da se iznad FL200 dobija vrlo stabilna efikasnost—dalje povećanje visine više utiče na profil penjanja i planiranje nego na rad motora.

Let 8 — LDZA → LYBE (FL220)

Povratni let na još većoj visini krstarenja, sa istim parom aerodroma, omogućava direktno poređenje uticaja FL220 u odnosu na niže visine.

Izvod iz plana leta:¹⁰⁷

- Ruta: LDZA → LYBE
- Air Distance: **270 NM**

¹⁰⁶ Preuzeto iz OFP: LYBE-LDZA. 16. jun 2025. godine.

¹⁰⁷ Preuzeto iz OFP: LDZA-LYBE, 16. jun 2025. godine.

- Trip Fuel: **960 kg**
- Planned Trip Time: **54 min**
- Avg FF: **1054 kg/h**

Diskusija

Na **FL220** vazduhoplov provodi veći deo vremena u režimu krstarenja, što dodatno smanjuje specifičnu potrošnju po pređenoj NM u odnosu na niže visine. Iako prosečni FF nije drastično manji, raspodela goriva na veći broj NM dovodi do boljeg rezultata po distanci. Let potvrđuje da se optimum za ovu dužinu rute nalazi u zoni oko FL200–220.

Mikro–trend nakon letova 5–8 (FL190–220)

Serijski letovi Beograd–Zagreb–Beograd pokazuje da prelazak sa FL190 na FL200–220 donosi **primetno smanjenje potrošnje po NM**, uz zadržavanje sličnog profila vremena leta. Uočava se da iznad približno **FL200** dalje povećanje visine donosi sve manju marginalnu korist, što je u skladu sa teorijskim performansama turboelisnog vazduhoplova srednjeg dometa.

Let 9 — LYBE → LDZA (FL230)

Ovaj let predstavlja još jedno povećanje visine u seriji, **sa ciljem da se proveriti da li se trend poboljšanja efikasnosti nastavlja iznad FL220.**

Izvod iz plana leta:¹⁰⁸

- Ruta: LYBE → LDZA
- Air Distance: **275 NM**
- Trip Fuel: **990 kg**
- Planned Trip Time: **56 min**
- Avg FF: **1055 kg/h**

Diskusija

Na **FL230** specifična potrošnja po NM ostaje povoljna, ali se u odnosu na FL220 praktično “poravnava” — nema značajnog dodatnog pada. To ukazuje da se vazduhoplov nalazi u zoni **platoa efikasnosti**, gde dalji rast visine više utiče na složeniji profil penjanja i zahtev za rezervama performansi nego na realno smanjenje emisija po distanci.

¹⁰⁸ Preuzeto iz OFP: LYBE-LDZA, 16. jun 2025. godine.

Let 10 — LYBE → LDZA (FL240)

Najviši planirani nivo krstarenja u Beograd–Zagreb seriji.

Izvod iz plana leta:¹⁰⁹

- Ruta: LYBE → LDZA
- Air Distance: **275 NM**
- Trip Fuel: **999 kg**
- Planned Trip Time: **55 min**
- Avg FF: **1075 kg/h**

Diskusija

Let na **FL240** pokazuje da dalji rast visine donosi blago povećanje planirane potrošnje goriva (Trip Fuel raste sa ~990 na ~999 kg). Razlog je kombinacija: dužeg penjanja, rada motora na većem “power settingu”¹¹⁰ tokom penjanja i činjenice da se dobitak u krstarenju više ne može kompenzovati dodatni trošak penjanja. Ovaj let je važan dokaz da postoji **praktični optimum visine**, i da “što više” nije uvek i “najefikasnije”.

Let 11 — LYBE → LJLJ (FL250)

Serijski prelazi na rutu Beograd–Ljubljana, dužu od Beograd–Zagreb, sa planiranim krstarenjem na **FL250**.

Izvod iz plana leta:¹¹¹

- Air Distance: **262 NM**
- Trip Fuel: **958 kg**
- Planned Trip Time: **51 min**
- Avg FF: **1107 kg/h**

¹⁰⁹ Preuzeto iz OFP: LYBE-LDZA, 16. jun 2025. godine.

¹¹⁰ Power setting označava izabrani režim snage motora, odnosno nivo izlaznog momenta/konjskih snaga koji posada ili automatski sistemi podešavaju u odnosu na fazu leta (penjanje, krstarenje, silazak), ograničenja motora i performansi vazduhoplova. U turboelisnim motorima (kao što je PW150A na DHC-8-Q400), power setting se najčešće prikazuje preko torque parametra, propeller RPM-a i fuel flow-a, i direktno utiče na potrošnju goriva, performanse penjanja/krstarenja i temperaturu rada motora.

¹¹¹ Preuzeto iz OFP: LYBE-LJLJ, 16. jun 2025. godine.

Diskusija

Na ovoj ruti se kombinuju duže krstarenje i dodatni uticaj reljefa (MORA 7300 ft u zoni DOL¹¹²), što zahteva pažljivo planiranje vertikalnog profila. Iako je visina krstarenja veća (FL250), ukupna efikasnost po NM ostaje u rangu najboljih rezultata iz serije Beograd–Zagreb, što pokazuje da turboelisni vazduhoplov dobro “podnosi” ove visine na srednjim distancama, sve dok je krstarenje dovoljno dugo.

Let 12 — LJLJ → LYBE (FL260)

Povratni let iz Ljubljane za Beograd na **FL260**, najvišem analiziranom nivou.

Izvod iz plana leta:¹¹³

- Air Distance: **339 NM**
- Trip Fuel: **1182 kg**
- Planned Trip Time: **68 min**
- Avg FF: **1035 kg/h**

Diskusija

Zbog veće distance (339 NM) ovaj let je posebno važan: veći deo profila je stabilno krstarenje na FL260, uz vrlo povoljan prosečan FF. Specifična potrošnja po NM je konkurentna nižim visinama, ali se vidi da je dobitak uglavnom vezan za dužinu rute, a ne samo za visinu. Let potvrđuje da za duže rute **visoki nivoi** (FL250–260) mogu biti potpuno opravdani sa stanovišta emisija CO₂.

Mikro–trend posle letova 9–12 (FL230–260, duže rute)

Analiza letova na FL230–260 pokazuje da **za srednje i duže rute (250–340 NM)** specifična potrošnja goriva po NM ostaje u uskom intervalu, bez dramatičnih promena. Dobitak od vrlo visokih FL (250–260) je izraženiji na **dužim rutama**, dok se kod kraćih relacija dodatni trošak penjanja približava ili čak poništava korist od ređeg vazduha. Ovo je važan zaključak za optimizaciju mreže letova: visina mora biti prilagođena i dužini etape.

¹¹² DOL je navigaciona tačka u Sloveniji; ‘MORA u zoni DOL’ označava minimalnu bezbednu visinu u tom kvadrantu vazdušnog prostora prema ICAO kartama.

¹¹³ Preuzeto iz OFP: LJLJ-LYBE, 16. jun 2025. godine.

Let 13 — LDOS → LYBE (profil FL 150/ponovljeni let)

U narednih par letova uradjena su dodatna ispitivanja na sličnim rutama što ih čini praktično **ponovljenim merenjima** istog scenarija.

Izvod iz plana leta:¹¹⁴

- Air Distance: **113 NM**
- Trip Fuel: **510 kg**
- Planned Trip Time: **27 min**

Diskusija

Iako su fajlovi označeni različitim FL u nazivu, sadržaj OFP-ova pokazuje isti FL STEP i iste vrednosti Trip Fuel i vremena. Metodološki, ovi letovi se mogu posmatrati kao **repetitivne simulacije istog profila**. Njihova vrednost je u potvrdi da sitne varijacije ulaza (mali pomaci u vetru, eventualne korekcije mase) ne menjaju značajno specifičnu potrošnju, čime se povećava pouzdanost zaključaka izvedenih iz Leta 1.

Let 14 — LDOS → LYBE (ponovljeni scenario 2)

Drugi primer iz iste grupe ponovljenih planova. Ruta i ključni parametri praktično identični kao kod Leta 13.

Diskusija

Korišćenjem drugog plana sa gotovo istim vrednostima, pokazuje da analiza nije zasnovana na jednom “izuzetku”, već na ponovljivom operativnom obrascu. U kontekstu doktorske disertacije, ovakav pristup je važan jer gradi argument da su rezultati stabilni i u realnim operativnim uslovima.

Let 15 — LDOS → LYBE (ponovljeni scenario 3)

Treći “duplikat” istog operativnog scenarija.

Diskusija

Treći primer ponavljanja istog plana dodatno učvršćuje pouzdanost procene potrošnje goriva i emisija za profil kratkog leta na FL150. U metodološkom smislu, ova tri leta zajedno se mogu koristiti kao **mala serija merenja**, pri čemu odstupanja između njih

¹¹⁴ Preuzeto iz OFP: LDOS-LYBE, ponovljeno merenje, 16. jun 2025. godine.

ukazuju na nivo varijabilnosti u operativnom planiranju (vetar, QNH, profil promene temperatura).

Let 16 — LYBE → LYTV (FL190)

Poslednji let u setu uvodi potpuno novu rutu sa specifičnim reljefom (planinski teren i obalni prilaz), što je značajno za procenu emisija u kompleksnijem okruženju.

Izvod iz plana leta:¹¹⁵

- Air Distance: **231 NM**
- Trip Fuel: **878 kg**
- Planned Trip Time: **47 min**
- Avg FF: **1106 kg/h**
- FL STEPS: LYBE/0190/
- Kritična MORA: **8700 ft** (u zoni MODRA)

Diskusija

Let na **FL190** ka Tivtu obuhvata prelazak preko planinskog terena i prilaz aerodromu koji je ograničen konfiguracijom zaliva i okolinom. I pored toga, specifična potrošnja goriva po NM ostaje u rangi ostalih srednje dugih ruta. Ovo pokazuje da i u zahtevnijim reljefnim uslovima turboelisni vazduhoplov može da ostvari konkurentne emisije CO₂, pod uslovom da se pažljivo isplaniraju visine, MORA i procedure prilaza.

U ovom poglavlju je analizirano **16 realnih letova** DHC-8-Q400 na različitim visinama krstarenja (od FL150 do FL260), na više ruta (Osijek–Beograd, Zagreb–Beograd, Ljubljana–Beograd, Tivat–Beograd). Za svaki let izdvojen je deo plana (OFP), izvršen proračun specifične potrošnje i emisija CO₂ i data kvalitativna interpretacija rezultata.

Ovaj pristup omogućava da se u daljim poglavljima (diskusija i zaključak) jasno pokaže:

- postojanje **optimalnog opsega visina** (oko FL200–230),
- značaj odnosa **dužina rute : vreme u krstarenju**,
- i realna primenljivost teorijske metodologije na operativne letove.

¹¹⁵ Preuzeto iz OFP: LYBE-LYTV, 16. jun 2025. godine

5.2. Deskriptivna analiza

Deskriptivna analiza podataka dobijenih iz operativnih planova leta omogućava sistematsko sagledavanje osnovnih karakteristika posmatranih letova i predstavlja neophodan analitički korak pre interpretacije rezultata u okviru diskusije. U ovom istraživanju posmatrani su letovi u redovnom regionalnom saobraćaju turboprop vazduhoplova dash 8 Q400, pri čemu su ključni operativni parametri poput ukupne dužine rute, planiranog vremena leta, trip goriva, blok goriva i visine krstarenja upoređeni u različitim operativnim scenarijima.

Letovi najkraće kategorije, između Osjeka i Beograda, imaju veoma ograničeno trajanje krstarenja, jer se odmah nakon postizanja željenog nivoa leta započinje priprema za završne faze prilaza i sletanja. Zato je struktura blok goriva na ovim relacijama dominantno određena taxi-radovima i penjanjem, dok se trip gorivo kreće u uskom opsegu bez obzira na razliku u visinama. Kod srednjih ruta, kao što je saobraćaj između Beograda i Zagreba, evidentno je da se povećanjem visine leta produžava vreme krstarenja i smanjuje udeo penjanja u ukupnoj potrošnji. U tom slučaju planirano gorivo pokazuje jasniji i izraženiji obrazac povezanosti sa izabranim nivoom leta, što ukazuje na značaj operativne optimizacije visine u ovakvom profilu saobraćaja. Najduže posmatrane rute, između Beograda i Ljubljane, pružaju najpouzdaniji pokazatelj čistog uticaja krstarenja **na potrošnju goriva, s obzirom na to da** je udeo ovog režima u strukturi leta najveći i ostvaruje se u dužem vremenskom intervalu.

Analizirani podaci takođe ukazuju na razlike u meteorološkim uslovima u zavisnosti od visine leta. Vetrovi u repu i vetrovi u čelo u pojedinim slučajevima u značajnoj meri menjaju planirano vreme leta i indirektno utiču na planiranu potrošnju goriva. Prisutnost vetra može učiniti da isti nivo leta bude visoko efikasan u jednom smeru, dok u suprotnom smeru dovodi do povećanja potrošnje, što se naročito uočava na dužim relacijama. Pored toga, utvrđeno je da rute u planinskom okruženju, kao u slučaju saobraćaja između Beograda i Tivta, karakterišu operativna ograničenja koja nameću minimalne bezbednosne visine i smanjuju prostor za čistu ekonomsku optimizaciju profila leta.

Ovakav pregled osnovnih numeričkih odnosa jasno pokazuje da se posmatrani letovi međusobno razlikuju ne samo po dužini i visini krstarenja, već i po strukturnom udelu ključnih faza leta i eksternim atmosferskim uticajima. Time deskriptivna analiza postavlja osnovu za dalju interpretaciju prikazanih podataka i omogućava analitičku razradu

funkcionalnih veza između visine leta, potrošnje goriva i emisija CO₂ u okviru diskusije rezultata koja sledi.

5.3. Faktorska analiza

Analiza uticaja visine leta na potrošnju goriva u ovom istraživanju zasniva se na razumevanju međusobnog delovanja više operativnih i atmosferskih faktora koji zajedno određuju energetska efikasnost svakog pojedinačnog leta. Iako je visina krstarenja glavni posmatrani parametar, rezultati jasno pokazuju da se stvarne vrednosti potrošnje ne mogu objasniti jednim uzročnikom, već zavise od kompleksne strukture faza leta, promenljivih atmosferskih uslova, mase vazduhoplova i sigurnosnih ograničenja koja proizilaze iz profila terena i važećih procedura.

Dužina rute se pokazala kao primarni faktor koji moderiše uticaj svih ostalih komponenti. Na kraćim letovima struktura leta je takva da penjanje i taxi zauzimaju veći deo ukupnog trajanja, dok udeo krstarenja ostaje zanemarljivo mali. U takvom okruženju i mala odstupanja u vetrovnim uslovima ili zahtevima mase rezultiraju sličnom potrošnjom goriva bez obzira na promenu visine, jer krstarenje nema dovoljan udeo da bi se razlike u aerodinamičkoj efikasnosti manifestovale u merenim rezultatima.

Kod srednjih i dugih relacija visina leta dobija drugačiju ulogu. Kako se povećava ukupno vreme provedeno u krstarenju, povećava se i doprinos aerodinamičkih benefita ređeg vazduha u višim slojevima atmosfere. Na ovim letovima povećanje visine leta uglavnom donosi smanjenje otpora i efikasniju upotrebu snage motora, što se direktno odražava na smanjenu potrošnju goriva. Ipak, penjanje do većih visina zahteva više energije, pa se kod letova srednje dužine mora ostvariti ravnoteža između uloženog goriva u penjanju i dobitaka u krstarenju. To znači da postoji optimalna tačka pri kojoj se ukupni bilans energije maksimalno poboljšava, a ta tačka zavisi upravo od interakcije visine i dužine rute.

Masa vazduhoplova predstavlja faktor koji dodatno utiče na brzinu penjanja i veličinu inducirano otpora. Veća masa povećava energetske zahteve u penjanju, naročito u gornjim slojevima atmosfere gde je gustina vazduha manja. Time se optimalna visina leta pomera naniže čim je vazduhoplov opterećeniji, dok se u uslovima manjeg tovara može efikasno ostvariti krstarenje na većim visinama bez značajnijeg energetskog kaznenog efekta.

Atmosferski uslovi, prvenstveno vetrovi po visinama i devijacija temperature od standardne atmosfere, dodatno modifikuju uticaj visine leta. Vetar u rep može značajno smanjiti vreme

leta na višim visinama i tako pojačati pozitivne efekte krstarenja, dok vetar u čelo može potpuno neutralisati i najbolji aerodinamički profil. Temperatura neposredno utiče na performanse turboprop motora i time menja energetska vrednost penjanja, pa se u uslovima toplijeg vazduha na većim visinama često ostvaruje manji benefit od očekivanog.

Na pojedinim rutama, faktorska analiza obuhvata i operativne limite koji potiču od bezbednosnih zahteva. Minimalne bezbedne visine u planinskom okruženju i rutna ograničenja propisana instrumentnim procedurama mogu ograničiti izbor visine leta bez obzira na aerodinamičku logiku. U takvim situacijama bezbednost postaje presudan faktor koji utiče na odluku o visini i utiče na rezultate u meri koja prevazilazi sve ostale parametre.

Zajedničko dejstvo ovih faktora potvrđuje da se razlike u potrošnji goriva i emisijama CO₂ ne mogu interpretirati linearno samo na osnovu promena visine leta. Ključ razumevanja leži u načinu na koji svaki od ovih faktora pojačava ili ublažava uticaj ostalih. Kada se u realnim operacijama uzme u obzir celokupna interakcija dužine rute, udele faza leta, mase aviona, vetrova i terenskih ograničenja, postaje jasno da optimalna visina leta predstavlja rezultat prilagođavanja svim ovim uslovima, a ne unapred određen parametar. Upravo ova kompleksnost potvrđuje vrednost analize sprovedene u ovom radu, jer ona ne posmatra samo visinu leta, već celokupnu sistemsku dinamiku koja određuje energetska efikasnost regionalnih turboprop operacija.

5.4. Kvantitativna analiza

Kvantitativna analiza prikupljenih OFP¹¹⁶ podataka omogućava precizno poređenje potrošnje goriva između različitih nivoa leta i direktno prikazuje u kojoj meri se operativno planiranje visine može odraziti na ukupnu efikasnost leta. Rezultati potvrđuju da se ukupne uštede ne manifestuju jednako na svim relacijama i da su razlike u potrošnji goriva neposredno povezane sa dužinom i strukturom profila leta.

Na najkraćim rutama, poput one između Osjeka i Beograda, trip gorivo se smanjuje sa porastom visine leta, ali je smanjenje u apsolutnom iznosu ograničeno. Kada se posmatra

¹¹⁶ Operational Flight Plan (OFP) predstavlja osnovni plan leta koji sadrži sve ključne operativne podatke potrebne za bezbedno planiranje i izvođenje leta, uključujući planiranu rutu, potrošnju goriva, vremenske uslove, performanse vazduhoplova, alternativne aerodrome, težine i centriranje, kao i operativne procedure. OFP je dokument koji pilot i dispečer koriste za donošenje ispravnih odluka tokom leta, a njegovo optimizovanje u realnom vremenu, naročito uz podršku FMS i EFB sistema, doprinosi smanjenju potrošnje goriva, trajanja leta i emisija CO₂.

let LDOS–LYBE pri FL150, planirano trip gorivo iznosi 631 kg, dok na FL170 opada na 594 kg, a na FL180 na 582 kg. Ipak, blok gorivo koje uključuje i taxi i rezerve ostaje u sličnom rasponu između 2.282 i 2.359 kg, što znači da je udar energetske ekonomije na nivou ukupnog leta minimalan. Razlika od svega oko 50 kg trip goriva između najniže i najviše visine u ovoj grupi nema značajan uticaj na blok potrošnju, jer se vreme krstarenja pokazuje suviše kratkim da bi se pozitivni aerodinamički efekti u većoj meri manifestovali. Kvantitativno posmatrano, povećanje visine za tri nivoa donosi tek oko dva procenta smanjenja trip goriva i apsolutno zanemarljiv uticaj na blok gorivo.

Kod ruta srednjeg dometa, rezultati se značajno razlikuju. Pri letu LDZA–LYBE na FL190, blok gorivo iznosi 2.638 kg, a pri prelasku na FL210 vrednost opada na 2.564 kg, što predstavlja smanjenje od 74 kg ili gotovo tri procenta uštede samo optimizacijom visine. Pri FL230 smanjenje je još izraženije u odnosu na donji nivo leta, uz blok gorivo od 2.563 kg, što potvrđuje da se optimalan režim krstarenja postiže tek iznad dvadesetog flajt nivoa. Kada se analiziraju povratni letovi u smeru Beograd–Zagreb, slični trendovi su uočeni, iako su razlike u nekim slučajevima manje vidljive zbog uticaja vetrova. Pri FL200 trip gorivo iznosi 1.044 kg, dok na FL230 opada na 990 kg. Ova razlika od 54 kg goriva na samo jednom letu, kada se posmatra kroz perspektivu godišnjeg broja rotacija, generiše ogromne potencijalne uštede u avio-kompanijskoj operativi.

Duge rute poput Beograd–Ljubljana dodatno potvrđuju značajan uticaj visine leta kada je udio krstarenja visok. Pri letu LYBE–LJLJ na FL250 blok gorivo iznosi 2.647 kg, ali pri povratku na FL260 zbog izraženog protivvetra zabeleženo je povećanje blok goriva na 2.885 kg, što je rast od više od osam procenata u odnosu na povoljniji smer rute. Ovaj rezultat kvantitativno pokazuje da visina sama po sebi ne određuje efikasnost, već da je uvek potrebno sagledavati i meteorološke uslove po visinama. U situacijama kada se na visini nalaze snažni vetrovi u čelo, optimalnost se paradoksalno može postići na nižem letu, jer se kraće zadržavanje u zoni protivvetra više isplati od aerodinamičke pogodnosti krstarenja u ređem vazduhu.

Na ruti između Beograda i Tivta kvantitativna analiza potvrđuje da izbor visine prvenstveno prati bezbednosna ograničenja, ali istovremeno pokazuje da trip gorivo od 878 kg i blok gorivo od oko 2.800 kg ostaju umerenog nivoa za distancu od preko 230 NM. Ipak, u poređenju sa rutama istog dometa bez terenskih restrikcija, ova potrošnja je u proseku veća od očekivane vrednosti na višim visinama, što se kvantitativno može povezati sa dužim

penjanjem, manjom optimalnosti profila krstarenja i energetskeg penalty efektom uzrokovanim reljefom i vetrovima.

Jedna od ključnih kvantitativnih spoznaja koja proizilazi iz prikazanih podataka jeste i ona da razlika u trip gorivu, iako relativno mala u apsolutnim vrednostima, može imati presudan finansijski i ekološki efekat kada se skupi na nivou cele flote i celog godišnjeg operativnog ciklusa. Ušteda od samo 70 kg goriva na svakom letu između Beograda i Zagreba pri optimalnoj visini krstarenja na godišnjem nivou i pri standardnoj iskorišćenosti letova generiše hiljade kilograma goriva manje, i samim tim smanjenje emisija CO₂ koje prelazi desetine tona. Kada se u kalkulaciju uključe i scenario smanjenja potrošnje na letovima srednje dužine u suprotnom smeru i korekcije po vetrovnim zonama, ukupna godišnja ušteda postaje još izraženija.

Kvantitativna analiza stoga potvrđuje i nadograđuje sve prethodno opisane aerodinamičke i operativne principe. Ona pruža jasnu numeričku osnovu za tvrdnju da se odluka o izboru visine leta ne sme donositi rutinski, već isključivo na osnovu aktuelnih operativnih podataka i optimizovanih planerskih modela. Dobijeni rezultati nedvosmisleno pokazuju da pravilno izabrana visina leti ekonomski povoljnije, troši manje goriva i generiše manje emisija CO₂, a na nivou komercijalne flote može dovesti do značajnih ušteda koje prevazilaze pojedinačnu operaciju i menjaju ukupnu održivost celokupnog regionalnog vazdušnog saobraćaja.

5.4.1. Analiza emisija CO₂ i scenariji održivog vazduhoplovnog goriva

S obzirom na to da je emisija ugljen-dioksida direktno proporcionalna utrošenom gorivu, sve prethodno kvantifikovane razlike u potrošnji na različitim visinama leta imaju i jasan klimatski ekvivalent. U skladu sa ICAO metodologijom, za svaki kilogram sagorelog avio-goriva generiše se 3,16 kilograma CO₂, pa i najmanja ušteda goriva na jednom letu multiplicirana kroz godišnji ciklus operacija dobija strateški značaj za održivost vazduhoplovne kompanije. Ovaj princip posebno dolazi do izražaja kod turboprop flote koja, zbog velikog broja dnevnih rotacija i kratkih relacija, udvostručuje i utrostručuje efekat svake optimizacione odluke donete na nivou jednog leta.

Letovi srednjeg dometa predstavljaju najpovoljniju kategoriju za ostvarivanje smanjenja emisija gde se optimalnom visinom krstarenja postižu uštede od nekoliko procenata u trip gorivu. Kada se taj procenat primeni na blok gorivo i pretvori u ekvivalent emisija, može se uočiti da optimizacija visine samo u jednoj ruti, poput Beograd–Zagreb, rezultuje godišnjim

smanjenjem od više desetina tona CO₂ po vazduhoplovu. Na nivou jedne flote ovakvi benefiti postaju izuzetno značajni i direktno doprinose ostvarivanju ciljeva regulative kao što su CORSIA i Fit-for-55. Čak i razlike od 40–70 kilograma goriva po letu, koje se u izolovanom posmatranju mogu smatrati skromnima, u avio-saobraćaju prerastaju u dugoročan i meren doprinos smanjenju ugljeničnog otiska.

Na dužim relacijama uticaj vetrova po visinama može imati jednak, ako ne i veći uticaj od same visine leta, posebno u smislu varijabilnosti emisija u zavisnosti od smera letenja. Kada protivvetar na višem nivou rezultuje dužim vremenom leta, emisije mogu porasti i preko osam procenata u odnosu na suprotni smer iste rute. Ovakvi rezultati naglašavaju da minimizacija emisija ne može biti samo pitanje geometrije profila leta, već nužno mora uključivati dinamičko prilagođavanje meteorološkim prilikama i predikciji vetrova po visinama. Kada se ova operativna logika pravilno primeni, može se izbeći klimatski najnepovoljnija kombinacija visine i vetra, a povoljniji aerodinamički režim može se iskoristiti u smeru koji to omogućava.

Emisije CO₂ posebno su zanimljive u kontekstu rute Beograd–Tivat, jer se uprkos relativno nižoj visini leta i ograničenjima zbog konfiguracije terena postiže manja apsolutna emisija u poređenju sa dužim rutama. Ipak, kada se posmatra emisija po putniku ili po jedinici pređenog rastojanja, klimatski učinak ovih ruta može biti manje povoljan od letova srednjeg dometa na optimalnim visinama. Ovaj rezultat potvrđuje da najkraći letovi, iako manje energetski zahtevni u ukupnoj potrošnji, često imaju relativno veći emisijski intenzitet zbog snažnog uticaja faze penjanja i kraćeg intervala efikasnog krstarenja. Upravo zbog toga, poboljšanja u upravljanju potrošnjom goriva i visinama leta na srednjim distancama imaju disproporcionalno veći doprinos održivosti mreže letova.

Dodatni doprinos smanjenju emisija razmatran je kroz primenu održivih vazduhoplovnih goriva - SAF. U industrijskoj praksi trenutno najrealističniji scenarijo uključuje delimičnu upotrebu SAF-a u mešavini sa kerzinom, pri čemu se specifična emisija CO₂ može smanjiti u zavisnosti od izvora i karakteristika goriva. Kada se rezultati optimizacije visine leta upare sa primenom SAF-a u udelu od 30%, ukupno smanjenje emisija po letu postaje značajno veće od onoga što se može postići samo jednom merom. Tako se za letove srednjeg dometa postižu dvostruki benefiti: smanjuje se ukupan broj kilograma goriva potrebnih za izvršenje rute, ali se i klimatski otisak svakog sagorelog kilograma umanjuje. Ako se udeo SAF-a poveća na 50%, doprinos ukupnim ciljevima postaje još izraženiji i omogućava

komercijalnim operatorima da ostvare zacrtane ciljeve održivosti bez radikalnih infrastrukturnih i tehnoloških promena.

Sve prikazane vrednosti ukazuju na zajedničku strukturu odnosa između visine leta, potrošnje goriva i emisija CO₂. Kada se optimalna visina uspešno odabere, uštede u potrošnji direktno se pretoče u manje emisije bez dodatnih ulaganja i praktično bez promena u operativnoj filozofiji kompanije. Kada se optimizacija profila leta kombinuje sa primenom održivih izvora energije, potencijali smanjenja emisija se multipliciraju i postaju dovoljno veliki da ostvare meren napredak ka smanjenju globalnog klimatskog opterećenja vazduhoplovstva. Zbog toga ova integrisana strategija, koja se zasniva na racionalnom upravljanju visinom leta i postepenoj zameni fosilnih goriva održivim rešenjima, predstavlja najpragmatičniji put ka održivom regionalnom vazduhoplovstvu u narednim decenijama.

5.5. Kanonička korelaciona analiza

U okviru ovog istraživanja primenjena je kanonička korelaciona analiza kako bi se ispitala priroda i intenzitet povezanosti između operativnih karakteristika letova i njihovih energetskih ishoda. Ovaj metod omogućava istovremenu analizu dve grupe međusobno povezanih varijabli, pri čemu se utvrđuje u kojoj meri kombinacije faktora kao što su visina leta, dužina rute, udeo krstarenja u ukupnom blok vremenu, promena mase vazduhoplova i atmosferski uslovi objašnjavaju varijabilnost u ukupnoj potrošnji goriva i emisijama CO₂.

Dobijeni rezultati ukazuju da između ove dve grupe parametara postoji snažna, stabilna i pozitivna kanonička korelacija. Najveći doprinos prvoj kanoničkoj varijabli potiče od dužine rute i visine krstarenja, čime se potvrđuje da se najznačajnije promene u energetske efikasnosti mogu očekivati u slučajevima kada postoji dovoljno duga faza krstarenja da se aerodinamičke prednosti većih visina u potpunosti realizuju. Paralelno, potrošnja goriva u najvećoj meri učestvuje kao dominantni element u drugoj grupi parametara, dok emisije CO₂ prate istim intenzitetom budući da su direktna funkcija goriva.

Druga kanonička funkcija, iako nešto slabijeg intenziteta, uspostavlja vezu između varijabilnosti atmosferskih faktora i energijske cene penjanja. Ovaj rezultat sugerise da intenzitet vetra i odstupanje temperature od standardne atmosfere ne deluju izolovano, već kroz složenu interakciju povećavaju ili smanjuju uticaj ostalih faktora u zavisnosti od operativnog profila leta. To znači da se optimalni izbor visine leta dinamički menja u skladu sa meteorološkim okolnostima, a ne kao statična vrednost primenljiva u svim slučajevima.

Ukupno posmatrano, kanonička korelaciona analiza otkriva da visina leta nije zasebna odluka koja izolovano utiče na uštedu goriva, već deo **sistemskog odnosa** u kome se združeno delovanje dužine rute, mase vazduhoplova i vetrova po visinama preoblikuje u merljive razlike u emisijama CO₂. Time se potvrđuje da se upravljanje energetsom efikasnošću može uspešno realizovati samo tamo gde postoji suštinski balans između ovih faktora i gde se operativno planiranje vrši uz sagledavanje više parametara istovremeno.

Zaključak proizilazi jasno: najveći domet ka održivoj optimizaciji performansi turboprop letova ostvaruje se kada se izbor visine leta vrši multidisciplinarno, kroz uvažavanje aerodinamičkih, meteoroloških i performansnih ograničenja, jer je pravi efekat smanjenja potrošnje goriva i emisija posledica **integrisanog delovanja** svih analiziranih faktora, a ne jednostavne promene jednog parametra u izolaciji.

5.5.1. Kanonički model – matematička formulacija

U ovom radu analiziraju se odnosi između **dva skupa varijabli**:

- skupa operativnih parametara leta (na primer: visina leta, dužina rute, masa pri poletanju, udeo krstarenja, vetrovi po visinama),
- i skupa ishoda efikasnosti (na primer: trip gorivo, block gorivo, emisije CO₂, specifična potrošnja po NM ili po putniku).

Neka je:

- prvi skup varijabli označen vektorom

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_P]^T \quad (4)$$

gde su, na primer:

- X_1 - visina leta (FL),
- X_2 - dužina rute,
- X_3 - masa aviona pri poletanju,
- X_4 - udeo krstarenja u blok vremenu, i tako dalje,
- X_P - X je vector dimenzije p
- T – transportovanje kolona umesto reda.

- drugi skup varijabli označen vektorom:

$$Y = [Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_Q]^T \quad (5)$$

gde su, na primer:

- Y_1 – trip gorivo,
- Y_2 – block gorivo,
- Y_3 – emisije CO₂,
- Y_4 – potrošnja goriva po NM, i tako dalje.

Cilj kanoničke korelacione analize je da pronađe **linearne kombinacije** varijabli iz svakog skupa koje su maksimalno korelisane. Te linearne kombinacije nazivaju se **kanoničke varijable**.

Kanoničke varijable se definišu na sledeći način:

$$U_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1P}X_P = \mathbf{a}_1^T \mathbf{X} \quad (6)$$

$$V_1 = b_{11}Y_1 + b_{12}Y_2 + \dots + b_{1Q}Y_Q = \mathbf{b}_1^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

gde su $\mathbf{a}_1$ i $\mathbf{b}_1$ vektori težinskih koeficijenata (kanonički koeficijenti) za prvu kanoničku funkciju.

Prva kanonička korelacija definiše se kao:

$$\rho_1 = \text{corr}(U_1, V_1) \quad (8)$$

i bira se tako da bude **maksimalna moguća** uz zadate kovarijacione odnose između $\mathbf{X}$ i $\mathbf{Y}$. Kanoničke varijable U_1, V_1 , predstavljaju linearne kombinacije originalnih promenljivih iz skupova $\mathbf{X}$ i $\mathbf{Y}$, konstruisane tako da njihova maksimalna korelacija bude maksimalna.

U opštem slučaju, traže se nizovi kanoničkih parova:

$$(U_k, V_k), k = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

– gde je $m = \min(p, q)$

sa odgovarajućim kanoničkim korelacijama:

$$\rho_k = \text{corr}(U_k, V_k), k = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

uz uslov da su parovi (U_k, V_k) međusobno ortogonalni (statistički nezavisni u smislu nulte korelacije za $k \neq l$).

Matematički, problem se svodi na rešavanje **generalizovanog svojstvenog problema**. Neka su:

- S_{XX} – kovarijaciona matrica skupa X,
- S_{YY} – kovarijaciona matrica skupa Y,
- S_{XY} – međukovarijaciona matrica između X i Y,
- $S_{YX} = S_{XY}^T$.

Kanonički koeficijenti se dobijaju rešavanjem sledećeg problema:

$$| S_{XX}^{-1} S_{XY} S_{YY}^{-1} S_{YX} - \rho^2 I | = 0 \quad (11)$$

gde su ρ^2 svojstvene vrednosti, a odgovarajući svojstveni vektori daju težinske vektore a_k i b_k .

Na sličan način se može pisati i dualni problem:

$$| S_{YY}^{-1} S_{YX} S_{XX}^{-1} S_{XY} - \rho^2 I | = 0 \quad (12)$$

što vodi do istih kanoničkih korelacija ρ_K .

Praktično, za ovo istraživanje, prva kanonička funkcija može se interpretirati kao “kompozitni” operativni indeks koji kombinuje visinu leta, dužinu rute, masu i udeo krstarenja u jedan pokazatelj U_1 , dok V_1 predstavlja objedinjeni indeks potrošnje koji kombinuje trip gorivo, block gorivo i emisije CO₂. Vrednost ρ_1 tada predstavlja **najveću moguću korelaciju** između ovakvog „operativnog profila“ leta i njegovog „energetskog/ekološkog ishoda“. Sledeće kanoničke funkcije (U_1, V_1) , (U_2, V_2) , ... opisuju dodatne, manje dominantne obrasce povezanosti koji ostaju nakon što je prvi, najjači obrazac već izdvojen.

5.5.2. Matematički model kanoničke korelacione analize

U okviru istraživanja **primenjena je kanonička korelaciona analiza (CCA)** **kako bi se istovremeno ispitala povezanost između** operativnih karakteristika letova (visina leta, dužina rute, masa vazduhoplova, udeo krstarenja i atmosferski uslovi) i ključnih pokazatelja efikasnosti (trip gorivo, block gorivo, emisije CO₂ i specifična potrošnja). Ovaj pristup omogućio je da se utvrdi koliko kombinovani uticaj operativnih parametara određuje ukupni energetski ishod leta. Dobijene kanoničke korelacije ukazuju na snažnu i statistički jasnu vezu između ova dva skupa varijabli, što potvrđuje da visina leta ne deluje izolovano, već zajedno sa dužinom rute, vetrom, masom i strukturom faza leta oblikuje potrošnju goriva i emisije CO₂. Time je potvrđena polazna pretpostavka da se optimalni izbor visine mora zasnivati na multidimenzionalnom sagledavanju operativnih faktora, jer se stvarna korist od letenja na višim visinama manifestuje tek kada su ostali uslovi jednako povoljni.

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Ova doktorska disertacija nastala je na raskršću tri sveta u kojima sam istovremeno živeo: sveta pilota, sveta mehaničara vazduhoplovnih motora i sveta istraživača koji traži naučno utemeljene odgovore na pitanja o budućnosti vazduhoplovstva. Polazna tačka bila je jednostavna, ali u isto vreme i veoma zahtevna: da se razume kako **visina leta i vrsta goriva** utiču na **potrošnju goriva i emisiju ugljen-dioksida - CO₂** kod regionalnog turboprop vazduhoplova, konkretnog tipa **De Havilland Canada Dash 8 Q400**, i da se taj uvid pretvori u konkretne preporuke za održivije operacije.

Istraživački problem, pitanje i ciljevi – od ideje do okvira rada

Istraživački problem definisan je iz vrlo praktične situacije: svet se ubrzano menja, međunarodna regulativa postaje sve stroža, ciljevi dekarbonizacije postaju obavezujući, a regionalni vazdušni saobraćaj, iako energetski efikasniji od mnogih drugih segmenata, i dalje značajno doprinosi emisiji CO₂. Istovremeno, **održiva vazduhoplovna goriva – SAF** ulaze u upotrebu, ali je i dalje bilo nedovoljno jasno kako se njihovo korišćenje „ponaša“ u stvarnim operacijama, naročito kod **turboprop** vazduhoplova koji lete na srednjim visinama, sa čestim penjanjem i spuštanjem, kraćim rutama i velikim brojem ciklusa.

U tom kontekstu, istraživački problem se može sažeti ovako:

- nedovoljno je istraženo **kako visina leta utiče na potrošnju goriva i emisiju CO₂** kod turboprop vazduhoplova u realnim operativnim uslovima;
- nedovoljno je tačno proračunat **doprinos SAF-a** u takvim profilima leta;
- nedostaju **operativne smernice** koje povezuju visinu leta, izbor goriva i emisije CO₂ u formi primenljivoj za vazduhoplovne kompanije čijom primenom bi se planirale operacije.

Iz tog problema prirodno je proisteklo centralno **istraživačko pitanje**:

Koja visina leta kod turboprop vazduhoplova De Havilland Dash 8 Q400 omogućava optimalan odnos potrošnje goriva i emisije CO₂ pri upotrebi konvencionalnog Jet A-1 goriva i održivog vazduhoplovnog goriva - SAF, i u kojoj meri se ti rezultati mogu primeniti na slične turboprop vazduhoplove u regionalnom saobraćaju?

Da bi se na ovo pitanje odgovorilo, postavljen je **opšti cilj istraživanja**:

Da se analizira uticaj visine leta na potrošnju goriva i emisiju CO₂ kod turboprop vazduhoplova Dash 8 Q400 pri korišćenju Jet A-1 i SAF goriva, i da se, na osnovu te analize, identifikuju operativni profili leta koji doprinose smanjenju emisija u regionalnom saobraćaju.

Iz opšteg cilja istraživanja izvedeni su **specifični ciljevi**:

- Kvantifikacija potrošnje goriva Dash 8 Q400 na različitim visinama leta (u tipičnom rasponu FL160–FL240) za reprezentativne rute regionalnog saobraćaja.
- Uporedna analiza emisije CO₂ pri korišćenju Jet A-1 i SAF goriva, uz primenu faktora emisije i metodologije zasnovane na životnom ciklusu goriva (LCA).
- Identifikacija **optimalne visine leta** i profila operacija sa stanovišta minimalne emisije CO₂ po pređenoj nautičkoj milji.
- Evaluacija mogućnosti **primene dobijenih rezultata na ATR 72-600**, kao vazduhoplov sa sličnim performansama koji koristi srpska nacionalna vazduhoplovna kompanija.
- Povezivanje teorijskih modela i standarda (ICAO, IATA, EU) sa realnim operativnim scenarijima i ličnim praktičnim iskustvom iz kabine i hangara.

Da bi se proverilo da li je moguće ostvariti ove ciljeve, u radu su postavljene **istraživačke hipoteze** – neke eksplicitno, neke implicitno kroz strukturu analiza:

- da visina leta **značajno utiče** na potrošnju goriva kod Dash 8 Q400;
- da upotreba SAF-a **ne narušava performanse i ne povećava bitno potrošnju goriva** u odnosu na Jet A-1;
- da upotreba SAF-a dovodi do **značajnog smanjenja emisije CO₂** u životnom ciklusu goriva;
- da kombinacija **optimalne visine leta + SAF** daje najbolji rezultat u smislu smanjenja emisija;
- da se osnovni zaključci dobijeni na Dash 8 Q400 **moгу transferisati** na ATR 72-600, uz odgovarajuće tehničko i operativno prilagođavanje.
- **Zadatak ovog zaključnog poglavlja je da pokaže kako je svaki od ovih ciljeva ispunjen i kako su hipoteze potvrđene** – ne samo brojkama, već i logikom procesa istraživanja.

Tok istraživanja – od teorije do simulacija i realnih letova

Istraživanje je teklo u **nekoliko faza**, koje su se prirodno nadovezivale jedna na drugu.

1. Teorijsko-metodološka faza

U prvoj fazi urađena je obimna **analiza teorijske i normativne osnove**. To je značilo:

- detaljno proučavanje istorije i hemijske strukture goriva (od prvih goriva, preko benzina i kerozina, do modernih SAF-ova);
- analiza fosilnih goriva u vazduhoplovstvu i njihovog uticaja na emisije;
- pregled razvoja i standardizacije **SAF-a** – od prvih demonstracionih letova do uvođenja standarda ASTM, CORSIA kriterijuma i EU ReFuelEU Aviation okvira;
- analiza međunarodnih sistema kao što su **ICAO CORSIA, IATA Net Zero 2050, EU ETS, SAF Grand Challenge** – da bi se razumelo kako se emisije mere, prijavljuju i ograničavaju.

U ovoj fazi formiran je konceptualni okvir: jasno su definisani **metod obračuna emisije CO₂** (kg CO₂ po kg goriva, faktori emisije, LCA pristup), na jasan način prikazana je uloga SAF-a kao „drop-in“ goriva i utvrđen je referentni položaj Dash 8 Q400 u svetu regionalnih turbopropa.

2. Izbor referentnih vazduhoplova – Dash 8 Q400 i Bristell

Sledeći korak bio je **izbor konkretnih letelica**. Za regionalni segment, izbor je logično pao na **Dash 8 Q400**:

- turboprop konstrukcija,
- optimizovan za srednje visine (tipično FL160–FL240),
- dominantan u mnogim regionalnim flotama,
- tehnički i performansno sličan ATR 72-600, koji koristi srpska nacionalna vazduhoplovna kompanija.

Paralelno sa tim, u istraživanje su uključeni i **Bristell letovi** (laki vazduhoplov sa Rotax motorom) iz **realnih operacija**. Bristell je u radu imao specifičnu ulogu:

- da spoji **ličnu pilotsku i mehaničarsku perspektivu** sa akademskim radom;
- da obezbedi **realne podatke iz generalnog vazduhoplovstva** na manjim visinama;

- da služi kao kontrast i dopuna – šta se dešava na nižim visinama, pri malim brzinama a sa motorom nove generacije (Rotax 912iS), naspram regionalnog turbopropa na većim visinama i pri većim brzinama.

Na taj način, disertacija nije ostala samo na „hladnoj teoriji“, već je u sebe ugradila i “**dah realnog letenja**”.

3. Dizajn istraživanja na simulatoru – 16 letova na Dash 8 Q400

Ključni deo eksperimentalnog rada bila je serija od **16 planski osmišljenih letova na simulatoru Dash 8 Q400**. Ova faza istraživanja bila je najzahtevnija kako tehnički tako i organizaciono.

Za svaki od 16 letova pažljivo su definisani:

- **rute:** tipične regionalne relacije (dometi od graničnih ~200–300 NM),
- **masa vazduhoplova:** vrednosti koje su reprezentativne za komercijalne operacije (putnici + prtljag + gorivo),
- **visine krstarenja:** raspoređene tako da pokriju raspon od nižih (npr. FL160) do viših (npr. FL240),
- **režimi snage i brzine:** standardni „climb“, „cruise“ i „descent“ profili prema performansnim priručnicima,
- **gorivo:** referentni scenariji sa Jet A-1, uz modeliranje emisija za SAF kroz odgovarajuće faktore.

U okviru svakog leta na simulatoru prikupljani su podaci kao što su:

- **Block fuel** (gorivo od „off-block“ do „on-block“),
- **Trip fuel** (gorivo za segment leta),
- vreme penjanja, krstarenja i spuštanja,
- profil visine,
- prosečna brzina i prosečna potrošnja po satu i po NM.

Letovi su izvođeni u **konzistentnim uslovima** – sa kontrolom promenljivih koje bi mogle uneti dodatnu varijabilnost (na primer: ekstremni vetrovi, neuobičajeni vremenski uslovi). Kad god bi se desilo da simulacija odstupa od planiranih uslova (na primer, značajniji upliv vetra, neplanirane promene performansi), let je ponavljan. To je značilo ponekad i **duge sate u simulatoru**, ali je cilj bio jasan: dobiti **upotrebljiv, čist skup podataka** na bazi kojih mogu da se izvuku pouzdani zaključci.

Za svaki od 16 letova urađen je:

- obračun potrošnje goriva po segmentima,
- proračun emisije CO₂ na osnovu potrošnje goriva i faktora emisije,
- modeliranje kako bi izgledale emisije kad bi umesto Jet A-1 bio korišćen SAF (sa odgovarajućim smanjenjima u LCA kontekstu).

Ovih 16 letova nisu bili samo „brojevi“. To je bilo **ponavljanje realnosti u kontrolisanim uslovima**: isti vazduhoplov, slične rute, različite visine, sve ostalo što je bilo moguće držalo se konstantnim. Tako je bilo moguće jasno videti šta visina leta radi potrošnji, a šta tip goriva radi emisijama.

4. Bristell letovi – veza sa realnim nebom

Uporedo sa radom na simulatoru, analizirani su i **Bristell letovi** koje sam lično izvodio. Ovi letovi su bili:

- na malim visinama (tipično do 6.000–8.000 ft),
- sa Rotax 912iS motorom sa preciznim **fuel flow** podacima,
- u različitim režimima snage i konfiguracijama.

Za svaki od ovih letova beleženi su:

- ukupno vreme leta,
- prosečna potrošnja goriva,
- profil visine,
- režimi snage,
- meteorološki uslovi.

Zatim su na iste načine kao kod Dash 8 uračunate emisije CO₂. Iako je Bristell pripadao drugoj kategoriji vazduhoplova, ovi letovi su dali **bolje razumevanje stvarne situacije**: dajući odgovore na pitanja - šta znači svaki kilogram goriva u realnom letu, kako se oseća vazduhoplov u različitim režimima i kako se teorija iz knjiga prelama kroz realno iskustvo pilota i mehaničara.

Poteškoće i ograničenja – ono što se ne vidi u tabelama

Nijedno istraživanje nije idealno, ni metodološki ni praktično. Ova disertacija je naišla na više vrsta poteškoća:

Ograničen pristup realnim operativnim podacima: Detaljni podaci vazduhoplovnih kompanija o potrošnji goriva, masama, profilima leta i emisijama često su zaštićeni i ne dele se javno. Zbog toga je moralo da se radi sa kombinacijom:

- tehničke dokumentacije,
- tipičnih operativnih planova leta,
- simulatora,
- sekundarnih izvora.

To je zahtevalo vrlo pažljivo **ukrštanje izvora** da bi sve ostalo u okvirima realnosti.

Ograničenja simulatora: Simulator je jak alat, ali nije savršen. Bilo je potrebno uskladiti termine, poštovati režim rada simulatora, i voditi računa da svaki scenario bude što je moguće bliži planiranom. Neki letovi su morali da se ponavljaju, jer nisu ispunili početne uslove (na primer: neuobičajene promene vetra, greške u inicijalnom podešavanju).

Metodološke dileme oko SAF-a: SAF u realnim operacijama još uvek nije dostupan u dovoljnoj meri na svim destinacijama, a **LCA podaci** zavise od tipa sirovine, procesa proizvodnje i geografskog porekla. Zbog toga je morao da se usvoji **konzervativan i transparentan pristup** – koristiti raspon vrednosti smanjenja emisija (50–80%) i u zaključcima jasno naglasiti da su rezultati dati u okviru tog raspona, a ne kao apsolutne vrednosti.

Lični i profesionalni izazovi: Iza svih tabela, grafikona i referenci stoje i sasvim lični izazovi – usklađivanje vremena za disertaciju sa profesionalnim obavezama u vazduhoplovstvu, odgovornost prema studentima i klijentima, briga o porodici, letenje, održavanje vazduhoplova. Često je deo analize rađen kasno uveče, posle dana provedenog u hangaru, u kabini ili na aerodromu. Upravo zato ovaj rad za mene nije samo naučni dokument, već i **lični testament jednoj viziji održivog letenja**.

Rezultati – odgovori na hipoteze i ciljeve

Na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka, može se izvesti nekoliko ključnih zaključaka:

Uticaj visine leta na potrošnju goriva kod Dash 8 Q400: Rezultati iz 16 simuliranih letova pokazali su da se potrošnja goriva po pređenoj nautičkoj milji **smanjuje prelaskom sa nižih na srednje visine leta**, ali da to smanjenje ima svoj optimum. Na previše niskim visinama (na primer FL160) otpor je veći, a efikasnost pogonskog sistema nešto lošija; na previsokim visinama, dodatno gorivo utrošeno na penjanje i ograničenja performansi smanjuju ukupni

benefit. Najpovoljniji opseg za posmatrane uslove pokazao se **oko FL200–FL240**. Time je potvrđena hipoteza da **visina leta značajno utiče na potrošnju goriva** i da postoje visine leta na kojima Dash 8 Q400, za tipične regionalne rute, ostvaruje optimalan energetske bilans.

SAF i potrošnja goriva – tehnološka kompatibilnost: Poređenjem simulacija i podataka za Jet A-1 i modelirane scenarije sa SAF-om, utvrđeno je da **nema značajnog povećanja potrošnje goriva** pri korišćenju SAF-a. Blage razlike u energetske gustini nisu se prelile u merljiv i operativno značajan porast blok ili trip goriva. Drugim rečima, potvrđeno je da SAF može da se koristi kao „drop-in“ gorivo u turboprop pogonima Dash 8 Q400 **bez narušavanja performansi** i bez negativnog uticaja na domet ili nosivost. Time je potvrđena druga ključna hipoteza: SAF je ne samo ekološki, već i **operativno realan**.

Emisija CO₂ i životni ciklus goriva: Kada se posmatra **životni ciklus goriva - LCA**, rezultati jasno pokazuju da upotreba SAF-a dovodi do **značajnog smanjenja emisije CO₂ u odnosu na Jet A-1**. U zavisnosti od sirovine i tehnologije, smanjenje se kreće **od oko 50% do oko 80%**. To znači da, čak i kada su potrošnja goriva po NM i operativne performanse gotovo identične, **ugljenični otisak leta je radikalno manji** sa SAF-om. Time je potvrđena centralna ekološka hipoteza rada – da je SAF stvarni, a ne samo deklarativni alat za dekarbonizaciju.

Sinergija visine leta i vrste goriva: Ono što ovaj rad čini posebnim jeste dokazivanje da se najbolji rezultati ne postižu samo promenom goriva, **niti samo promenom visine leta**, već njihovom **kombinacijom**. Kada Dash 8 Q400 leti u optimalnom visinskom opsegu (FL200–FL240) i kada se koristi SAF, emisija CO₂ po NM se maksimalno smanjuje. To znači da **piloti, dispečeri i menadžment vazduhoplovnih kompanija** imaju u rukama konkretne operativne poluge – izbor profila leta i izbor goriva – kojima mogu aktivno da utiču na dekarbonizaciju svojih operacija.

Primena rezultata na ATR 72-600 i srpsku nacionalnu vazduhoplovnu kompaniju: Iako ATR 72-600 nije direktno testiran, njegova **sličnost sa Dash 8 Q400** u pogledu mase, visine krstarenja, dometa i uloge u floti omogućava da se rezultati ove disertacije, uz umerena prilagođavanja, **primene i na njega**. To znači da **srpska nacionalna vazduhoplovna kompanija**, koja koristi ATR 72-600, može da:

- razmotri **optimizaciju visine krstarenja** na regionalnim linijama, u skladu sa sličnim principima kao kod Dash 8 Q400;

- u planiranju buduće nabavke goriva i strategije održivosti uvažava **potencijal SAF-a** za smanjenje emisija;
- na nivou flote i mreže ruta planira **operativne i strateške korake** ka usklađivanju sa evropskim klimatskim ciljevima.

Lična dimenzija naučnog rada – između kabine, hangara i laboratorije

Iako je ova disertacija formalno naučni rad, za mene je ona i **lična priča**. Ona je nastala:

- iz hiljada sati provedenih u kokpitu, gledajući kako svaki obrtaj propelera i svaka promjena snage znače više ili manje goriva;
- iz sati provedenih u hangaru, pored motora, rezervoara i gorivnih sistema, razmišljajući kako svaka kap goriva koju sipamo danas utiče na vazduh koji će udisati sutra naša deca;
- iz večeri provedenih za računarom, sa tabelama, grafikonima, ICAO dokumentima i regulatornim tekstovima.

Proces istraživanja nije tekao linearno. Bilo je trenutaka kada je izgledalo da podaci nisu dovoljni, da simulacije ne daju „čist“ signal, da je previše nepoznatih u SAF-u, da je sve postalo previše kompleksno. Ali svaki put kada bih seo za simulator Dash 8 Q400 i „poleteo“ na još jedan od 16 letova, svaki put kada bih analizirao još jedan Bristell let, setio bih se **zašto** ovo radim: da letenje ostane moguće, ali da bude **održivo**.

Konačna sinteza

Ako bismo celu disertaciju morali da svedemo na nekoliko rečenica, one bi bile sledeće:

- **Istraživački problem** – nedovoljno poznavanje odnosa između visine leta, vrste goriva i emisije CO₂ kod regionalnih turboprop vazduhoplova – bio je jasno definisan i realan.
- **Istraživačko pitanje** – da li kombinacija optimalne visine leta i upotrebe SAF-a omogućava značajno smanjenje emisija CO₂ kod Dash 8 Q400 – dobilo je **neosporno potvrđan odgovor**.
- **Ciljevi istraživanja**– od kvantifikacije potrošnje goriva, preko poređenja Jet A-1 i SAF-a, do evaluacije primene na ATR 72-600 – **u potpunosti su ostvareni**.
- **Hipoteze** – o uticaju visine leta, operativnoj prihvatljivosti SAF-a, smanjenju emisija CO₂ i prenosivosti rezultata – **nedvosmisleno su potvrđene na osnovu dobijenih podataka**.

Ova doktorska disertacija pokazala je da **De Havilland Canada Dash 8 Q400** nije samo predmet tehničke analize, već i simbol onoga što regionalno vazduhoplovstvo može postati: segment saobraćaja koji nije samo ekonomski opravdan, već i **ekološki odgovoran**. Ona pokazuje da tranzicija ka održivom vazduhoplovstvu nije apstraktan cilj 2050. godine, već proces koji može da počne danas – kroz kombinaciju pametno izabranih visina leta i primene održivih goriva.

Za mene lično, ovaj rad je i poruka: da znanje koje stičemo kao piloti, mehaničari i istraživači nije tu samo da bi se upisalo u logbook, indeks ili CV, već da bi se pretvorilo u konkretne korake ka boljoj budućnosti letenja.

*U tom smislu, ova disertacija nije kraj jednog puta, već početak novog – puta ka vazduhoplovstvu koje će i dalje spajati gradove, države i ljude, ali uz **manji trag u atmosferi** i **veći trag odgovornosti** u svesti onih koji lete i onih koji letenje omogućavaju.*

LITERATURA

Zvanični izvori i međunarodni dokumenti

1. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Annex 16: Environmental Protection, Volume IV—Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Montreal: ICAO, 2019.
2. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Environmental Report 2022: Aviation and the Environment*. Montreal: ICAO, 2022.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: The Physical Science Basis*. Geneva: IPCC, 2023.
4. European Commission. *Fit for 55 Package: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*. Brussels: European Union, 2021.
5. European Commission. *ReFuelEU Aviation: Sustainable Aviation Fuels Initiative*. Brussels: Directorate-General for Mobility and Transport, 2023.
6. European Environment Agency (EEA). *Trends and Projections in Europe 2023: Tracking Progress towards Climate and Energy Targets*. Copenhagen: EEA, 2023.
7. U.S. Department of Energy (DOE). *Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge Roadmap*. Washington, D.C.: U.S. DOE, 2022.
8. Federal Aviation Administration (FAA). *Cleared for Takeoff: FAA's Role in the SAF Grand Challenge*. Washington, D.C.: FAA Office of Environment and Energy, 2023.
9. International Air Transport Association (IATA). *Fly Net Zero: IATA Net Zero by 2050 Roadmap*. Montreal/Geneva: IATA, 2022.
10. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *Paris Agreement*. Paris: United Nations, 2015.

Naučni i tehnički standardi

11. ASTM International. *ASTM D7566: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2023.
12. ASTM International. *ASTM D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2022.

13. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 14064-1: Greenhouse Gases — Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals*. Geneva: ISO, 2018.
14. De Havilland Aircraft of Canada. *Dash 8 Q400 Aircraft Operating Manual, Performance Section*. Toronto: De Havilland Canada, 2020.
15. Pratt & Whitney Canada. *PW150A Engine Maintenance Manual*. Longueuil, QC: Pratt & Whitney, 2021.
16. BRM Aero. *Bristell Aircraft Pilot Operating Handbook (POH)*. Kunovice: BRM Aero, 2023.
17. Rotax Aircraft Engines. *Rotax 915iS Installation Manual and Operator's Guide*. Gunskirchen: BRP-Rotax GmbH, 2024.
18. Garmin Aviation. *G3X Touch Pilot's Guide for Certified Aircraft*. Olathe, KS: Garmin Ltd., 2023.

Akadska literatura i naučni radovi

19. Lee, David S., et al. "The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing." *Atmospheric Environment* 244 (2021): 117834.
20. Schäfer, Andreas, et al. "Technological, Economic and Environmental Prospects of All-Electric Aircraft." *Nature Energy* 4, no. 2 (2019): 160–166.
21. Kivits, Rob, Graham Charles, and Paul Smith. "Sustainability in Aviation: Introduction of Biofuels." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15, no. 8 (2010): 535–540.
22. Dincer, Ibrahim, and Calin Zamfirescu. *Sustainable Aviation Energy Systems: Analysis, Design, and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2021.
23. Gössling, Stefan, and Andreas Humpe. "The Global Scale, Distribution and Growth of Aviation: Implications for Climate Change." *Global Environmental Change* 65 (2020): 102194.
24. Hileman, James I., et al. "Life Cycle Analysis of Alternative Jet Fuels." *MIT Laboratory for Aviation and the Environment Report*, 2010.
25. Timko, Michael T., et al. "Impact of Alternative Jet Fuels on Aircraft Emissions and Climate." *Environmental Science & Technology* 49, no. 10 (2015): 6015–6022.
26. Wilkerson, J. T., et al. "Avoiding Contrails by Changing Aircraft Altitude." *Environmental Science & Technology* 44, no. 24 (2010): 9277–9283.

27. Daggett, David, et al. *Alternative Fuels for Use in Commercial Aircraft*. NASA/TM-2008-215581. Hampton, VA: NASA, 2008.
28. Brasseur, Guy P., et al. "Impact of Aviation on Climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II." *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, no. 4 (2016): 561–583.
29. Gvozdenović Slobodan, *Performanse transportnih vazduhoplova*, Saobraćajni fakultet, Univerziteta u Beogradu, Srbija, (2011).
30. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Menadžment organizacije leta putničkog aviona u zavisnosti od nivoa leta*, MESTE FBIM Transactions, No. 1/3, 130-138, Beograd, Srbija, (2015).
31. Isakovic Velimir, *Veliki povratak turbo-prop tehnologije*, Udruženje linijskih pilota Srbije, <http://www.udruzenjepilota.org/arhiva/08/06/080626ge.htm>, Beograd, Srbija, (2006).
32. Dragan A. Lazić, *Analiza uticaja nivoa leta na potrebno putno gorivo i vreme transportnog aviona performansi klase A*, Master rad, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija, (2013).
33. Mirosavljević Petar, *Upravljačke aktivnosti vazduhoplovnih kompanija u cilju smanjenja potrošnje goriva*, Zbornik radova 35. Simpozijuma o operacionim istraživanjima - SYM-OP-IS, Soko Banja, Srbija, (2008).
34. Spakovszky Zoltan, *Unified Propulsion Lecture I. Récupéré sur Unified Engineering Lecture Notes*, MIT:
<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/UnifiedPropulsion3/UnifiedPropulsion3.htm>, (2008).
35. Swatton Peter J., *Aircraft Performance Theory and Practice for Pilots*, John Wiley & Sons Ltd, New York, USA, (2008).
36. Milosavljević Đordje, *Unapređenje sistema upravljanja zaštitom životne sredine po standardima ISO 14000*, Istraživanja i projektovanja za privredu, Engineering and Science, 41-48, Beograd, Srbija, (2003).
37. Mitrović Časlav, Golubović Zoran, Šešlija Dragan, *Filtracija fluida i separacija štetnih materija kod vazduhoplova*, Istraživanja i projektovanja za privredu, Journal of Applied Engineering Science, No. 10/3, 7-20, Beograd, Srbija, (2005).
38. Mitrović Časlav, Golubović Zoran, Šešlija Dragan, *Implementacija, značaj i efekti filtracije u privredi*, Istraživanja i projektovanja za privredu, Journal of Applied Engineering Science, No. 12, 13-20, Beograd, Srbija, (2006).

39. Gvozdenović Slobodan, Mirosavljević Petar, Čokorilo Olja, *Vazduhoplovna prevozna sredstva*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija, (2005).
40. Biro za statistiku saobraćaja, *Obrazac 41*, Data Base Products, Inc. Ascend Online Fleets, Beograd, Srbija, (2013).
41. Lazić Dragan A., Grujić Vladimir, Tanasković Marko, *The Role of Flight Simulation in Flight Training of Pilots for Crisis Management*, South Florida Journal of Development, No. 3/3, 3624-3636, Miami, Florida, USA, (2022).
42. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Značaj upotrebe tehnologija sledeće generacije na krize u vazduhoplovstvu*, MESTE FBIM Transactions, No. 8/1, 54-71, Beograd, Srbija, (2020).
43. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Mogućnost upotrebe lake generalne avijacije u kriznim situacijama*, MESTE FBIM Transactions, No. 2, 91-102, Beograd, (2016).
44. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Značaj primene kriznog menadžmenta u pripremi pilota*, MESTE FBIM Transactions, No. 2, 141-154, Beograd, Srbija, (2014).
45. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Završna faza leta vazduhoplova kao element kriznog menadžmenta u vazduhoplovstvu Deo 1.*, MESTE FBIM Transactions, No. 1, 92-105, Beograd, Srbija, (2013).
46. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Završna faza leta vazduhoplova kao element kriznog menadžmenta u vazduhoplovstvu Deo 2.*, MESTE FBIM Transactions, No. 2, 109-121, Beograd, Srbija, (2013).
47. Lazić Dragan A., Grujić Vladimir, Tanasković Marko, *The Role of Flight Simulation in Flight Training of Pilots for Crisis Management*, Synthesis – International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research, Singidunum University, 214-221, Belgrade, Serbia, (2020).
48. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Management of the Flight transport Aircraft depending of the Flight Level*, Conference paper, EKOB2018, Belgrade, Serbia, (2018).
49. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Flight Simulators in Prevention of Aviation Crisis*, Conference paper, „Management and Law 2018“, Belgrade, Serbia, (2018).
50. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Opportunities for using light general aviation in the situations of crisis*, International Journal of Economics, Business and Management Research, New York, NY, USA, (2017).

51. Grujić Vladimir, Lazić Dragan A., *Opportunities for using light general aviation in the situations of crisis*, Conference paper, „Management 2016“, Belgrade, Serbia, (2016).
52. Lazić Dragan A., Grujić Vladimir, *Crisis Management in Aviation*, LAP Lambert Academic Publishing, Mauritius, (2018).
53. Joksimoć Vladan, Stevanović Milan, Marjanović Zoran, *Biogoriva – Prednosti i nedostaci upotrebe*, Festival kvaliteta 2008., 3. Konferencija o kvalitetu života, Asocijacija za kvalitet i standardizaciju Srbije, Kragujevac, Srbija, (2008).
54. Preradović Milica, Papuga Saša, *Biogoriva treće generacije – procesi uzgajanja i dobijanja goriva iz mikroalgi*, *Zaštita materijala*, No. 62/4, 249-261, Inženjersko društvo za koroziju, Beograd, Srbija, (2021).
55. Vitošević Saša, *Obnovljivi izvori energije i zaštita životne sredine*, Global Seed – poslovni sistem, Čurug, Srbija, (2022). <https://www.globalseed.info/obnovljivi-izvori-energije.php1036>. Energetski portal, *Obnovljivi izvori energije: Šta je BIODIZEL, kako se pravi i ko bi imao najviše koristi od njegovog korišćenja?*, Nacionalna Geografija, Beograd, Srbija, (2021).
56. Mladenović Darko, *Ekologija u vazduhoplovstvu – od vodonika do orahove palme*, Planeta Galaksija, Magazin za nauku, istraživanje i otkrića / Aeronautika, Belmedia d.o.o., Beograd, Srbija, (2022). www.planeta.rs/37/4%20aeronautika.htm
57. Čokorilo Olja, Slobodan Gvozdenović, Miroslavljević Petar, Vasov Ljubiša, *Uticaj emisije štetnih gasovavazduhoplova na životnu sredinu*, *Istraživanja i projektovanja za privredu*, No. 8/3, članak 180, 123-138, Beograd, Srbija, (2010).
58. Peeters P.M., Middel J., Hoolhorst A., *Fuel efficiency of commercial aircraft – An overview of historical and future trends*, National Aerospace Laboratory NLR, The German Federal Environment Agency UBA, (2005).
59. Radaković Duško, Cvetković Dragan, Radaković Zoran, *Biomimikrija – Osnova održive budućnosti*, Četvrti naučno-stručni skup POLITEHNIKA2017, Visoka škola poslovnih studija Beogradska Politehnika, 249-254, Beograd, Srbija, (2017).

Industrijski i strateški izveštaji

60. Boeing Commercial Airplanes. *Sustainability Report 2024: Path to Net-Zero Aviation*. Chicago: Boeing, 2024.

61. Airbus SE. *Global Market Forecast 2024–2043: Pioneering Sustainable Aerospace*. Toulouse: Airbus, 2024.
62. Rolls-Royce plc. *Pathway to Net Zero: Sustainable Power for the Future*. Derby, UK: Rolls-Royce, 2023.
63. Neste Oyj. *Neste MY Sustainable Aviation Fuel Technical Data Sheet*. Espoo, Finland: Neste, 2023.
64. World Energy. *Sustainable Aviation Fuel Production Overview*. Los Angeles, CA: World Energy, 2022.
65. H55 SA. *Electric Aviation Solutions and Battery Systems White Paper*. Sion, Switzerland: H55 SA, 2024.
66. Air Serbia. *Sustainability and Fleet Modernization Report 2023*. Belgrade: Air Serbia, 2023.
67. European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Environmental Protection and Sustainability in Aviation: Annual Report 2023*. Cologne: EASA, 2023.

Dodatni izvori i istraživanja

68. International Energy Agency (IEA). *Tracking Aviation 2023*. Paris: IEA, 2023.
69. Federal Aviation Administration (FAA). *Aviation Climate Action Plan*. Washington, D.C.: FAA, 2021.
70. United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2023*. Nairobi: UNEP, 2023.
71. Society of Flight Test Engineers (SFTE). *Proceedings of the 2024 Symposium on Sustainable Flight Test Operations*. Mojave, CA: SFTE, 2024.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	- 2 -
1 UVODNA RAZMATRANJA	- 5 -
2. TEORIJSKA ZASNOVANOST ISTRAŽIVANJA	- 11 -
2.1. STRUKTURA PRVIH GORIVA I ZAČETNE IDEJE O NJIHOVOM RAZVOJU	- 11 -
2.1.1. Hemijska struktura i karakteristike goriva: poređenje tradicionalnih, savremenih i održivih izvora	- 12 -
2.2. FOSILNA GORIVA U VAZDUHOPLOVNOJ INDUSTRIJI	- 14 -
2.2.1. Istorija naftnih goriva u vazduhoplovstvu	- 15 -
2.3. ODRŽIVA VAZDUHOPLOVNA GORIVA - SAF	- 19 -
2.3.1. Istorijat održivog vazduhoplovnog goriva - SAF	- 19 -
2.3.2. Istorijat SAF-a u kontekstu vojnog i civilnog vazduhoplovstva, sa posebnim osvrtom na Evropu i SAD	- 22 -
2.4. PERFORMANSE VAZDUHOPLOVA I UTICAJ VISINE LETA	- 26 -
2.5. EMISIJE CO₂ I MEĐUNARODNI STANDARDI	- 29 -
2.6. OPERATIVNE STRATEGIJE ZA SMANJENJE EMISIJA	- 45 -
3. PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA	- 62 -
3.1. PRISTUP PROBLEMU ISTRAŽIVANJA	- 62 -
3.2. DEFINISANJE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA	- 63 -
3.3. DEFINISANJE OSNOVNIH PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	- 64 -
3.4. VARIJABLE I INDIKATORI	- 66 -
3.5. ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA	- 67 -
3.6. CILJ, ZADACI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	- 68 -
3.6.1. Cilj istraživanja	- 68 -
3.6.2. Zadaci istraživanja	- 69 -
3.6.3. Hipoteze istraživanja	- 70 -
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	- 71 -
4.1. BOMBARDIER DASH 8 Q400 – TEHNIČKO-OPERATIVNA ANALIZA I ZNAČAJ U ODRŽIVOM VAZDUHOPLOVSTVU	- 71 -
4.1.1. Istorijat razvoja serije Dash 8	- 72 -

4.1.2. Bombardier Dash 8 sa električnim pogonom – nova era regionalnog vazduhoplovstva	- 77 -
4.1.3. Tehničko poređenje – Bombardier Dash 8-Q400 i Električna / Hibridna verzija	- 79 -
4.2. BRISTELL NG5 SA ROTAX 912IS POGONSKOM GRUPOM – PRIMER ENERGETSKI EFIKASNOG LAKOG VAZDUHOPLOVA	- 83 -
4.2.1. Bristell Energic – Elektrifikacija lakog vazduhoplovstva	- 84 -
4.2.2. Komparativni test: Bristell NG5 (Rotax 912iS) i Bristell Energic (H55)	- 87 -
4.2.3. Energetska efikasnost Rotax pogonskih sistema i uticaj na emisije CO₂	- 89 -
4.3. METODE I TEHNIKE ISTRAŽIVANJA	- 91 -
4.4. INSTRUMENTI ZA ISTRAŽIVANJE	- 92 -
4.4.1. Skala procene	- 93 -
4.4.2. Simulator letenja X-Plane 12 Pro	- 94 -
4.5. UZORAK ISTRAŽIVANJA	- 96 -
4.6. ORGANIZACIJA I TOK ISTRAŽIVANJA	- 97 -
4.7. STATISTIČKA OBRADA PODATAKA	- 98 -
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	- 100 -
5.1. KARAKTERISTIKE LETOVA I METODOLOGIJA	- 102 -
5.1.1. Metodologija obrade realnih letova	- 104 -
5.2. DESKRIPTIVNA ANALIZA	- 115 -
5.3. FAKTORSKA ANALIZA	- 116 -
5.4. KVANTITATIVNA ANALIZA	- 117 -
5.4.1. Analiza emisija CO₂ i scenariji održivog vazduhoplovnog goriva	- 119 -
5.5. KANONIČKA KORELACIONA ANALIZA	- 121 -
5.5.1. Kanonički model – matematička formulacija	- 122 -
5.5.2. Matematički model kanoničke korelacione analize	- 125 -
LITERATURA	- 135 -
ZVANIČNI IZVORI I MEĐUNARODNI DOKUMENTI	- 135 -
NAUČNI I TEHNIČKI STANDARDI	- 135 -
AKADEMSKA LITERATURA I NAUČNI RADOVI	- 136 -
INDUSTRIJSKI I STRATEŠKI IZVEŠTAJI	- 139 -
DODATNI IZVORI I ISTRAŽIVANJA	- 140 -

SADRŽAJ**- 141 -****PRILOZI****- 144 -**

PRILOZI