

Generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju

Soldo Jocić, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:001147>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-29**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Matej Soldo Jocić

**GENERIČKI MODEL ZA PROCJENU VERTIKALNE
UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA U PRILAZU I PENJANJU**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**GENERIČKI MODEL ZA PROCJENU VERTIKALNE
UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA U PRILAZU I PENJANJU**

**A GENERIC MODEL FOR EVALUATION OF VERTICAL FLIGHT
EFFICIENCY IN CLIMB AND DESCENT PHASES**

Mentor: nasl. doc. dr. sc. Zvonimir Rezo

Student: Matej Soldo Jocić

JMBAG: 0135257574

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 22. svibnja 2024.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Upravljanje zračnom plovidbom**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7503

Pristupnik: **Matej Soldo Jocić (0135257574)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**
Zadatak: **Generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je opisati predmet istraživanja, te objasniti svrhu i ciljeve istraživanja. Uz navedeno, rad treba sadržavati pregled literature u području istraživanja te kratki pregled strukture diplomskog rada. U nastavku je potrebno definirati (ne)učinkovitost leta zrakoplova, te opisati problematiku praćenja vertikalne (ne)učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju. Rad u nastavku treba sadržavati opis razvoja generičkog modela za praćenje vertikalne učinkovitosti leta, uključujući opis metodološkog i konceptualnog okvira razvijenog modela te ograničenja vezanih uz njegovu primjenjivost. U nastavku je potrebno provesti praktičnu primjenu razvijenog modela. U tu svrhu potrebno je definirati i opisati istraživačke odrednice studije slučaja. Potom je u radu potrebno dati pregled i interpretaciju izlaznih vrijednosti dobivenih primjenom razvijenog modela na studiji slučaja. Prije specifikacije korištene znanstvene i druge literature, potrebno je izvesti zaključno rezimiranje promatrane problematike i definirati smjernica daljeg istraživanja i razvoja u području istraživanja.

Mentor

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

nasl. doc. dr. sc. Zvonimir Rezo

Sažetak:

Vertikalna učinkovitost leta zrakoplova ključna je za procjenu ekonomskih i okolišnih utjecaja sustava upravljanja zračnim prometom (*Air Traffic Management - ATM*). Vertikalne neučinkovitosti leta rezultiraju povećanim utjecajem na okoliš i nameću financijske terete korisnicima zračnog prostora. Operacije kontinuiranog penjanja i poniranja se preporučuju kako bi se riješili ovi problemi. Ovaj rad predstavlja generički model za kvantificiranje vertikalnih neučinkovitosti leta i predstavlja empirijske rezultate koji ilustriraju njihov ekonomski i ekološki utjecaj. Osim toga, detaljno opisuje pozadinu istraživanja, konceptualni i metodološki okvir, te predstavlja rezultate provedene studije slučaja za prikaz primjene modela. Model pomaže identificirati optimalne strategije za poboljšanje učinkovitosti leta, promičući održivi razvoj ATM sustava, što je prikazano u sažetku rezultata ovog rada.

Ključne riječi: upravljanje zračnim prometom; vertikalna učinkovitost leta; generički model

Summary:

Vertical flight efficiency is crucial for assessing the economic and environmental impacts of Air Traffic Management (ATM) systems. Vertical flight inefficiencies result in increased environmental impact and impose financial burdens on airspace users. Continuous climb and descent operations are recommended to address these issues. This paper introduces a generic model for quantifying vertical flight inefficiencies and presents empirical results illustrating their economic and ecological impact. Additionally, it details the research background, conceptual and methodological framework, and presents case study results to demonstrate the model's application. The model helps identify optimal strategies for improving flight efficiency, promoting the sustainable development of the ATM system, as summarized in the paper's findings.

Key words: Air Traffic Management; Vertical Flight Efficiency; generic model

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
1.1. Struktura rada.....	2
1.2. Pregled bibliografskih izvora.....	4
1.3. Motivacija, svrha i ciljevi istraživanja.....	4
2. Pojam učinkovitosti leta zrakoplova.....	7
3. Problematika vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.....	13
3.1. Operacije kontinuiranog penjanja.....	17
3.2. Operacije kontinuiranog poniranja.....	19
4. Razvoj generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.....	23
4.1. Konceptualni okvir.....	23
4.1.1. Segment podataka o letu.....	26
4.1.2. Segment procjene goriva.....	27
4.1.3. Segment analize troškova i koristi.....	28
4.2. Metodološki okvir.....	29
5. Primjena generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.....	34
5.1. Opis skupa podataka.....	34
5.2. Istraživačke odrednice studije slučaja.....	38
6. Sinteza rezultata studije slučaja.....	46
6.1. Analiza rezultata detekcije profila letova.....	47
6.1. Deskriptivna analiza neučinkovitosti faze penjanja.....	49
6.2. Deskriptivna analiza neučinkovitosti faze poniranja.....	53
7. Prijedlog poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju.....	60
7.1. Strateške smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.....	60
7.1.1. Strateške smjernice na globalnoj razini.....	61
7.1.2. Strateške smjernice na regionalnoj razini.....	63

7.2. Praktične smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova	65
7.2.1. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti Mrežnog upravitelja	66
7.2.2. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti pružatelja usluga u zračnoj plovidbi	67
7.2.2.1. Dizajn zračnog prostora i oblikovanja letačkih postupaka	67
7.2.2.2. Usluga kontrole zračnog prometa pružatelja usluga u zračnoj plovidbi.....	70
7.2.3. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti korisnika zračnog prostora	74
7.2.4. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti operatora aerodroma	77
7.2.5. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti državnih zrakoplovnih vlasti	78
8. Zaključak.....	80
Literatura.....	84
Popis kratica.....	95
Popis slika	97
Popis grafikona	98
Popis tablica	99

1. UVOD

Poboljšanje učinkovitosti leta zrakoplova predstavlja jedan od strateških ciljeva sustava upravljanja zračnim prometom (*Air Traffic Management – ATM*). Težnja prema poboljšanju učinkovitosti leta potaknuta je kako ekonomskim, tako i ekološkim imperativima. Učinci neučinkovitosti leta mogu prouzročiti dodatnu potrošnju goriva, povećanje štetnih emisija te viših operativnih troškova, što je, u konačnici, nepovoljno kako za dionike industrije zračnog prometa, tako i za okoliš i općenito društvo. Stoga je poboljšanje učinkovitosti leta ključno za postizanje održivih praksi upravljanja zračnim prometom. Unatoč napretku u prikupljanju i analizi podataka o letovima, pregled literature ukazuje da i dalje postoji nedostatak sveobuhvatnih istraživanja i modela koji procjenjuju i analiziraju učinkovitost leta koristeći detaljne podatke o putanji leta. Tako primjerice trenutni modeli u području istraživanja često ne uzimaju u obzir različite čimbenike koji imaju utjecaj na procjenu učinkovitosti leta. Navedeni nedostatak naglašava potrebu za holističkim pristupom valorizaciji nastalih učinaka koji vodi ka robusnijim uvidima odnosno, u konačnici, poboljšanju učinkovitosti leta, naročito slijedom omogućavanja potrebnih preduvjeta proizašlih tehnološkim i legislativnim razvojem sustava upravljanja zračnim prometom.

U europskom zračnom prostoru prometna potražnja kontinuirano raste, što predstavlja značajan izazov za europski sustav upravljanja zračnim prometom. Rješavanje ovog izazova zahtijeva razvoj novog koncepta sposobnog za zadovoljavanje budućih potreba prometa. Međutim, prije ciljanog implementiranja novih rješenja i provedbe različitih projekata za unapređenje trenutnog sustava, ključno je poboljšati učinkovitost sadašnjeg sustava, posebno u područjima kao što je učinkovitost leta. Učinkovitost ili bolje rečeno neučinkovitost sustava upravljanja zračnim prometom vidljiva je kroz značajne financijske troškove i zagađenje okoliša povezane između ostalog, s neučinkovitošću leta zrakoplova. Stoga, nužnost za poboljšanjem učinkovitosti leta ne proizlazi samo iz mogućnosti ostvarivanja troškovnih ušteda, već i iz mogućnosti minimiziranja utjecaja zračnog prometa na okoliš. Naglasak na ekonomskim i ekološkim aspektima ističe važnost unapređenja učinkovitosti sustava upravljanja zračnim prometom prije poduzimanja širih sustavnih promjena. Postizanje ovih poboljšanja zahtijeva sveobuhvatan pristup koji uključuje optimizaciju putanje leta, unaprjeđenje sustava dizajna letačkih postupaka, smanjenje potrošnje goriva i implementaciju naprednih tehnologija i procedura koje kroz unapređenje sustava upravljanja zračnim

prometom doprinose općem poboljšanju u domeni učinaka generiranih od strane industrije zračnog prometa.

Istraživanje stanja, uzročno-posljedičnih veza, kao i minimiziranje učinka problema neučinkovitosti leta zrakoplova, zasigurno doprinosi tome da europski sustav upravljanja zračnim prometom bolje odgovori na buduće izazove, istovremeno promovirajući ekološku osviještenost i troškovnu učinkovitost zračnog prometa. Shodno navedenom, svrha rada jest praćenjem vertikalne učinkovitosti leta, utvrditi i putem deskriptivnih metoda obrazložiti utjecaj različitih čimbenika koji generiraju neučinkovitost profila leta zrakoplova u prilazu i penjanju. Također, osnovu istraživanja podrazumijeva osmišljeni generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u fazama penjanja i poniranja. Inovativnost istraživanja se prvenstveno očituje u smislu interdisciplinarnosti, primjene različitih tehnologija, matematičkih metoda, te konceptualnih i metodoloških okvira usvojenih u svrhu objektivnog prikaza razine vertikalne (ne)učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju. Također, inovativnost istraživanja očituje se i odmakom od postojeće prakse izražavanja vertikalne (ne)učinkovitosti putem relativnih vrijednosti, na način da su rezultati primjene generičkog modela također izraženi i kroz apsolutne vrijednosti, tako aproksimirajući učinke na okoliš, te na troškovnu učinkovitost. Razvijeni model u sklopu ovog istraživanja isključuje ovisnost o prostornim i vremenskim varijablama, omogućivši tako njegovu raznovrsnu primjenu u različitim geografskim, temporalnim i operativnim scenarijima diljem svijeta. Dodatno, kako bi se potvrdila pouzdanost i vjerodostojnost razvijenog modela, provedena je studija slučaja koja je analizirala povijesni skup podataka od deset letova. Provedena studija slučaja je služila kao potvrda učinkovitosti modela u stvarnim operativnim scenarijima, što dodatno naglašava njegov potencijalni doprinos području istraživanja, poboljšanju performansi i održivosti sustava upravljanja zračnim prometom.

1.1. Struktura rada

Rad pod naslovom: *Generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju* sastoji se od sljedećih osam poglavlja:

1. Uvod,
2. Pojam učinkovitosti leta zrakoplova,
3. Problematika vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova,
4. Razvoj generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova,
5. Primjena generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova,

6. Sinteza rezultata studije slučaja,
7. Prijedlog poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju
8. Zaključak.

Nakon uvodnog poglavlja, koji opisuje strukturu rada, bibliografske izvore, motivaciju, svrhu i istraživačke ciljeve, slijedi poglavlje *Pojam učinkovitosti leta zrakoplova*. Poglavlje predstavlja teorijsku pozadinu istraživačkog područja učinkovitosti leta. Osim toga, poglavlje naglašava temeljne principe i koncepte učinkovitosti leta, ističući važnost praćenja performansi sustava upravljanja zračnim prometom radi optimizacije učinkovitosti leta. Nadalje, poglavlje pruža osvrt na teorijsku pozadinu, odnosno trenutno stanje u području istraživanja horizontalne učinkovitosti leta, te predstavlja temelj za nadolazeća poglavlja rada u pogledu dubljeg razumijevanja učinkovitosti leta.

U trećem poglavlju *Problematika vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova* analizirana su prethodna istraživanja u području vertikalne učinkovitosti leta, te su istaknuti ključni nalazi. Nadalje, poglavlje definira problematiku, važne pojmove i koncepte vertikalne učinkovitosti leta, osiguravajući jasnoću i razumijevanje područja istraživanja. Spomenutim poglavljem se dodatno naglašava važnost i doprinos istraživanja u ovom području.

Četvrto poglavlje pod nazivom *Razvoj generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova* predstavlja konceptualni okvir i metodološki okvir koji su primijenjeni tijekom razvoja generičkog modela. Pri tome, konceptualni okvir generičkog modela pruža strukturiran prikaz ključnih pojmova i principa relevantnih za razvoj modela, ilustrirajući njihove međusobne odnose i time objašnjava teorijski okvir koji podupire istraživanje. Paralelno s tim, metodološki okvir opisuje specifične postupke i tehnike korištene za prikupljanje i analizu podataka, osiguravajući da je metodologija usklađena s ciljevima i hipotezama istraživanja.

Sljedeće poglavlje, *Primjena generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova*, detaljno opisuje skup podataka i definira prostorne i vremenske odrednice ključne za provedbu studije slučaja.

U šestom poglavlju pod nazivom *Sinteza rezultata studije slučaja*, analiziraju se i objedinjuju nalazi provedene studije slučaja. Poglavlje pruža temeljitu analizu rezultata vezanih uz detekciju profila leta, posebno ističući uočene neučinkovitosti tijekom faza penjanja i poniranja zrakoplova.

U okviru sedmog poglavlja pod nazivom *Prijedlog poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju* opisani su prijedlozi i mjere putem kojih svaki dionik sustava zračnog prometa može utjecati na poboljšanje vertikalne učinkovitosti leta. Osim toga, navedeni prijedlozi poboljšanja su povezani s rezultatima studije slučaja kako bi se, na dodatan način, produbili nalazi provedenog istraživanja.

Zaključno osmo poglavlje objedinjuje ključne informacije i sintetizira najznačajnije rezultate istraživanja. Osim toga, pruža sveobuhvatnu analizu temeljnih podataka i nudi sintetizirani pregled glavnih ishoda izvedenih iz studije slučaja.

1.2. Pregled bibliografskih izvora

U okviru istraživanja, korišteni su raznovrsni bibliografski izvori kako bi se osigurala temeljita analiza područja istraživanja. Preciznije, područje istraživanja podrazumijeva područje vertikalne učinkovitosti leta. Osim znanstvenih i stručnih radova, u analizi su uključene norme i relevantni zakonodavni akti, kao i smjernice koje su definirale strukturu i funkciju vertikalne učinkovitosti leta. Također, istraživanje je koristilo različita izvješća publicirana na regionalnoj i međunarodnoj razini. Prvenstveno kako bi se dobiveni rezultati istraživanja postavili u relevantni kontekst, te usporedili rezultati istraživanja s već postojećim saznanjima i trendovima publiciranim od strane industrije i akademske zajednice.

Analiza bibliografskih izvora ukazuje na pretežno korištenje znanstvenih i stručnih radova, što je omogućilo teorijsku podlogu za provedbu istraživanja. Nadalje, značajan dio literature obuhvaća dokumente objavljene od strane Europske organizacije za sigurnost zračne plovodbe (EUROCONTROL), čije je sjedište u Bruxellesu, glavnom gradu Belgije. Dokumenti uključuju izvješća, priručnike i smjernice, koji su se pokazali ključnima za razumijevanje složenosti područja istraživanja. Sveobuhvatno, korištene bibliografske izvore karakterizira visoka provjerljivost i vjerodostojnost informacija, što osigurava pouzdanost i reprezentativnost analize provedenog istraživanja.

1.3. Motivacija, svrha i ciljevi istraživanja

Rad opisuje generički model razvijen za provođenje sveobuhvatne i istovremene procjene performansi leta u dva koraka. Prvi korak procjenjuje neusklađenost trajektorija letova s okvirima operacija kontinuiranog penjanja (*Continuous Climb Operations* - CCO) i operacija kontinuiranog poniranja (*Continuous Descent Operations* - CDO). Drugi korak

analizira rezultate operativnih učinaka u pogledu operativnih posljedica i ekološke održivosti. Ključna razlika ovog modela od postojećih modela u području istraživanja jest njegov naglasak na kvantificiranju apsolutnih vrijednosti potrošnje goriva, rezultirajućih troškova i emisija generiranih tijekom faza penjanja i poniranja.

Za razliku od relativnih vrijednosti, koje mogu dovesti u zabludu zbog proporcionalnog skaliranja, apsolutne vrijednosti pružaju jasnije razumijevanje širih utjecaja, poboljšavajući analizu na većim uzorcima. Na primjer, potrošnja goriva izravno utječe na operativne troškove i okoliš, dok emisije onečišćujućih tvari, kao što su vodena para (H₂O), sumporov dioksid (SO₂) i ugljični dioksid (CO₂) doprinose degradaciji kvalitete zraka i klimatskim promjenama. Kvantificiranje spomenutih vrijednosti kao apsolutnih vrijednosti omogućuje modelu uspostavljanje pouzdanog okvira za točnu procjenu ukupnih utjecaja performansi leta. Također, navedeni pristup poboljšava sposobnost donošenja informiranih odluka usmjerenih na optimizaciju operativne učinkovitosti i minimiziranje štete za okoliš u području upravljanja zračnim prometom.

Svrha istraživanja je primijeniti razvijeni model na nasumično odabranom skupu profila letova. Prvenstveno kako bi se identificirale neučinkovitosti tijekom faza penjanja i poniranja, te procijenile neučinkovitosti u smislu dodatne potrošnje goriva, generiranih emisija i operativnih troškova. Pri tome, kako samo istraživanje, tako i generički model, usklađeni su sa globalnim težnjama za ekološki prihvatljivijim i održivijim sustavom upravljanja zračnim prometom kroz optimizaciju vertikalne učinkovitosti leta prilagodljivu različitim operativnim postavkama diljem svijeta.

Istraživanje se temelji na polaznoj hipotezi (H₀) da integracija postojećeg metodološkog okvira za praćenje i izvješćivanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova s odrednicama analize troškova i koristi (*Cost-Benefit Analysis* - CBA), nudi veću jasnoću i razumijevanje od trenutnih praksi.

Cilj ovog istraživanja je pružiti detaljan uvid u rezultate istraživanja i razvoja (*Research and Development* - R&D) generičkog modela, s naglaskom na kvalitativne i kvantitativne aspekte. Pored toga, istraživanje ima za cilj pružiti uvid u primjenu i rezultate proizašle iz implementacije modela. Slijedom navedenog, istraživanje ima za cilj olakšati razumijevanje i povećati svijest o utjecaju operativnih praksi tijekom faza prilaza i penjanja na ekološku održivost i troškovnu učinkovitost. Opisani holistički pristup ima za cilj pružiti uvide koji mogu

informirati donositelje odluka o optimizaciji operacija zrakoplova, čime se smanjuju ekološki otisci i poboljšava ekonomičnost u sustavu upravljanja zračnim prometom.

Očekivani ishod istraživanja je prikaz korelacije između utvrđenih neučinkovitosti leta i povećane potrošnje goriva, operativnih troškova i emisija. U konačnici, motivacija za razvoj ovog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta tijekom faza penjanja i poniranja je potpora informiranom donošenju odluka i daljnja optimizacija dostupnih resursa. Razvijeni model pruža ključne informacije za optimizaciju leta uzimajući u obzir stvarne ekonomske i ekološke implikacije različitih operativnih postavki unutar domene sustava upravljanja zračnim prometom.

2. POJAM UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA

Učinkovitost se, u najširem smislu, smatra mjerom u kojoj se ostvaruju planirane radnje i postižu planirani rezultati [1]. Učinkovitost leta je generički pojam koji može obuhvaćati različite koncepte i definicije. Zbog svojih značajnih izravnih ekonomskih i okolišnih utjecaja, učinkovitost leta predstavlja aktualno istraživačko područje [2][3][4]. Prema Mihetecu i suautorima [5], učinkovitost leta, kao generički pojam, podrazumijeva kompromise između elemenata od značajne važnosti za industriju zračnog prometa, od kontrole zračnog prometa, operatora zrakoplova do krajnjih potrošača. Povrh toga, Mihetec i suautori navode da je jedan od najznačajnijih kompromisa učinkovitosti leta - sigurnost nasuprot kapacitetu. Nadalje, vrijednosti kapaciteta trebale bi biti veće kako bi zadovoljile rastuću potražnju, ali ne bi trebale utjecati na smanjenje prihvatljivih razina sigurnosti. Mnogi autori smatraju praćenje pokazatelja učinkovitosti leta nužnim za unaprjeđenje sustava upravljanja zračnim prometom. Na primjer, Leones i suautori [6] navode da praćenje pokazatelja učinkovitosti postaje sve važnije kako bi se omogućilo bolje razumijevanje pokretača učinkovitosti leta u sustavu upravljanja zračnim prometom. Svrha sustava upravljanja zračnim prometom je ostvarivanje ravnoteže između potražnje i kapaciteta sustava zračnog prometa kako bi se osiguralo optimalno i učinkovito korištenje zračnog prostora [7].

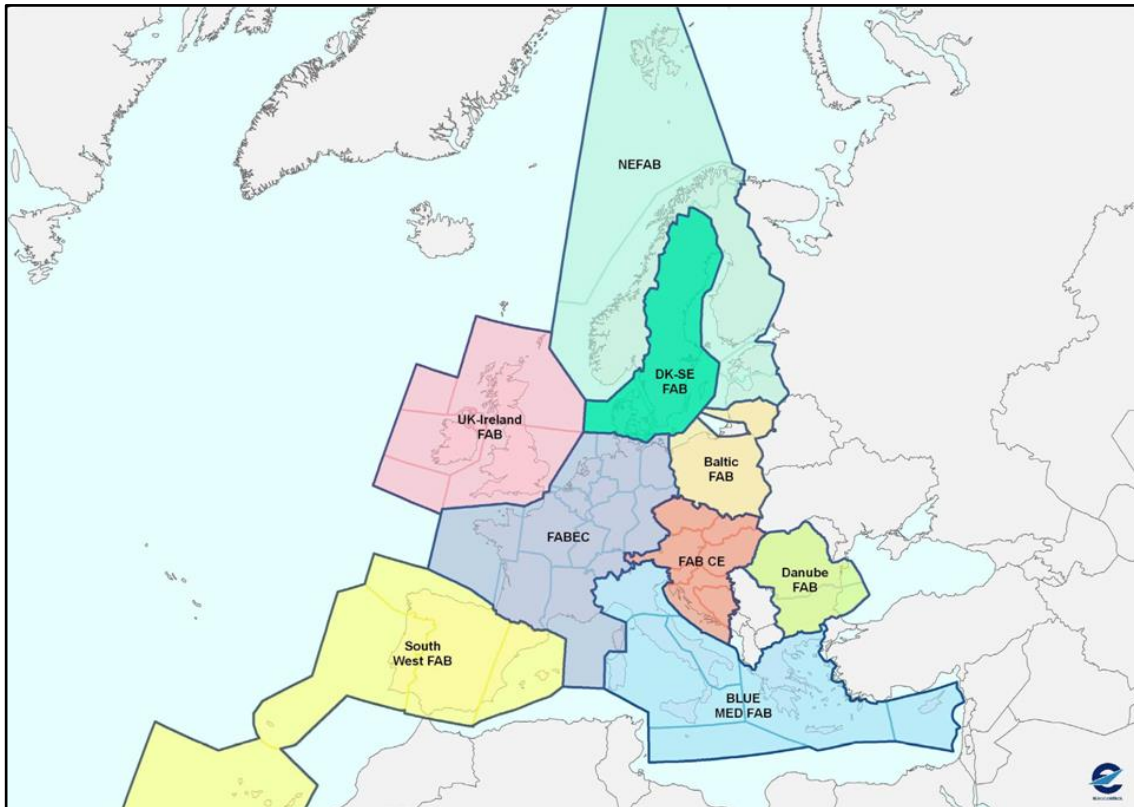
Na međunarodnoj razini, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (*International Civil Aviation Organization* - ICAO) identificirala je ključne pokazatelje uspješnosti (*Key Performance Indicators* - KPIs) učinkovitosti leta unutar Globalnog plana zračne navigacije (*Global Air Navigation Plan* - GANP) [8]. Globalni plan zračne navigacije služi kao smjernica za razvoj globalnog sustava upravljanja zračnim prometom i usklađen je s Globalnim operativnim konceptom za upravljanje zračnim prometom (*Global Air Traffic Management Operational Concept* – GATMOC) [9], te Priručnikom za zahtjeve sustava upravljanja zračnim prometom (*Manual on Air Traffic Management System Requirements – Doc 9882*) [10]. Unutar GANP-a, ICAO je odredio 11 ključnih područja uspješnosti (*Key Performance Area* – KPA), od kojih se područje Učinkovitost (*Efficiency*) odnosi na područje ovog istraživanja. Učinkovitost leta definirana je kroz četiri KPI-ja unutar navedenog ključnog područja uspješnosti. Pristup naveden u ICAO-ovoj Radnoj uputi globalnog plana zračne navigacije (*Manual on Global Performance of the Air Navigation System*) [11], naglašava razumijevanje pokazatelja uspješnosti kao ključni čimbenik za poboljšanje sustava. Preciznije, ICAO navodi da se prvo procjenjuje trenutačno stanje, zatim se identificiraju i rješavaju uočeni

nedostaci. Na kraju se razvijaju opcije i ciljevi za poboljšanje operativnih procesa. Osim toga, pokazatelji učinkovitosti leta su ključni za praćenje i usmjeravanje uspješnosti ATM sustava. Koncept temeljen na uspješnosti usmjeren je na postizanje rezultata, što pomaže donositeljima odluka pri određivanju prioriteta i stvaranju adekvatnih kompromisa radi optimalne raspodjele resursa, uz održavanje prihvatljive razine sigurnosti [12].

Što se tiče regionalne, odnosno europske razine, poboljšanje učinkovitosti upravljanja zračnim prometom svrha je inicijative Jedinostveno europsko nebo (*Single European Sky* - SES). Europski parlament i Vijeće Europske unije usvojili su Uredbu br. 549/2004 kojom se definira okvir Jedinostvenog europskog neba [13]. Nadalje, Uredba br. 549/2004, zajedno s Uredbom br. 550/2004, br. 551/2004 i br. 552/2004 čini prvi zakonodavni paket inicijative Jedinostvenog europskog neba koji ima za cilj jačanje sigurnosti i restrukturiranje europskog zračnog prostora i usluga u zračnoj plovidbi. Kako bi se dodatno riješila pitanja opterećenja europskog sustava upravljanja zračnim prometom te povećanih troškova uzrokovanih fragmentiranim zračnim prostorom, Komisija je predložila drugi zakonodavni paket Jedinostvenog europskog neba čiji je cilj [14]:

- stvoriti jedinstveni sigurnosni okvir kako bi se omogućio usklađen razvoj sigurnosnih propisa i njihova provedba,
- poboljšati učinkovitost ATM sustava postavljanjem ciljeva i praćenjem uspješnosti,
- uvesti nove tehnologije koje omogućuju implementaciju novog operativnog koncepta i povećanje razine sigurnosti,
- poboljšati upravljanje kapacitetima zračnih luka.

U sklopu drugog zakonodavnog paketa SES-a uvedeni su funkcionalni blokovi zračnog prostora (*Functional Airspace Block* – FAB). Pravilnik o upravljanju zračnim prostorom [15] definira FAB kao blok zračnog prostora utvrđen na temelju operativnih zahtjeva, zbog potrebe osiguranja cjelovitijeg upravljanja zračnim prostorom bez obzira na postojeće državne granice. Na slici 1 prikazan je prostorni raspored funkcionalnih blokova zračnog prostora. U sklopu šestog poglavlja ovog istraživanja provedena je usporedba nalaza studije slučaja s vrijednostima funkcionalnih blokova zračnog prostora FAB CE i FABEC.



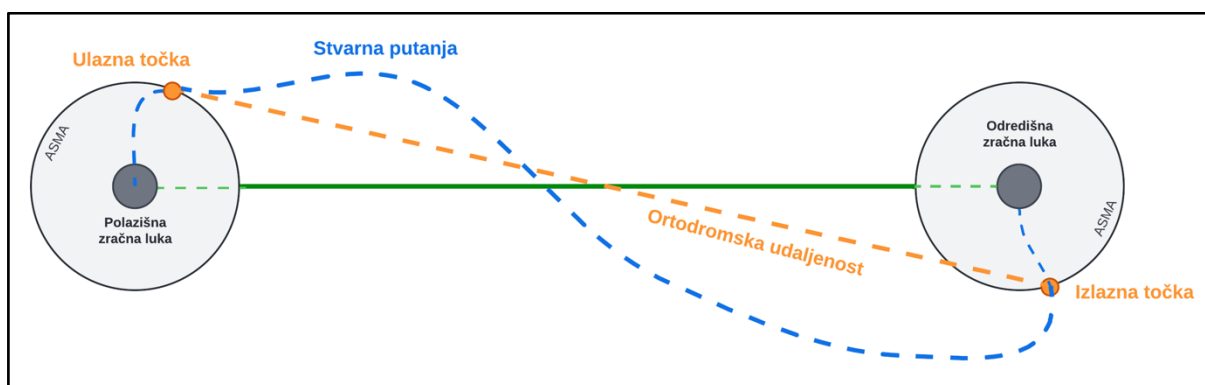
Slika 1. Prostorni prikaz funkcionalnih blokova zračnog prostora, [16]

Pored prethodno navedenog, u sklopu drugog zakonodavnog paketa SES-a uveden je Plan mjerenja učinkovitosti (*Performance Scheme*) kroz usvajanje Uredbe br. 691/2010. Pri tome, Uredbom su definirani ključni pokazatelji uspješnosti [17]. Uredba br. 390/2013 [18], dodatno je razvila uspostavljene mjere, posebno u području okoliša, omogućavajući lokalno praćenje uspješnosti. Povrh toga, uspostavljen je sustav praćenja učinkovitosti za postavljanje ciljeva u ključnim područjima uspješnosti putem usvajanja ciljeva uspješnosti na razini Europske unije i odobrenja dosljednih nacionalnih ili funkcionalnih blokova zračnog prostora. Naknadne mjere za praćenje uspješnosti na razini mreže definirane su u najnovijoj Uredbi br. 317/2019 [19]. Nadalje, učinkovitost leta je predmet nadzora i izvještavanja unutar Plana mjerenja učinkovitosti [18][20]. Plan mjerenja učinkovitosti je uveden kako bi se osigurala učinkovitost usluga u zračnoj plovidbi u četiri ključna područja uspješnosti [21]:

- sigurnost,
- okoliš,
- kapacitet,
- troškovna učinkovitost.

Horizontalna učinkovitost leta (*Horizontal flight efficiency – HFE*) predstavlja neizostavan segment ključnog područja uspješnosti *okoliš*. Prema EUROCONTROL-u [20], horizontalna učinkovitost leta, u najširem smislu, se definira kao usporedba između duljine putanje leta i najkraće udaljenosti između njezinih krajnjih točaka. Prema Peetersu i suautorima [23], horizontalna učinkovitost leta predstavlja jedno od dva područja istraživanja učinkovitosti leta. Između ostalog, autori navode da se drugo područje istraživanja učinkovitosti leta odnosi na vertikalnu učinkovitost leta.

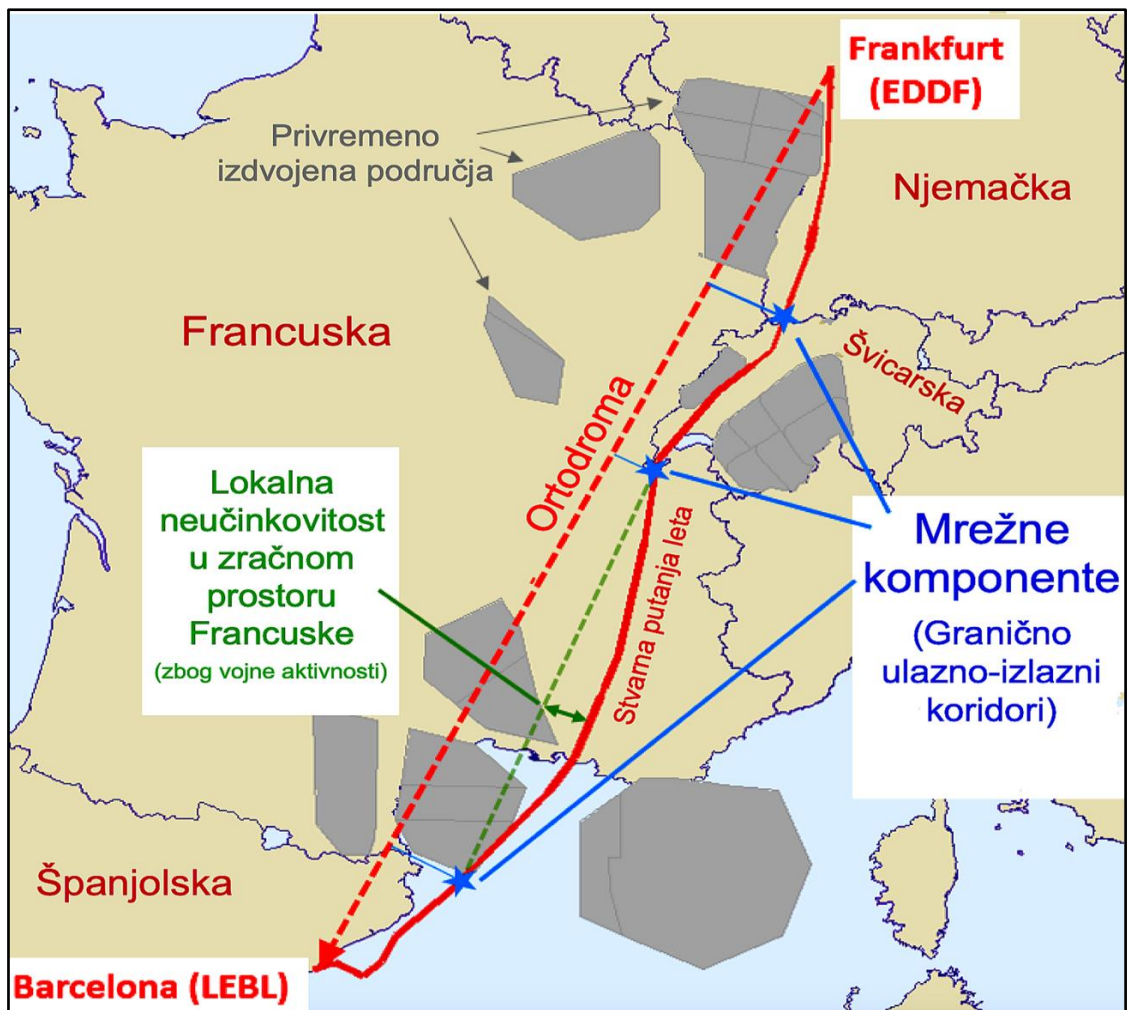
U posljednjih nekoliko godina pojavilo se nekoliko znanstvenih i stručnih radova vezanih za metodologije izračuna horizontalne učinkovitosti leta. Na primjer, Leones i suautori u radu [24] iz 2018. godine navode „metodologiju postignute udaljenosti“. Spomenuta metodologija izračunava prosječnu dodatnu udaljenost na ruti u odnosu na udaljenost po ortodromi. Prema Hrvatskoj enciklopediji [25], ortodroma podrazumijeva krivulju koja je presjek sfere i ravnine što prolazi središtem sfere. Sukladno tome, smatra se da je ortodroma najizravnija ruta između dviju zračnih luka. Konkretno, izračun navedene metodologije se provodi između izlazne točke iz tzv. područja sekvenciranja i mjerenja dolaska (*Arrival Sequencing and Metering Area - ASMA*) zračne luke polaska i ulazne točke u ASMA područje zračne luke dolaska. Na taj način, metodologija omogućuje precizno mjerenje odstupanja od idealne, odnosno, „izravne rute“, pružajući ključne informacije za poboljšanje učinkovitosti leta. Koncept metodologije postignute udaljenosti za izračun horizontalne učinkovitosti leta prikazan je slikom 2.



Slika 2. Koncept horizontalne učinkovitosti leta [22]

Recentni izvori otkrivaju da koncept horizontalne učinkovitosti leta naglašava važnost ortodrome kao najkraće rute, no ona nije nužno najučinkovitija po pitanju potrošnje goriva. EUROCONTROL u [26] smatra da je optimalna ruta s obzirom na vjetar najučinkovitija sa stanovišta potrošnje goriva, ali nije nužno i najkraća ruta. Osim toga, navode da čak i ako je segment leta unutar jedne zemlje kratak i učinkovit, može biti dio neučinkovite rute zbog zatvaranja ili izbjegavanja zračnog prostora u drugoj zemlji. Primjer navedenog slučaja je zračni prostor Bjelorusije zbog političke situacije i ratnog sukoba Rusije i Ukrajine. Na slici 3 prikazan je primjer putanje komercijalnog leta zrakoplova između Zračne luke Frankfurt (ICAO oznaka: EDDF) u Njemačkoj i Zračne luke Barcelona (ICAO oznaka: LEBL) u Španjolskoj. Primjer prikazuje nekoliko uzroka koji prethode horizontalnoj neučinkovitosti leta. Uzroci uključuju vojnu aktivnost, privremeno izdvojena područja (*Temporary Segregated Area – TSA*), lokalne i mrežne komponente. Zaključuje se da je potrebno, prilikom valorizacije horizontalne učinkovitosti leta, obratiti pozornost na cijelu rutu leta, a ne samo na lokalnu neučinkovitost. Smatra se da prekogranične inicijative i sporazumi mogu pomoći u suzbijanju navedenih neučinkovitosti. Prilikom tumačenja rezultata pokazatelja horizontalne učinkovitosti leta, važno je naglasiti da pokazatelj ne može i ne bi trebao dosegnuti nulu. Prvenstveno zato što su određena odstupanja od ortodromske udaljenosti, u nekim slučajevima, poželjna (izbjegavanje opasnih područja i slično).

Važno je napomenuti da se trenutni pokazatelj horizontalne učinkovitosti leta temeljen na udaljenosti smatra stabilnim pokazateljem. No, navedeni pokazatelj posjeduje nekoliko nedostataka. Poglavitito u pogledu neusklađenosti s relevantnim standardima optimizacije potrošnje goriva i zaštite okoliša. U cilju ublažavanja nedostataka, EUROCONTROL, u bliskoj suradnji s industrijom, razvija dodatne pokazatelje koji su posebno orijentirani na učinkovitost potrošnje goriva i zaštitu okoliša.



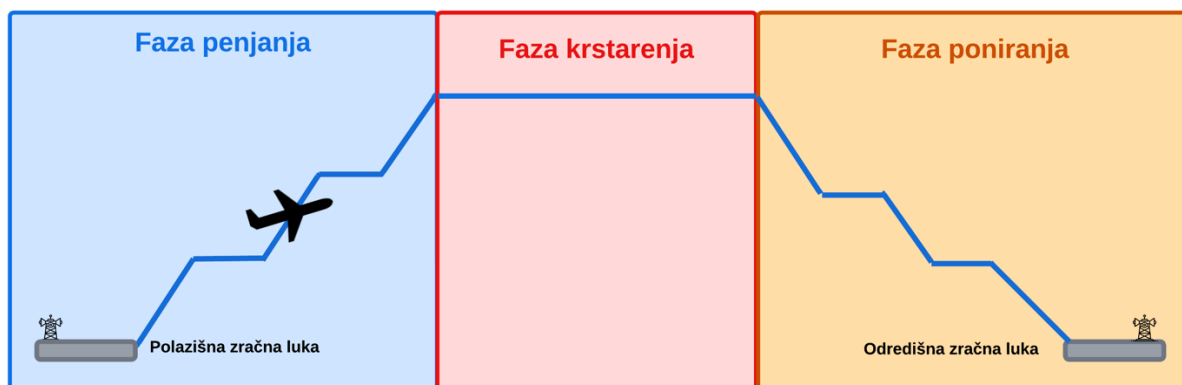
Slika 3. Primjer horizontalne neučinkovitosti leta [26]

Tijekom 2017. godine, putem Odbora za zaštitu okoliša u zračnom prometu (*Committee on Aviation Environmental Protection - CAEP*), ICAO je proveo globalnu analizu [27] horizontalne učinkovitosti leta. Opisana analiza predstavlja prvi korak u procesu identifikacije globalne učinkovitosti leta. Kako bi se procijenio HFE prikupljeni su podaci dobiveni putem ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance–Broadcast*) tehnologije, te su prilagođeni formatu koji je pogodan za analizu i kasniju valorizaciju. Pri tome, u okviru sadržaja dokumenta, navodi se nekoliko ograničenja analize i valorizacije horizontalne učinkovitosti leta. Na primjer, rutna ograničenja u trenutku odvijanja leta nisu razmatrana budući da je horizontalna učinkovitost leta valorizirana u odnosu na teoretski optimum. Osim toga, neke neučinkovitosti u sustavu upravljanja zračnim prometom uzrokovane su vanjskim čimbenicima poput vremenskih uvjeta, zračnih luka, lokalnih problema, ograničenja u blizini drugih zračnih luka ili prekomjerne potražnje. Pored toga, stručnjaci u području istraživanja, slažu se da je određena razina operativne neučinkovitosti neizbježna kako bi sustav uspješno funkcionirao.

3. PROBLEMATIKA VERTIKALNE UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA

Osim interesa za istraživanja u području horizontalne učinkovitosti leta, mnogi autori uključujući dionike industrije zračnog prometa, poput zrakoplovnih proizvođača, zračnih prijevoznika, regulatornih tijela i ekoloških organizacija, pokazuju značajan interes za poboljšanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. U najširem smislu, vertikalna učinkovitost leta je mjera koliko učinkovito stvarni vertikalni profil leta prati optimalni vertikalni profil leta [28]. Procjena vertikalne učinkovitosti leta uključuje faze penjanja, krstarenja i poniranja. EUROCONTROL-ova Jedinica za nadzor učinkovitosti (*Performance Review Unit - PRU*) u [29] navodi da je razvila i testirala nove pokazatelje uspješnosti koji se posebno odnose na vertikalnu učinkovitost leta. Navedeni pokazatelji se razmatraju za buduću primjenu, poglavito kako bi se poboljšala operativna i ekološka učinkovitost upravljanja zračnim prometom. Faze penjanja i poniranja leta značajne su iz razloga što uključuju značajne promjene visine koje utječu na potrošnju goriva i emisije. Prilikom faze krstarenja leta, zrakoplov održava „stalnu“ visinu, dok faze penjanja i poniranja zahtijevaju dinamičke prilagodbe visine koje moraju biti pažljivo izvršene kako bi se optimizirala učinkovitost leta.

Tijekom faza penjanja i poniranja, letačko osoblje se često suočava s međurazinskim ravnanjima, odnosno, tzv. segmentima „na istoj visini“ (*Level segment – LS*). Navedeni segmenti, prikazani stepenastom putanjom leta u fazama penjanja i poniranja na slici 4, pojavljuju se kada zrakoplov privremeno održava stalnu visinu prije nego što nastavi penjanje ili poniranje. Segmenti „na istoj visini“ općenito su neučinkoviti za potrošnju goriva jer se obično javljaju na neoptimalnim visinama. U konačnici, glavna problematika procjene vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova podrazumijeva odstupanje od optimalnog vertikalnog profila tijekom faza penjanja i poniranja leta. Prema Jedinici za nadzor učinkovitosti [29], utjecaj na učinkovitost goriva posebno je značajan tijekom poniranja, jer održavanje zrakoplova „na istoj visini“ tijekom ove faze zahtijeva dodatni potisak pogonske grupe, što dovodi do veće potrošnje goriva. Nasuprot tome, ako bi bila dostupna i korištena putanja kontinuiranog poniranja, zrakoplov bi mogao koristiti najniže moguće postavke potiska, čime bi se štedjelo gorivo i smanjio utjecaj na okoliš.



Slika 4. Prikaz stepenastog vertikalnog profila leta

Pregled literature u području upravljanja zračnim prometom otkriva progresiju u broju znanstvenih i stručnih radova vezanih uz procjenu učinkovitosti leta, s posebnim naglaskom na vertikalnu učinkovitost leta tijekom faza penjanja i poniranja. Posljednjih godina posebno se intenzivirao u brojnim znanstvenim i stručnim radovima, u kojima se ističe važnost procjene učinkovitosti vertikalnog leta unutar završne kontrolirane oblasti (*Terminal Maneuvering Area* - TMA). Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, ovaj trend dijelom je potaknut od strane ICAO-a, koji je uvrstio vertikalnu učinkovitost leta kao ključni pokazatelj učinkovitosti za procjenu učinka završne kontrolirane oblasti [8]. U skladu s navedenim, Komisija za nadzor učinkovitosti (*Performance Review Commission* - PRC) u [30] uključila je pokazatelje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u svoj pregled europskog sustava upravljanja zračnim prometom za 2019. godinu, procjenjujući neučinkovitost letova na 30 najvećih europskih zračnih luka i naglašavajući ulogu vertikalne učinkovitosti leta u operativnoj učinkovitosti. Ryerson i suautori u svom radu [31], uveli su metriku neučinkovitosti kako bi procijenili potrošnju goriva unutar završnih kontroliranih oblasti. Njihovo istraživanje kvantificiralo je dodatno sagorijevanje goriva zbog kašnjenja i neučinkovitosti sustava upravljanja zračnim prometom. Rezultati su dobiveni koristeći podatke o potrošnji goriva od jednog zračnog prijevoznika koji primarno posluje u Sjedinjenim Američkim Državama. Navedeno istraživanje je pokazalo kako neučinkovitost u operacijama završnih kontroliranih oblasti dovodi do povećane potrošnje goriva. Slično tome, Zanin je u radu iz 2020. godine [32], istraživao velike skupove podataka o putanjama zrakoplova kako bi procijenio učinkovitost različitih zračnih prostora, uspoređujući učinkovitost različitih zračnih prostora kako bi razumio utjecaj operativnih praksi i dizajna zračnog prostora na učinkovitost leta.

Osim završnih kontroliranih oblasti, koje mogu obuhvaćati i više zračnih luka, mnoga recentna istraživanja su se usredotočila na procjenu vertikalne učinkovitosti leta u okviru jedne

zračne luke. Correria, u radu iz 2017. godine [33], istraživao je vertikalnu učinkovitost leta na Zračnoj luci Lisabon (ICAO oznaka: LPPT) u Portugalu i usporedio ju s drugim europskim zračnim lukama. Istraživanje je pokazalo da svaka zračna luka ima jedinstvenu distribuciju segmenata „na istoj visini“, ovisno o kapacitetu i organizaciji zračnog prostora. Autor navodi kako varijacije utječu na učinkovitost leta, pri čemu složeniji i prometniji zračni prostori ostvaruju drugačije rezultate vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u usporedbi s jednostavnijim ili manje zagušenim zračnim prostorima. Polishchuk i suautori u recentnom radu iz 2019. godine [34], proširili su ovu temu procjenjujući vertikalnu učinkovitost leta na Zračnoj luci Stockholm Arlanda (ICAO oznaka: ESSA) u Švedskoj, koristeći podatke iz OpenSky mreže. Istraživanje je uključivalo komparativnu analizu podataka OpenSky mreže i DDR2 podataka od EUROCONTROL-a. Polishchuk i suautori su naglasili prednosti i nedostatke svakog izvora podataka, napominjući da, iako su podaci OpenSky mreže pružili široku pokrivenost, bili nepotpuni i manje pouzdani za relevantne statističke podatke o kašnjenjima. Nasuprot tome, DDR2 podaci bili su sveobuhvatniji i prikladniji za detaljnu analizu kašnjenja i neučinkovitosti leta. Nadalje, projekt APACHE, dio programa SESAR 2020, usredotočio se na procjenu neučinkovitosti leta vezano za dodatnu potrošnju goriva koristeći Chatterji algoritam [35]. Međutim, ova procjena prvenstveno se orijentirala na fazu krstarenja, a ne na faze penjanja i poniranja. Istraživanja Prats i suautora iz 2018. godine [36][37], pružaju detaljnu analizu učinkovitosti leta u fazi krstarenja, naglašavajući kako neučinkovitosti u ovoj fazi mogu utjecati na ukupne performanse leta.

Prepoznajući ključnu ulogu meteoroloških uvjeta u učinkovitosti leta, inicijativa Istraživanja o upravljanju zračnim prometom Jedinstvenog europskog neba (*Single European Sky ATM Research - SESAR*) razvila je nekoliko inovativnih modela prognoziranja meteoroloških uvjeta usmjerenih na poboljšanje planiranja putanja leta. Na primjer, projekti kao što su IMETE [38], PNOWWA [39] i FMP-MET [40], usredotočili su se na poboljšanje točnosti i pouzdanosti vremenskih prognoza, omogućujući preciznije i učinkovitije planiranje i upravljanje zračnim prometom. Navedeni modeli imaju za cilj ublažiti utjecaj meteoroloških uvjeta na vertikalnu učinkovitost leta i poboljšati ukupne performanse sustava upravljanja zračnim prometom. Međutim, implementiranje inovativnih modela za prognoziranje meteoroloških uvjeta nije važno samo za učinkovitost leta, već je i ključan faktor u povećanju kapaciteta zračnih luka. Na primjer, Maslovara i Mirković, u radu iz 2021. godine [41], su istraživale utjecaj repnog vjetrova na kapacitet Zračne luke Zürich (ICAO oznaka: LSZH) u Švicarskoj. Autorice, između ostalog, zaključuju da je implementacija naprednih alata koji se

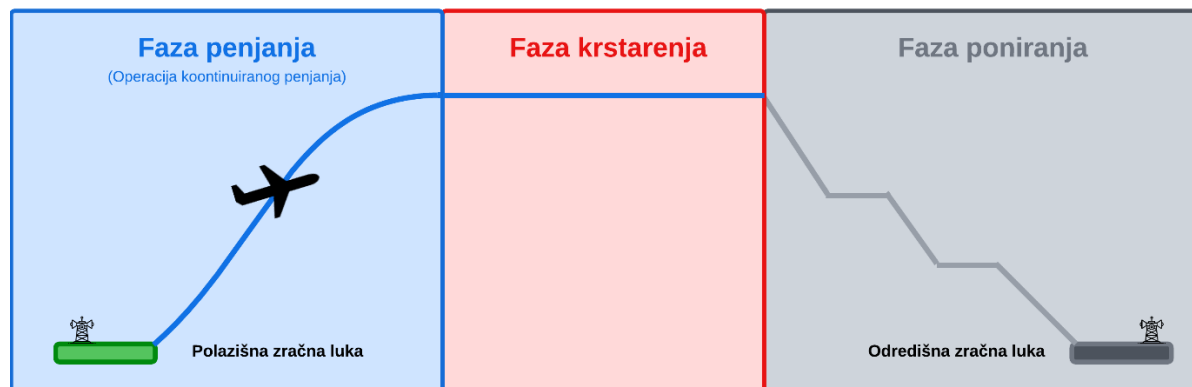
temelje na numeričkoj vjerojatnosti predviđanja meteoroloških uvjeta ključna za minimiziranje negativnog učinka repnog vjetra na dolazni promet na Zračnoj luci Zürich.

Osim toga, utjecaj toplinskog strujanja i oluja na vertikalnu učinkovitost leta je predmet značajnog istraživačkog interesa. Na primjer, Steiner i suautori u [42] i Song i suautori u [43] istraživali su implikacije navedenih meteoroloških fenomena na upravljanje tokovima prometa u završnoj kontroliranoj oblasti. Njihova istraživanja ističu izazove kao što su povećana turbulencija i potreba za preusmjeravanjem letova, što može narušiti učinkovitost i sigurnost leta. Istraživanja naglašavaju važnost pouzdanog prognoziranja vremena i integracije stvarnih meteoroloških podataka. U konačnici, navedena istraživanja ističu potrebu uzimanja u obzir specifičnih karakteristika zračnih luka, kvalitetu izvora podataka i pojedinosti specifične za faze leta u procjeni vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Traženjem optimalnih rješenja za spomenute čimbenike, znanstvenici i stručnjaci u ovom polju mogu bolje razumjeti i poboljšati učinkovitost leta.

U cilju suzbijanja vertikalne neučinkovitosti, uvedeni su postupci operacija kontinuiranog penjanja i operacija kontinuiranog poniranja [28]. Navedeni postupci omogućuju zrakoplovima „glatko“ izvršavanje operacija penjanja i poniranja, pri tome izbjegavajući neučinkovitosti povezane sa segmentima „na istoj visini“. Primjena CCO i CDO postupaka može dovesti do značajnog smanjenja potrošnje goriva, emisija i buke. Minimiziranjem segmenata „na istoj visini“ i omogućavanjem učinkovitije upotrebe potiska, ove operacije podržavaju održiviji i ekološki prihvatljiviji sustav upravljanja zračnim prometom. Usvajanje navedenih praksi usklađuje se sa širim ekološkim ciljevima i pokazuje predanost smanjenju ugljičnog otiska zračnog prometa. Nadalje, operacije kontinuiranog penjanja i poniranja ključne su za modernizaciju sustava upravljanja zračnim prometom. Postupci zahtijevaju naprednu koordinaciju između letačkog osoblja, pružatelja usluga u zračnoj plovidbi i zemaljskih navigacijskih sustava kako bi se osigurale optimalne putanje leta bez ugrožavanja sigurnosti. Uspješna primjena navedenih postupaka ističe zajedničke napore unutar industrije zračnog prometa za poboljšanje učinkovitosti i održivosti. Prihvatanjem ovih postupaka, kao i uvažavajući sve navedeno, ATM sustav može izrazito doprinijeti daljem razvoju ekonomičnije i ekološki optimizirane industrije zračnog prometa, zadovoljavajući potrebe i pružatelja i korisnika usluga, pri tome pridonoseći globalnim ciljevima artikuliranim u smislu održivosti i klimatskih promjena.

3.1. Operacije kontinuiranog penjanja

Tijekom faze penjanja, zrakoplov prelazi s razine tla na visinu krstarenja. Faza penjanja zahtijeva značajan potisak kako bi se prevladale gravitacijske sile i atmosferski otpor, što ju čini jednom od najintenzivnijih faza leta u pogledu potrošnje goriva. Učinkoviti postupci tijekom faze penjanja, poput operacija kontinuiranog penjanja, ključne su za uravnoteženje potrošnje goriva s vremenskim i sigurnosnim zahtjevima. Nadalje, napredak u sustavima upravljanja letom u zrakoplovu (*Flight Management System – FMS*), sustavima upravljanja zračnim prometom i analitici podataka u stvarnom vremenu omogućio je preciznije izvođenje operacija penjanja. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo je, u Dokumentu 9993 [44], definirala operacije kontinuiranog penjanja kao tehniku upravljanja zrakoplovom podržanu pravilnim dizajnom zračnog prostora, oblikovanim letačkim postupcima i odgovarajućim odobrenjima kontrole zračnog prometa. Nadalje, ICAO navodi kako tehnika, prikazana na lijevoj strani slike 5, omogućuje izvođenje profila leta prema performansama zrakoplova, što dovodi do značajne uštede goriva i ekoloških prednosti u smislu smanjenja buke i emisija.



Slika 5. Koncept operacija kontinuiranog penjanja

Uz prethodno razmotrenu literaturu, daljnji pregled literature također ističe nekoliko istraživanja koje otkrivaju učinke usklađenosti i nepridržavanja operacija kontinuiranog penjanja. Primjerice, Međunarodna federacija udruga kontrolora zračnog prometa (*International Federation of Air Traffic Controllers' Associations – IFATCA*) [45], sažela je potencijalne koristi od sustavnog uvođenja operacija kontinuiranog penjanja, naglašavajući smanjenje kašnjenja letova, potrošnje goriva i emisija. Njihovi nalazi naglašavaju široke operativne i ekološke prednosti koje se mogu postići dosljednom primjenom navedenih

postupaka. Opsežna istraživanja o prednostima operacija kontinuiranog poniranja dala su konkretne rezultate o pozitivnim učincima CCO postupaka. McConnachie i suautori [46], su proveli opsežno istraživanje koje otkriva da se prosječna potencijalna ušteda goriva po uzlijetanju kreće između šest i 19 kilograma. Navedene se uštede pretvaraju u značajna godišnja smanjenja CO₂. Procijenjena ušteda za zračne luke s velikom gustoćom prometa iznosi oko 5.000 kilograma CO₂ po letu. Navedeni nalazi naglašavaju važnost CCO postupaka u doprinosu održivijim i troškovno učinkovitijim zrakoplovnim operacijama.

Pérez-Castán i suautori u [47] dali su značajan doprinos promatranom području istraživanja kvantificiranjem utjecaja implementacije CCO-a na kapacitet zračne luke. Njihovo istraživanje ne samo da je procijenilo operativne učinke CCO-a, već je razvilo i metodologiju za određivanje održivosti implementacije CCO-a u određenim zračnim lukama. Spomenuta metodologija uzima u obzir ključne čimbenike kao što su kapacitet zračne luke, potencijalne sukobe, intervencije kontrole zračnog prometa i kašnjenja. Istraživanje pokazuje nužnost analize utjecaja operacija kontinuiranog penjanja unutar stvarnog operativnog konteksta kako bi se osigurala praktična primjenjivost i učinkovitost.

Prilikom razmatranja CCO procedura, važno je naglasiti da integracija postupaka poput operacija kontinuiranog penjanja predstavlja značajne izazove, posebno u pogledu kapaciteta i sigurnosti. Istraživanja Simaiakisa i Balakrishnana [48] i Jacquillat i suautora [49], istaknula su tezu da su teorijske prednosti CCO-a jasne, ali njihova praktična provedba može dovesti do složenih operativnih problema. Na primjer, mnogi radovi su pokazali se da je integracija operacija kontinuiranog poniranja u zračne luke s velikom gustoćom prometa izvediva, ali istovremeno često rezultira značajnim smanjenjem kapaciteta [50][51]. Smanjenje kapaciteta predstavlja znatan izazov, jer je održavanje ili povećanje propusnosti zračne luke ključno za učinkovito upravljanje velikim količinama prometa. Slično tome, dokazi u radovima Heblya i Vissera [52] i Pérez-Castána [53] upućuju na to da bi implementacija CCO-a također mogla smanjiti kapacitet zračne luke. Navedena istraživanja ističu da CCO postupci nude prednosti za okoliš i uštedu goriva, no potrebno je obratiti pozornost na utjecaj ovih postupaka na operativnu učinkovitost zračnih luka. Potencijalno smanjenje kapaciteta zahtijeva temeljitu analizu kako bi se osiguralo da prednosti CCO-a ne dolaze po cijenu operativne učinkovitosti i sigurnosti. Osim toga, istraživanja provedena od strane Larssona [54], Komisije za nadzor učinkovitosti [55] i Airbus-a [56], ukazuju da je potencijal za poboljšanje učinkovitosti goriva veći tijekom faze poniranja nego tijekom faze penjanja. Glavni razlog navedenog zaključka

jest to što operacije kontinuiranog poniranja smanjuju potrebu za segmentima „na istoj visini“, omogućavajući učinkovitije postavke potiska.

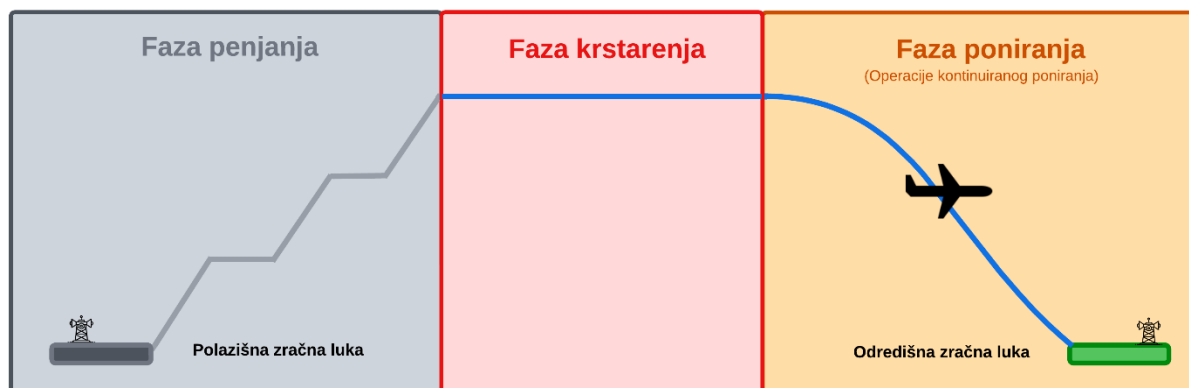
Načelno promatrano, nije realno očekivati koristi od integracija CCO procedura bez sveobuhvatnog razumijevanja njihovog utjecaja na kapacitet, posebno u zračnim lukama s velikom gustoćom prometa. Literatura naglašava potrebu za stalnim istraživanjem i testiranjem u realnom okruženju kako bi se razvile strategije koje uravnotežuju ekološke i operativne prednosti CCO-a s nužnošću održavanja kapaciteta i sigurnosti zračne luke. To uključuje istraživanje naprednih tehnika upravljanja zračnim prometom, optimiziranje letačkih procedura i korištenje novih tehnologija za povećanje izvedivosti i učinkovitosti CCO-a.

U konačnici, iako su potencijalne prednosti CCO-a, poput smanjene potrošnje goriva i nižih emisija jasno zabilježene, potrebno je obratiti pozornost na praktične izazove koji se odnose na kapacitet i sigurnost. Kontinuirana usredotočenost na inovativna istraživanja i praktične strategije provedbe bit će ključna u unaprjeđenju usvajanja CCO postupaka na način koji maksimizira njihove koristi uz istovremeno ublažavanje njihovih ograničenja. Navedeni sveobuhvatni pristup ključan je za poticanje održivijeg, učinkovitijeg i sigurnijeg sustava upravljanja zračnim prometom.

3.2. Operacije kontinuiranog poniranja

Faza poniranja, s druge strane, uključuje smanjenje visine u pripremi za slijetanje. Učinkovito upravljanje poniranjem ima za cilj postići kontrolirano, postupno smanjenje visine koje minimizira potrošnju goriva i buku, a istovremeno osigurava udobnost putnika i dosljedno ispunjavanje zahtjeva i pravila, odnosno procedura kontrole zračnog prometa. Postupci poput operacija kontinuiranog poniranja koriste napredne navigacijske sustave za stvaranje ujednačenijih i učinkovitijih putanja poniranja. Navedeni postupci ne samo da štede gorivo, već doprinose smanjenju emisija i operativnih troškova. U sklopu Dokumenta 9931 [57], ICAO je definirao operacije kontinuiranog poniranja kao tehniku upravljanja zrakoplovom podržanu pravilnim dizajnom zračnog prostora, oblikovanjem letačkih postupaka i odgovarajućim odobrenjima kontrole zračnog prometa. Također, tehnika omogućuje izvođenje profila leta optimiziranog prema operativnim sposobnostima zrakoplova, s niskim postavkama potiska pogonske grupe i gdje je moguće, konfiguracijom zrakoplova s niskim otporom, čime se smanjuje potrošnja goriva i emisija tijekom faze poniranja. Optimalni vertikalni profil leta je prikazan na desnoj strani slike 6. Takav profil ima oblik kontinuirano silazne putanje, s minimalnim segmentima leta na istoj visini, koji nastaje samo u slučaju potrebe za smanjenjem

brzine zrakoplova, konfiguriranjem zrakoplova ili za uspostavljanje sustava za instrumentalno slijetanje (*Instrument Landing System - ILS*).



Slika 6. Koncept operacija kontinuiranog poniranja

Istraživanja Frickea i suautora [58], kao i Wubbena i Businka [59], otkrila su potencijalne uštede goriva postignute operacijama kontinuiranog poniranja u usporedbi s konvencionalnim postupcima. Korištenje CDO postupaka rezultiralo je značajnim smanjenjem potrošnje goriva – između 25% i 40%. Istraživanja su prikazala učinkovitost CDO-a u poboljšanju učinkovitosti leta i smanjenju utjecaja na okoliš. Pasutto i suautori [60], su ispitali čimbenike koji utječu na vertikalnu učinkovitost leta tijekom faze poniranja na 30 najvećih europskih zračnih luka. Rezultati istraživanja su otkrili da vertikalna odstupanja rastu s horizontalnim odstupanjima. Također su uočili znatne razlike u vertikalnoj učinkovitosti leta među zračnim lukama, s nekim pokazateljima koje se razlikuju za faktor pet ili više, pružajući uvid u područja za poboljšanje.

Toratani i suautori [61], istraživali su izvedivost proširenja primjenjivog vremena za operacije kontinuiranog poniranja na Zračnoj luci Kansai (ICAO oznaka: RJBB) u Japanu. Njihovo istraživanje implementiralo je simulacije u stvarnom vremenu za dizajn CDO procedura i optimizaciju vertikalnih CDO putanja. Simulacije su pokazale da strmiji profili poniranja općenito nude bolju učinkovitost, dok plići profili poniranja poboljšavaju upravljivost. To istraživanje pružilo je vrijedan uvid u uravnoteženje učinkovitosti i operativne izvedivosti u dizajnu CDO procedura.

Znanstveni i stručni radovi o učincima operacija kontinuiranog poniranja su, usporedivo s istraživanjima o operacijama kontinuiranog penjanja, opsežni i dobro dokumentirani. Na primjer, Clarke i suautori [62] su definirali „optimizirani profil poniranja“

(*Optimized Profile Descent - OPD*), kao vertikalni profil koji omogućava zrakoplovima da poniru s visine krstarenja s minimalnim ili gotovo minimalnim potiskom sve do neposredne blizine uzletno-sletne staze za slijetanje. Navedeni postupak omogućava zrakoplovima da dulje ostanu na visini krstarenja i smanjuje ili u potpunosti eliminira, segmente „na istoj visini“. Karakteristične niske postavke potiska rezultiraju smanjenom potrošnjom goriva, manjom bukom tijekom letačke putanje te smanjenjem emisija, kako „globalno“ (iznad 3.000 stopa), tako i „lokalno“ (ispod 3.000 stopa). Osim toga, njihovo istraživanje iz 2013. godine je predstavilo detaljnu analizu dizajna i implementacije optimiziranog profila poniranja na Zračnoj luci Los Angeles (ICAO oznaka: KLAX) u Sjedinjenim Američkim Državama. Istraživanje je istaknulo značajna operativna poboljšanja, uključujući povećanu učinkovitost goriva i smanjenje emisija, pokazujući opipljive prednosti OPD-a u zračnom prostoru s visokom razinom prometa.

Pregled literature ukazuje na još jedan rad sa rezultatima dobivenih provedbom studije slučaja na temelju podataka iz stvarnog svijeta. Tong i suautori [63], proveli su detaljno istraživanje na Zračnoj luci Atlanta (ICAO oznaka: KATL) u Sjedinjenim Američkim Državama, u kojoj su utvrdili da je implementacija CDO postupka dovela do uštede od 136 litara goriva po letu. Istraživanje naglašava značajne operativne i ekološke prednosti CDO-a, kao što su smanjena potrošnja goriva i niže emisije ugljika, što pridonosi održivijim praksama upravljanja zračnim prometom.

U usporedbi s literaturom o operacijama kontinuiranog penjanja, literatura o operacijama kontinuiranog poniranja opsežno istražuje korelaciju između neučinkovitosti vertikalne učinkovitosti leta tijekom poniranja i pridruženih utjecaja buke. Na primjer, Clarke i suautori u radu iz 2007. godine [64], procijenili su korisnost CDO procedura kroz testne letove na Zračnoj luci Louisville (ICAO oznaka: KSDF) u Sjedinjenim Američkim Državama. Mjerili su utjecaj buke CDO-a u usporedbi s konvencionalnim procedurama na sedam različitih lokacija u blizini zračne luke. Rezultati istraživanja su pokazali da CDO dosljedno pruža značajno smanjenje buke, što koristi zajednicama u blizini zračne luke i doprinosi smanjenju razine zagađenja bukom. Osim istraživanja buke, istraživanja u ovom području također pružaju značajne dokaze koji povezuju vremenske uvjete s opsegom (ne)usklađenosti vertikalne učinkovitosti leta. Primjerice, Borsky i Unterberger u radu iz 2019. godine [65], su zaključili da vremenski uvjeti imaju veliki utjecaj na performanse sustava upravljanja zračnim prometom, posebno utječući na vertikalnu učinkovitost leta tijekom faze poniranja. Njihova

studija naglašava važnost integracije meteoroloških podataka u planiranje i operacije ATM-a, kako bi se ublažile neučinkovitosti uzrokovane nepovoljnim vremenskim uvjetima.

Zaključno, skup istraživanja o CDO-u je opsežan i višestruk, pokrivajući razne aspekte kao što su učinkovitost goriva, smanjenje buke i utjecaj vremenskih uvjeta. Rezultati naglašavaju prednosti CDO-a u poboljšanju operativne učinkovitosti, smanjenju ekološkog utjecaja i poboljšanju odnosa s lokalnom zajednicom kroz smanjenje buke. Nadalje, integracija naprednih modela vremenskog prognoziranja u ATM sustave predstavlja kritičan korak prema postizanju otpornijih i učinkovitijih operacija zračnog prometa suočenih s nepovoljnim vremenskim uvjetima.

Općenito razmatrajući, sva navedena istraživanja naglašavaju važnost vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u optimizaciji operacija, smanjenju potrošnje goriva i minimiziranju utjecaja na okoliš. Osim toga, istraživanja produbljuju razumijevanje čimbenika koji utječu na vertikalnu učinkovitost leta i daju praktične uvide za poboljšanje učinkovitosti leta unutar završne kontrolirane oblasti. Navedena saznanja trebala bi biti ključna za razvoj novih politika i postupaka za poboljšanje održivosti i učinkovitosti sustava upravljanja zračnim prometom. K tome, sustavna istraživanja i razvoj u području ostvarivanja koristi proizašlih iz operacija kontinuiranog poniranja, razvoj inovativnih pokazatelja i metoda procjene, predstavljaju ključne elemente za napredak u ovom području istraživanja i postizanje veće operativne učinkovitosti sustava upravljanja zračnim prometom.

4. RAZVOJ GENERIČKOG MODELA ZA PROCJENU VERTIKALNE UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA

Uz sve značajniju kompleksnost tokova zračnog prometa, u kombinaciji sa sve većom prometnom potražnjom i istovremenim nedostatkom kapaciteta kontrole zračnog prometa, pojavila se potreba za kvantitativnim istraživanjima koje, na temelju statističke analize empirijskih podataka, definiraju buduće odrednice usmjerene prema ostvarivanju sklada između operativnih i strateških planova različitih dionika unutar europskog sustava zračnog prometa. Navedene dionike obuhvaćaju državne zrakoplovne vlasti, zračne prijevoznike, operatore aerodroma, pružatelje usluga u zračnoj plovidbi, razvojne institute i donositelje politika, svaki sa vlastitim specifičnim strateškim ciljevima. Pored navedenog, nužnost istraživanja u ovom području proizlazi iz kritične važnosti za održivijim praksama u zračnom prometu. Stoga istraživanja koja primjenjuju sofisticirane modele, algoritme i statističke metode na opsežnim skupovima podataka postaju ključne za stvaranje uvida koji informiraju donositelje odluka, poboljšavaju operativnu učinkovitost i osiguravaju sigurnost zračnog prometa. U konačnici, takva istraživanja su neophodna za usklađivanje različitih razvojnih i strateških planova dionika, te za poticanje kontinuiranog napretka i održivosti industrije zračnog prometa.

4.1. Konceptualni okvir

Uzimajući u obzir konceptualni okvir primijenjen tijekom procesa istraživanja i razvoja (*Research & Development - R&D*) modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u fazama penjanja i poniranja, važno je naglasiti da model integrira kvantitativni istraživački pristup. Ovaj pristup omogućava ponovno korištenje pojedinačnih kvantitativnih podataka kroz različite faze manipulacije podacima, čime se povećava učinkovitost i dosljednost tijekom istraživačkog procesa. Manipulacija podacima u ovom kontekstu uključuje agregiranje i standardizaciju podataka u više instanci. Navedeni koraci se prvenstveno poduzimaju kako bi se osigurala robusnost neobrađenih ulaznih podataka, kao što su na primjer podaci profila leta, odnosno trajektorije leta. Podaci profila leta su ključni za točnu analizu i interpretaciju. Održavanjem visoke kvalitete i integriteta podataka, konceptualni okvir osigurava da su naknadne analize i zaključci izvedeni iz podataka pouzdani i valjani.

Osnovni konceptualni okvir modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta služi kao apstrakcija profila leta kroz specifične segmente leta. Profil leta izveden je iz mjerenih 4D

podataka o putanji leta koji obuhvaćaju vremenski poredani niz 4D mjerenja povezanih s jednim letom. Navedena mjerenja obično prikazuju putanju leta od zračne luke polazišta do zračne luke odredišta, uključujući detaljne informacije o položaju zrakoplova, visini i vremenu. Detaljni podaci o putanji leta omogućuju sveobuhvatno razumijevanje dinamike leta, pružajući uvid u to kako se različiti segmenti leta mogu optimizirati za bolju izvedbu i učinkovitost. Prema EUROCONTROL-u [66], koncept 4D podataka profila leta temelji se na integraciji vremena u 3D putanji zrakoplova. Cilj je osigurati odvijanje leta na optimalnoj trajektoriji što je dulje moguće u zamjenu za to da je zrakoplov dužan ispuniti točno vrijeme dolaska iznad određene točke. Prednosti koncepta 4D podataka o trajektoriji leta zrakoplova su [66]:

- predvidljivost - unaprijed definirane rute i putanje omogućuju bolje planiranje operacija, rezultirajući predvidljivijim i učinkovitijim polascima i dolascima,
- sigurnost - precizno praćenje pozicije zrakoplova poboljšava sigurnost, dok automatizacija smanjuje rizik od nesreća,
- troškovna učinkovitost - optimizirane rute smanjuju potrošnju goriva i operativne troškove, dok manja težina zrakoplova dodatno smanjuje troškove,
- utjecaj na okoliš - manja potrošnja goriva smanjuje emisije CO₂, smanjuje buku i minimizira ekološki otisak. Bolja predvidljivost optimizira resurse u zračnim lukama, smanjujući emisije.

Osim toga, važno je napomenuti da konceptualni okvir generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u fazama penjanja i poniranja zadovoljava općenito prihvatljive mjerne karakteristike, te karakteristike znanstvene metodologije:

- validnost – generički model je osmišljen tako da zaista mjeri ono što je potrebno i planirano mjeriti,
- pouzdanost - sposobnost modela da proizvodi dosljedne rezultate kada se primjenjuje na isti skup podataka pod sličnim uvjetima u ponovljenim mjerenjima. Navedena karakteristika osigurava da su nalazi pouzdani i da se mogu ponoviti u budućim istraživanjima. Osim toga, karakteristika pokazuje da je model robustan i da će pružiti stabilne rezultate, što je ključno za dugoročna istraživanja i usporedbe,
- osjetljivost – definirano kao razina točnosti i preciznosti dobivenih vrijednosti pri prikazu rezultata istraživanja. Osjetljivost osigurava da model može otkriti čak i male promjene ili varijacije u procjeni vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Visoka

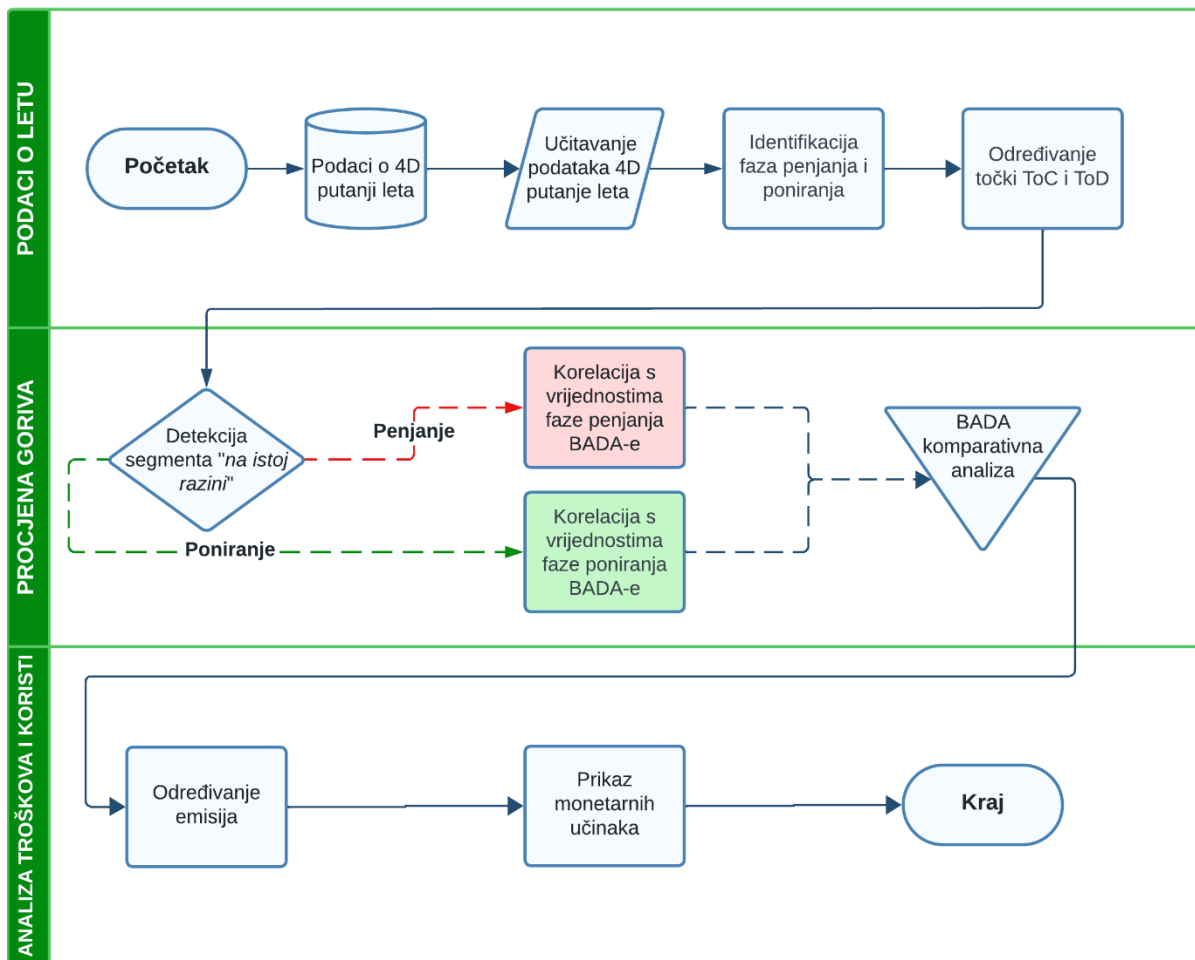
osjetljivost je ključna za prepoznavanje suptilnih razlika i trendova, što može dovesti do detaljnijih analiza i preciznijih uvida u (ne)učinkovitost leta,

- objektivnost - rezultati dobiveni primjenom modela ne ovise o osobi koja provodi istraživanje ili mjerenje, već samo o prikupljenim podacima koji se obrađuju. To eliminira subjektivnu percepciju istraživača, osiguravajući da su nalazi nepristrani i utemeljeni isključivo na empirijskim podacima. Objektivnost je temeljna u znanstvenom istraživanju jer jamči da su zaključci izvedeni bez osobnih pristranosti i utemeljeni isključivo na činjenicama.

Nadalje, konceptualni okvir omogućava empirijsku evaluaciju bez oslanjanja na klasična razmatranja ukupne energije. Ovaj pristup eliminira potrebu za specifičnim informacijama o letu, čineći model široko primjenjivim. Apstrakcijom specifičnih detalja letova, odnosno njihovih profila, konceptualni okvir se može primijeniti na širok raspon operativnih scenarija i okruženja, čime se povećava njegova korisnost i relevantnost u različitim istraživačkim kontekstima. Konceptualni okvir, prikazan na slici 7, podijeljen je u tri slijedeća segmenta:

- Podaci o letu,
- Procjena goriva,
- Analiza troškova i koristi.

Segmenti predstavljaju ključnu ulogu u procjeni vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Kako bi se učinkovito procijenila VFE, unutar svakog segmenta potrebno je definirati seriju detaljnih koraka koji navode razvijeni generički model prema identifikaciji i valorizaciji vertikalne (ne)učinkovitosti leta zrakoplova.



Slika 7. Konceptualni okvir generičkog modela

4.1.1. Segment podataka o letu

Početni korak u Segmentu podataka o letu uključuje pristup podacima o putanji iz 4D baze podataka o profilu leta. Baza podataka sadrži sveobuhvatne podatke o letu zabilježene u četiri dimenzije: geografska širina (φ), geografska dužina (λ), visina (h) i vrijeme (t). Četiri opisane dimenzije pružaju potpuni horizontalni i vertikalni profil kretanja zrakoplova tijekom leta, omogućujući detaljnu analizu svake faze leta. S obzirom na istraživački naglasak na evaluaciji vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova tijekom faza penjanja i poniranja, sljedeći korak uključuje identifikaciju specifičnih faza leta zrakoplova na temelju dostupnog skupa podataka. Ovaj proces identifikacije je jedan od ključnih koraka zato što postavlja temelje za daljnju analizu, osiguravajući da su relevantni podaci izolirani i pripremljeni za detaljno ispitivanje.

Nakon utvrđivanja faza penjanja i poniranja, definiranje granica mjerenja postaje sljedeći imperativ. Definiranje granica mjerenja se postiže definiranjem ključnih točaka interesa. Točke interesa uključuju vrh penjanja (*Top of Cruise - ToC*) i vrh poniranja (*Top of Descent - ToD*). Vrh penjanja označava točku u kojoj zrakoplov prelazi iz faze penjanja u fazu krstarenja, dok vrh poniranja označava točku u kojoj zrakoplov prelazi iz faze krstarenja u fazu poniranja. Prethodno spomenute točke interesa se mogu definirati u svakom letu zrakoplova. Osim toga, točke interesa ključne su za precizno segmentiranje profila leta i osiguranje da su naknadne analize usredotočene na relevantne faze leta. Preciznim utvrđivanjem navedenih točaka, model može jednoznačno analizirati učinkovitost faza penjanja i poniranja. Prvenstveno jer se navedene točke interesa također koriste i pridonose boljem razumijevanju potrošnje goriva i regulirajućih emisije.

4.1.2. Segment procjene goriva

Unutar Segmenta procjene goriva, korak detekcije segmenta „na istoj visini“ provodi se za fazu penjanja i poniranja. Proces detekcije se oslanja na dva unaprijed definirana parametra: prag vertikalne brzine i prag vertikalne visinske razlike. Segmenti su identificirani „na istoj razini“ ako je njihova vertikalna brzina ispod ili je jednaka pragu vertikalne brzine i ako je visinska razlika manja ili jednaka pragu vertikalne visinske razlike. Segmenti koji ne zadovoljavaju ove kriterije označeni su kao segmenti penjanja ili poniranja. Za svaki identificirani segment, njegova visina se određuje na temelju trenutne točke i prethodnih točaka povezanih sa segmentom, što rezultira iterativnom stvaranju tablice segmenta profila. Tablica pruža detaljan prikaz profila leta, kategorizirajući svaki segment prema njegovim vertikalnim karakteristikama kretanja. Nakon toga, izlazne vrijednosti iz koraka detekcije segmenta „na istoj razini“ se koreliraju s odgovarajućim parametrima dobivenim putem *Base of aircraft data* (BADA) modela kako bi se procijenila potrošnja goriva zasebno za faze penjanja i poniranja.

Za potrebe reproduciranja performansi zrakoplova, EUROCONTROL je razvio model BADA [67]. Navedeni model predstavlja sveobuhvatan model namijenjen za preciznu aproksimaciju performansi zrakoplova u različitim uvjetima leta. Razvijen u suradnji s partnerskim industrijama, BADA integrira složene parametre kao što su vrsta zrakoplova, masa, visina, brzina i atmosferski uvjeti kako bi se izračunala potrošnja goriva s velikom točnošću. Standardizirani okvir predstavlja ključnu ulogu unutar simuliranja i istraživanja sustava upravljanja zračnog prometa. Model je primjenjiv pri optimizaciji ruta, upravljanju kapacitetom zračnog prostora i procjeni utjecaja na okoliš. Osim toga, model značajno

poboljšava operativnu učinkovitost, sigurnosne protokole i održivost okoliša u sustavu upravljanja zračnim prometom, olakšavajući informirano donošenje strateških odluka.

Nadalje, konceptualni okvir razvijenog modela uključuje proces korelacije. Proces korelacije provodi se neovisno za fazu penjanja i za fazu poniranja, pri tome osiguravajući da su procjene potrošnje goriva točne i specifične za pojedinu fazu. U konačnici, izlazne vrijednosti prolaze validaciju i usporedbu u koraku komparativne analize BADA-e. Preciznije, dobiveni podaci se uspoređuju u odnosu na standardne referentne vrijednosti kako bi se ocijenila točnost i pouzdanost generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.

4.1.3. Segment analize troškova i koristi

U nastavku, obrađeni podaci o letu se dalje interpretiraju kao dio segmenta analize troškova i koristi. Prema Raou i suautorima [68], analiza troškova i koristi pruža razumijevanje troškova i koristi koji proizlaze iz određenog događaja u monetarnim vrijednostima. Nadalje, analiza troškova i koristi podrazumijeva uobičajenu praksu unutar tradicionalnih istraživanja izvedivosti. Navedeno omogućuje jednostavno razumijevanje i značajno pomaže u donošenju odluka prevođenjem složenih operativnih utjecaja u jednostavne ekonomske termine. Pružanjem jasne monetarne procjene koristi i troškova povezanih s različitim segmentima i operacijama leta, segment analize troškova i koristi pomaže dionicima donijeti informirane odluke o tome kako optimizirati letačke operacije u odnosu na ekonomske i ekološke koristi. Stoga, u segmentu analize troškova i koristi, početna faza uključuje određivanje emisija, s fokusom na kvantifikaciju emisija koje proizlaze iz prethodno identificiranih segmenta „na istoj visini“. Konkretno, rezultati su procjene emisija CO₂, SO₂ i H₂O. Emisije su ključni pokazatelji ekološkog utjecaja letačkih operacija, a njihova kvantifikacija je ključna za sveobuhvatnu analizu troškova i koristi. Razumijevanjem ekoloških troškova različitih segmenata leta, dionici mogu bolje procijeniti kompromise između operativne učinkovitosti i održivosti okoliša.

Nakon procjene emisija, završni korak uključuje definiranje monetarnih učinaka detektirane neučinkovitosti. Navedeni korak uključuje prevođenje ekoloških i operativnih neučinkovitosti u monetarne vrijednosti, izražene u eurima. Ovaj postupak pruža opipljivu mjeru ekonomskog utjecaja vertikalnih neučinkovitosti leta, omogućujući sveobuhvatno razumijevanje troškovnih implikacija. Predstavljanjem troškovnih implikacija u jasnim monetarnim iznosima, generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u

fazi penjanja i poniranja pomaže dionicima razumjeti financijski utjecaj operativnih neučinkovitosti i donijeti informirane odluke u cilju smanjenja istih. U sažetku, konceptualni okvir i njegovi detaljni segmenti - Podaci o letu, Procjena goriva i Analiza troškova i koristi, homogeno doprinose jasnoći i poboljšavaju razumijevanje evaluacije vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju.

4.2. Metodološki okvir

Metodološki okvir razrađen u sklopu ovog istraživanja za potrebe razvoja generičkog modela se pridržava smjernica definiranih u okviru Dokumenta 9993 [44], kao i u Dokumentu 9931 [57] Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo. Navedeni dokumenti sadrže sveobuhvatne smjernice za operacije kontinuiranog penjanja i operacije kontinuiranog poniranja. Takva praksa rezultirala je time da je razvijeni model u skladu s međunarodno priznatim standardima i smjernicama. U konačnici, metodološki okvir primijenjen tijekom razvoja generičkog modela ima za cilj poboljšati predvidljivost, sigurnost i učinkovitost leta korištenjem raznih metoda obrade podataka i pristupa temeljenih na 4D podacima profila leta.

Generički model identificira faze penjanja i poniranja kroz dinamičku evaluaciju tzv. „prozor putanje“, obuhvaćajući vremensku dimenziju i visinsku dimenziju povezane s unaprijed određenom vertikalnom brzinom. "Prozor putanje" je definiran kao dio putanje između dviju točaka, gdje putanja ostaje unutar određenog raspona. Navedeni raspon obuhvaća vremensku i visinsku dimenziju, koje su određene određenim pragom vertikalne brzine koji razlikuje ravni let od penjanja ili poniranja. Vertikalna brzina predstavlja ključni parametar u razgraničenju između faze krstarenja, penjanja i poniranja promatranog leta. Konkretno, generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti u fazi penjanja i poniranja koristi referentnu vrijednost od 300 stopa po minuti (*feet per minute* – fpm) za vertikalnu brzinu. Navedena vertikalna brzina definira brzinu penjanja ili spuštanja. Spomenuta referentna vrijednost je neophodna za točno identificiranje i analizu faza penjanja i poniranja, osiguravajući jasne i mjerljive prijelaze između različitih faza leta. Definiranje granica mjerenja unutar modela zahtijeva uspostavljanje prethodno spomenutih točaka interesa, odnosno točke vrha penjanja i točke vrha poniranja. Točke interesa označavaju prijelaznu točku između različitih faza leta. U najširem smislu, faza penjanja obuhvaća vertikalni profil leta prije ToC točke interesa, počevši od tla i nastavljajući sve dok zrakoplov ne postigne visinu krstarenja. Pri tome, točka ToC označava kraj faze penjanja i početak faze krstarenja, čineći je ključnom točkom u vertikalnom profilu leta zrakoplova za analizu (ne)učinkovitosti.

Kako bi se odredila donja granica faze penjanja, model se pridržava smjernice Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo definirane u okviru Dokumenta 8168 [69]. Predmetna smjernica navodi konačnu visinu za procedure uzlijetanja sa smanjenom bukom (*Noise Abatement Departure Procedure - NADP*) na 3.000 stopa iznad razine tla (*Above Ground Level - AGL*). Navedena visina služi kao donji prag za fazu penjanja. Uključivanjem navedene visine, model osigurava da je početak faze penjanja, koja je ključna za smanjenje buke i okolišne aspekte, točno zabilježena. Ispravna zabilježenost početka faze penjanja je od iznimne važnosti za minimiziranje utjecaja buke zrakoplova na okolnu zajednicu u neposrednoj blizini zračne luke, pokazujući posvećenost modela održivim i odgovornim praksama sustava upravljanja zračnim prometom.

Airbus [70] navodi kako optimalne faze penjanja i poniranja obično obuhvaćaju manje od 200 nautičkih milja (*Nautical Mile - NM*) od parova zračnih luka. Navedena naznačena udaljenost integrirana je tijekom razvoja u metodološki okvir modela kako bi se izbjegle procedure stepenastog penjanja (*step climb*) tijekom faze krstarenja. Procedure stepenastog penjanja, koje uključuju periodična prilagođavanja visine, manje su učinkovite i troše više goriva u usporedbi s kontinuiranim penjanjem i spuštanjem. Nadovezujući se na raspon od 200 NM, model ima za cilj promovirati ujednačenije i učinkovitije operacije leta. U slučaju da zrakoplov postigne razinu krstarenja prije nego što dosegne udaljenost od 200 NM od polazišne zračne luke, tada, 4D točka koja označava postizanje razine krstarenja služi kao gornja granica mjerenja. Opisani pristup osigurava da je cijela faza penjanja, od polijetanja do visine krstarenja, točno zabilježena unutar analize modela. Upotreba 4D podataka o putanji leta zrakoplova, koji uključuju vrijeme, geografsku širinu, geografsku dužinu i visinu, pružaju detaljni i precizni profil leta zrakoplova, omogućavajući sveobuhvatnu evaluaciju njegove učinkovitosti tijekom faze penjanja.

U okviru faze poniranja, nužno je odrediti pragove mjerenja. Donji prag mjerenja postavljen je na 1.800 stopa AGL. Naznačena visina utvrđena je na temelju prakse u kojoj zrakoplov u prilazu presreće sustav za instrumentalno slijetanje na ili iznad ove visine. Sustav za instrumentalno slijetanje je ključan u završnom prilazu na zračnu luku i najvažniji je element za učinkovito odvijanje operacija prilaza. Na primjer, sustav omogućuje pilotima održavanje dosljedne vertikalne brzine u prilazu, smanjujući potrebu za čestim prilagodbama koje mogu dovesti do neučinkovitosti u vertikalnom profilu. Osim toga, sustav smanjuje rizik odstupanja od predviđene putanje leta što u konačnici, rezultira manjim brojem promašenih prilaza i preusmjeravanja. Postavljanjem donjeg praga na 1.800 stopa AGL, model osigurava da faza

poniranja uključuje ključni segment gdje se angažiraju precizni sustavi slijetanja. Navedeno povećava točnost i pouzdanost analize faze poniranja, podržavajući sigurnije i učinkovitije operacije slijetanja. Opseg promatranja mjerenja za fazu spuštanja proteže se 200 NM od dolazne zračne luke. Navedeni raspon je utvrđen kako bi se obuhvatilo cijelu fazu poniranja, osiguravajući sveobuhvatnu analizu učinkovitosti zrakoplova tijekom ovog kritičnog segmenta. U slučaju da zrakoplov napusti visinu krstarenja manje od 200 NM prije dolaska u zračnu luku, 4D točka koja označava početak spuštanja služi kao gornja granica za mjerenje. Opisani pristup jamči da model točno bilježi prijelaz iz faze krstarenja u fazu spuštanja, pružajući uvid u učinkovitost leta u sklopu faze poniranja. Obuhvaćanjem cijele putanje poniranja, model može identificirati područja za poboljšanje i optimizaciju učinkovitosti leta.

Integracija ovih metodoloških elemenata unutar okvira osigurava da generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u fazama prilaza i penjanja pruža robusnu i detaljnu analizu vertikalne učinkovitosti leta. Pridržavanjem međunarodno priznatih standarda i uključivanjem sveobuhvatnih podataka, model podržava razvoj učinkovitijih i održivijih operacija leta. Precizno mjerenje i analiza omogućuje identifikaciju neučinkovitosti i implementaciju ciljanih poboljšanja, što u konačnici povećava ukupnu uspješnost sustava upravljanja zračnim prometom.

Osim interpretacije podataka u vezi s „prozorima putanja“, odnosno vertikalne brzine i određenih granica mjerenja vertikalne učinkovitosti leta prema ICAO-ovom okviru, model također uzima u obzir „isključujuće okvire“. Isključujući okviri definirani su kako bi se izbjegli segmenti leta „na istoj visini“ koji se javljaju neposredno ispod visine krstarenja. U načelu, isključujući okvir može se protezati od visine gornje granice mjerenja do 90% te visine. U slučaju da se segment „na istoj visini“ pojavi unutar isključujućeg okvira i traje dulje od pet minuta, isključuje se iz konačnih rezultata. Nakon što model procijeni vertikalnu učinkovitost leta, rezultati vezani uz neučinkovitost leta dopunjuju se podacima o potrošnji goriva. U najširem smislu potrošnja goriva se korelira s rezultatima vertikalne neučinkovitosti leta. Odnosno, rezultati kao što su trajanje segmenta „na istoj visini“, visina, udaljenost, incidencija itd., koreliraju se sa modelom performansi zrakoplova integriranim u BADA-u. U konačnici, potrošnja goriva se određuje na temelju agregiranja višestrukih izlaznih vrijednosti i izražava se u kilogramima. Nadalje, emisije i monetarni učinci koji proizlaze iz neučinkovitosti procjenjuju se korištenjem istih izlaznih podataka – podataka o potrošnji goriva. Kako bi se olakšala evaluacija analize troškova i koristi u odnosu na vertikalnu učinkovitost leta, unutar R&D procesa primijenjena je pretpostavka da je cijena goriva izvedena iz prosječne cijene

mlaznog goriva za 2019. godinu, a koju je definiralo Međunarodno udruženje zračnih prijevoznika (*International Air Transport Association – IATA*) [71]. Prema tome, izračun troškova goriva izražava se kao produkt cijene zrakoplovnog goriva po kilogramu i procijenjene potrošnje goriva za svaki let. Prosječna cijena zrakoplovnog goriva je definirana u okviru sadržaja Tablice 1.

Nadalje, kako bi generički model pružao izlazne vrijednosti o emisijama leta, tijekom R&D procesa primijenjene su aproksimacije pretvaranja nalaza potrošnje goriva u agregirane količine emisija CO₂, H₂O i SO₂. U skladu s navedenim, kako bi se olakšao proces procjene emisija, model izvještava rezultate uzimajući u obzir stope konverzije, prikazane u Tablici 1, a koje su izvorno specificirane u okviru EUROCONTROL-ovog dokumenta [72]. Predmetni dokument ključan je izvor podatka za standardizaciju ekonomskih, operativnih i ekoloških učinaka koji se koriste u analizama i procjenama u sektoru zračnog prometa. Dokument uključuje podatke i projekcije za elemente poput troška emisija ugljika i održivih zrakoplovnih goriva. Nadalje, dokument osigurava dosljednost i pouzdanost u ekonomskim procjenama različitih istraživanja. Redovita ažuriranja prate najnovije industrijske trendove i podatke, čineći ga neophodnim za sveobuhvatne ekonomske analize u području zračnog prometa. Uzimajući u obzir navedeno, ukupna količina emisija predstavlja kvantificirani proizvod količine emisija koje se oslobađaju sagorijevanjem zrakoplovnog goriva i potrošnjom goriva.

Primjena metodološkog okvira u kombinaciji sa skupom podataka koji opisuju stvarne profile leta omogućuje jednostavnu usporedbu nalaza za obje faze leta zrakoplova. Vodeći pri tome računa da su uočene razlike posljedica faza leta, a ne varijacija u analitičkoj tehnici. Nadalje, izlazni rezultati su agregirani i predstavljeni kao dio kontinuirane evaluacije performansi leta u dva koraka. Prvi korak uključuje procjenu neusklađenosti stvarnih putanja leta u odnosu na okvire operacija kontinuiranog penjanja i operacija kontinuiranog poniranja. Pri tome, prvi korak uključuje agregiranje i diseminaciju podataka kao što su ukupan broj letova sa segmentima „na istoj visini“, te trajanje i udaljenost tijekom navedenih segmenata. Osim toga, podaci uključuju trajanje i udaljenost faze penjanja i poniranja. Drugi korak je usmjeren na operativne učinke, poglavito u smislu novčanih posljedica i ekološke održivosti. Ekološka održivost se artikulira putem detaljnijeg uvida u količine emisija CO₂, SO₂ i H₂O emisija. Isto tako, održivost se izražava kao količina potrošnje goriva za segmente „na istoj visini“, odvojeno za fazu penjanja i fazu poniranja. Analizom navedenih nalaza, evaluacija pruža sveobuhvatan uvid u ekološki utjecaj i učinkovitost letačkih operacija. Na taj način, metodološki okvir podržan evaluacijom u dva koraka osigurava temeljitu analizu usklađenosti

s operativnim procedurama i njihovim širim implikacijama, čime se podupire informirano donošenje odluka i strateških odrednica za poboljšanje performansi leta i održivosti.

Tablica 1. Standardizirane vrijednosti za troškovnu i ekološku evaluaciju [71][72]

Parametar	Vrijednost (po kilogramu zrakoplovnog goriva)
Cijena goriva (JET FUEL A1)	0,43 €
CO ₂	3,15 kg
H ₂ O	1,237 kg
SO ₂	0,00084 kg

U konačnici, potrebno je naznačiti da je metodološki okvir integriran u razvijeni model pažljivo osmišljen prvenstveno uzimajući u obzir usklađenost sa međunarodno priznatim standardima, smjernicama i pozitivnim praksama. Shodno tome, model osigurava preciznu identifikaciju i analizu faza penjanja i poniranja. Uključivanjem ključnih parametara kao što su vertikalna brzina, točke interesa te specifični visinski pragovi, model promiče učinkovitije i ekološki prihvatljivije operacije leta. Korelacijom nalaza detekcije i identifikacije neučinkovitosti sa standardiziranim odrednicama za izradu ekonomskih analiza, generički model omogućuje precizno definirati ekološke i monetarne učinke neučinkovitosti leta zrakoplova. Na taj način, zahvaljujući prikazanom metodološkom okviru, razvijeni generički model ne samo da podržava trenutne prakse unutar upravljanja zračnim prometom, već pruža pozitivan primjer i polazište za buduća istraživanja u domeni upravljanja zračnim prometom.

5. PRIMJENA GENERIČKOG MODELA ZA PROCJENU VERTIKALNE UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA

U okviru praktične primjene, razvijeni model podvrgnut je validaciji provjerom njegove aplikativnosti. U načelu, validacija razvijenog modela u sklopu istraživanja osigurava njegovu točnost, pouzdanost i vjerodostojnost. Provjera se sastojala od opsežne studije slučaja koja zadire u specifičnosti stvarnih događaja i operativnih scenarija. Unutar studije slučaja, ključnu ulogu imao je sveobuhvatan skup podataka, odnosno skup 4D podataka o profilima letova. Iako je skup podataka izabran nasumično, profili letova nisu bili nasumično odabrani. Oni su odabrani na temelju niza prostornih i vremenskih parametara. Proces odabira profila letova služio je kao neophodni preduvjet za osiguranje temelja i pouzdanosti nastale evaluacije. U skladu s navedenim, selektivni pristup u odabiru profila leta za svrhe istraživanja ne proizlazi iz modela kao razvijenog rješenja, već iz potrebe validacije rješenja, odnosno analize primjenjivosti razvijenog modela. Tako primjerice, kako bi se dodatno potvrdila točnost generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta, svaki profil leta zrakoplova je usklađen s stvarnim podacima o letovima koje je pružio regionalni zračni prijevoznik čiji profili leta su se promatrali. Navedeno je za cilj imalo doprinijeti analizi pouzdanosti rješenja, kao i definirati razinu usklađenosti između izlaznih vrijednosti razvijenog modela i stvarnih operativnih podataka o letu sa svojim specifičnostima. Na taj način, provjera usklađenosti postavljena je kao ključan korak u utvrđivanju primjenjivosti i vjerodostojnosti modela u stvarnim kontekstima zračnog prometa. Uz navedeno, provjera pouzdanosti rješenja doprinijela je jasnoj identifikaciji svih ograničenja ili slabosti modela, omogućujući repetitivna poboljšanja modela i osnaživanje njegove robusnosti. Također, kroz praktičnu provjeru razvijenog modela, omogućena je jednoznačna usporedba s drugim modelima razvijenim u području istraživanja. U konačnici, navedeno je također doprinijelo utvrđivanju prednosti razvijenog modela, ali i nedostataka, kao i daljnjih segmenata unapređenja postojećeg modela.

5.1. Opis skupa podataka

Studija slučaja u sklopu ovog istraživanja se temelji na 4D podacima o profilima letova dobivenim primjenom *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast* sustava. Prema definiciji RTCA [73], ADS-B je nadzorna tehnologija koja omogućava zrakoplovima da emitiraju podatke o identifikaciji, stanju i položaju susjednim zrakoplovima i obližnjim zemaljskim stanicama. Od 2020. godine, ADS-B progresivno postaje jedna od ključnih

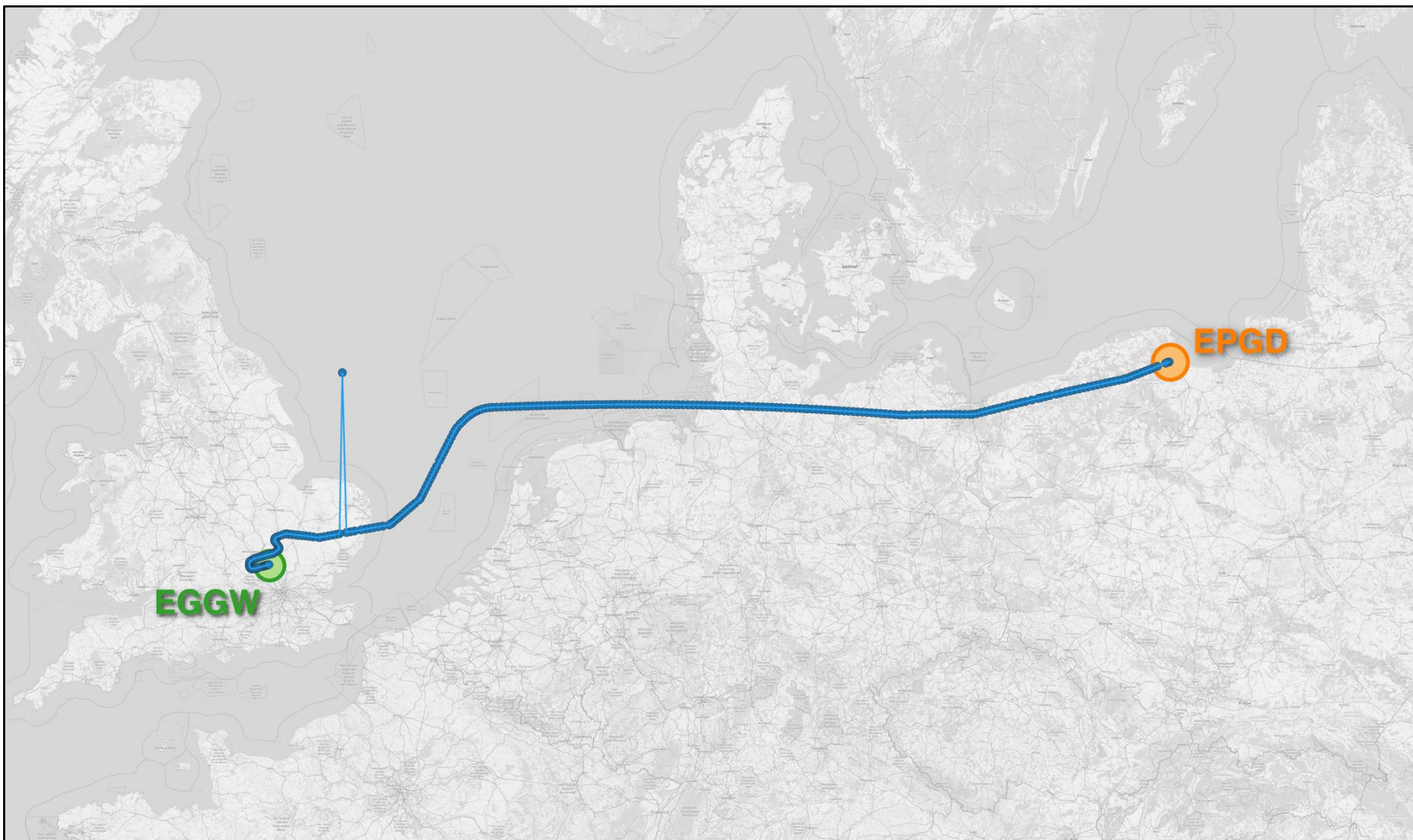
komponenti sustava Komunikacije, navigacije i nadzora (*Communication, Navigation, Surveillance - CNS*). Štoviše, navedeni sustav preporučuje se od strane Međunarodne organizacije civilnog zrakoplovstva kao jedno od rješenja budućeg koncepta upravljanja zračnim prometom. Osim toga, ADS-B pridonosi poboljšanju situacijske svijesti i sigurnosti omogućujući zrakoplovima da u stvarnom vremenu emitiraju i prate svoj položaj, brzinu i druge podatke prema zemaljskim stanicama i drugim zrakoplovima. Operativno gledajući, navedena metoda nadzora značajno poboljšava učinkovitost i točnost sustava kontrole zračnog prometa, povećavajući ukupnu sigurnost letova. Također, uporabom ADS-B sustava, industrija zračnog prometa dalje se razvija prema automatiziranijem i racionaliziranijem upravljanju zračnim prometom, smanjujući ovisnost o tradicionalnim nadzornim sustavima i omogućujući direktnije i ekonomičnije letove [74]. Kao što je ranije navedeno, skup 4D podataka dobiven putem ADS-B tehnologije obuhvaća tri prostorne dimenzije (x: geografska širina, y: geografska dužina, z: visina), zajedno s vremenskom komponentom kao četvrtom dimenzijom. Multidimenzionalni pristup i opisani ADS-B skup podataka pruža sveobuhvatan prikaz putanja letova, omogućujući detaljnu analizu kretanja zrakoplova. Vremenska rezolucija skupa podataka karakterizirana je prosječnim intervalom od 26 sekundi između uzastopnih točaka podataka. Naznačena, relativno visoka, vremenska rezolucija osigurava da su putanje letova zabilježene dovoljno detaljno kako bi se omogućilo precizno praćenje i analiza. Svaka točka podataka u skupu predstavlja specifičan trenutak u vremenu, bilježeći položaj zrakoplova u trodimenzionalnom prostoru.

U skladu s konceptualnim okvirom razvijenog modela, 4D podaci o profilima letova prošli su kroz prethodnu obradu prije daljnje manipulacije. Prema Tyagiu [75], predobrada podrazumijeva ključan početni korak u analizi podataka jer pretvara neobrađene podatke u korisne informacije. Neobrađeni podaci, posebno iz ADS-B sustava, često mogu biti nepotpuni, redundantni ili bučni. Nepotpuni podaci mogu izostaviti određene vrijednosti, redundantni podaci mogu sadržavati duplicirane informacije, a bučni podaci mogu uključivati pogreške ili nedosljednosti.

Predobrada je nužna kako bi se osigurala točnost i dosljednost podataka te spremnost za daljnju analizu. Faza predobrade ADS-B podataka uključivala je nekoliko ključnih koraka. U početku su provedene provjere valjanosti podataka kako bi se identificirali i riješili nedostajući ili nepotpuni podaci. Tehnika kao što je interpolacija koristila se za procjenu nedostajućih vrijednosti na temelju okolnih točaka podataka, osiguravajući kontinuirani i cjeloviti skup podataka. Redundantne točke podataka, koje bi se mogle pojaviti zbog

višestrukih emitiranja istih informacija, identificirane su i uklonjene kako bi se pojednostavio skup podataka. Tijekom procesa predobrade ispravljene su specifične netočnosti inherentne u ADS-B podacima. Spomenute netočnosti najčešće su uključivale vertikalne i horizontalne nedosljednosti u položaju zrakoplova. Vertikalne nedosljednosti odnose se na pogreške u podacima o visini, dok horizontalne nedosljednosti uključuju pogreške u podacima o geografskoj širini i dužini. Kao primjer horizontalne nedosljednosti, analizirana je horizontalna putanja komercijalnog leta između Zračne luke Gdańsk Lech Wałęsa (ICAO oznaka: EPGD) u Poljskoj i Zračne luke London Luton (ICAO oznaka: EGGW) u Ujedinjenom Kraljevstvu. U navedenom primjeru su korišteni podaci dobiveni putem ADS-B sustava. Na slici 8 je prikazan je opisani primjer horizontalne putanje leta u kojoj je otkrivena pogreška u zapisu geografske širine pri kraju putanje leta. Otklanjanje ove pogreške se postiglo putem tehnike glađenja.

Učestalost netočnosti u okviru skupa podataka korištenih u okviru provedene studije slučaja nije bila statistički značajna. Međutim, njihova prisutnost je potencijalno mogla utjecati na kvalitetu analize - ako se ne ispravi. Kako bi se minimizirao značaj netočnosti u skupu podataka, korištena je kombinacija tehnika glađenja podataka i standardizacije podataka. Načelno, glađenje podataka pomaže ukloniti kratkoročne fluktuacije, pružajući jasnije podatke o stvarnoj putanji leta. Standardizacija podataka osigurava da podaci odgovaraju dosljednom formatu, što olakšava usporedbu i analizu. Ponovna obrada podataka rezultirala je točnijim, odnosno pouzdanijim skupom podataka, što je ključno za svaku daljnju analizu (*garbage-in, garbage-out*). Dodatno, navedeni pristup se koristio i za otkrivanje i ispravljanje iznimaka - točaka podataka koje značajno odstupaju od očekivanog obrasca. Takve iznimke su najčešće rezultat pogrešnih emitiranja podataka ili privremenih problema sa sustavom pozicioniranja zrakoplova. Identificiranje tih iznimki održava se cjelokupni integritet skupa podataka. Na prikazani način, otklanjanje eventualnih problema, odnosno nedostataka u ulaznom skupu podataka, tijekom faze predobrade, omogućena je daljnja analiza točnih i standardiziranih 4D podataka o profilima letova. Osigurana kvaliteta prethodno obrađenih podataka pružila je osnovu za daljnju analizu putanja letova, procjenu učinkovitost leta i identifikaciju potencijalnih područja za operativno poboljšanje.



Slika 8. Primjer horizontalne nedosljednosti u putanji leta

5.2. Istraživačke odrednice studije slučaja

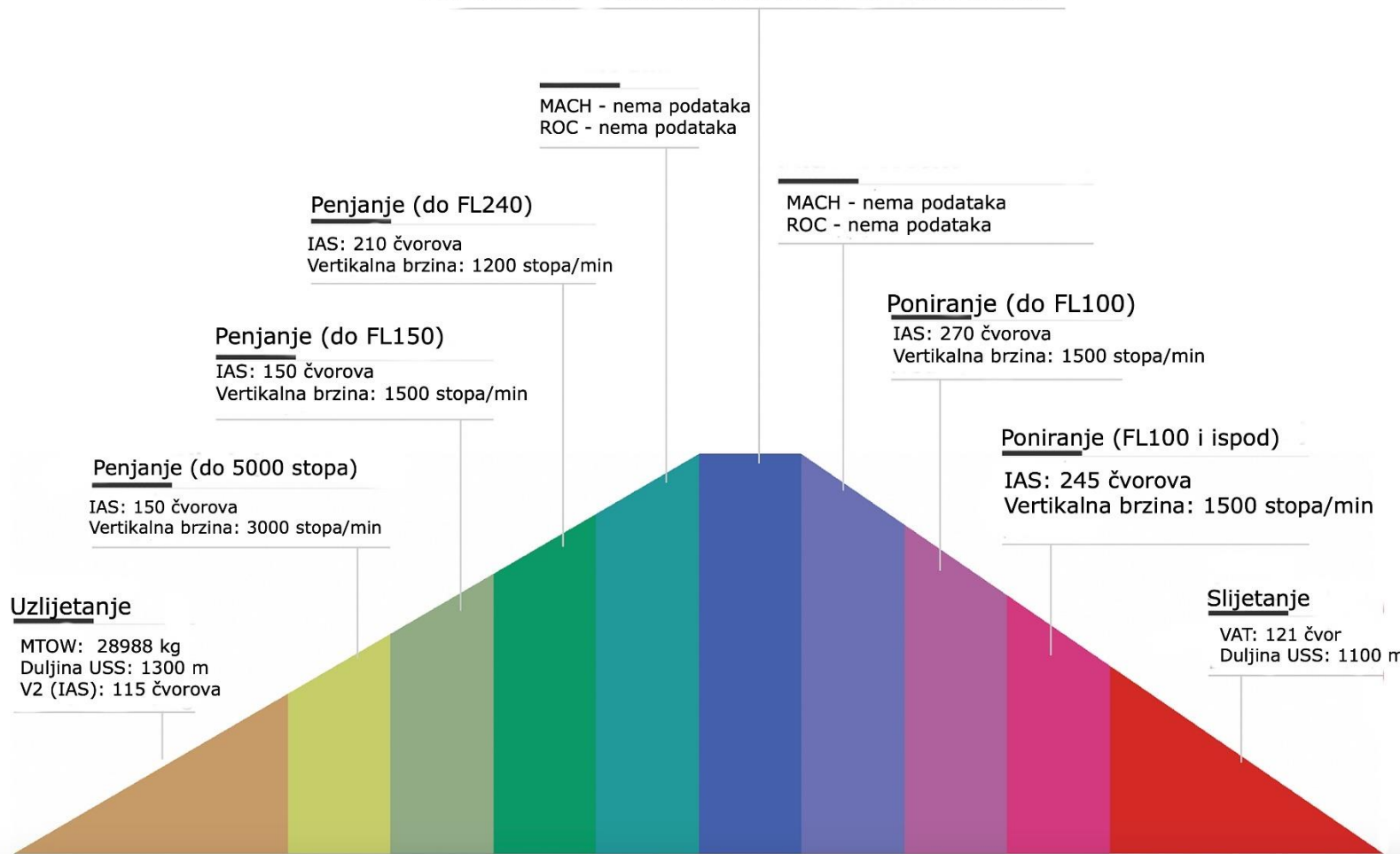
Studija slučaja u sklopu ovog istraživanja obuhvaća nekoliko ključnih istraživačkih odrednica, pružajući detaljno razumijevanje opsega i metodologije istraživanja. Za potrebe studije slučaja odabrano je 10 redovnih letova. Vremenska odrednica istraživanja obuhvaćala je letove obavljene između 20. i 30. listopada 2023. godine. Uzorak od 10 letova omogućava prikupljanje raznolikih operativnih scenarija i uvjeta letova. Prosječno trajanje letova u studiji slučaja iznosilo je jedan sat i 27 minuta. Prema WRAP-u [76] i CAPA-i [77] letovi ispod tri sata kategoriziraju se kao kratki letovi (*short-haul flights*). Sukladno navedenom, letovi promatrani u okviru studije slučaja mogu se klasificirati kao kratki letovi. Poglavito iz razloga što se vrijednost prosječnog trajanja leta uklapa unutar vrijednosti trajanja kratkog leta prema CAPA i WRAP-u. Navedena kategorizacija je značajna iz razloga što kratki letovi imaju specifične operativne karakteristike u usporedbi s dugim vrstama letova. U pogledu udaljenosti, nema općenito prihvaćene definicije ili industrijske prakse, posebice u globalnoj perspektivi tržišta, koja razlikuje kratke letove od ultra kratkih i letova srednjeg te dugog doleta zrakoplova. U sklopu istraživanja poslovnih modela zračnih prijevoznika, Klophaus i Yu [78] su definirali kratke letove kao izravne letove koji pokrivaju udaljenosti od 500 km (311 milja) do 2500 km (1553 milja) između parova zračnih luka. Važno je napomenuti da kratke letove karakterizira i brže vrijeme prijehata i otpreme zrakoplova. Osim toga, Klophaus i Yu navode da kratki letovi, uglavnom, povezuju regionalne zračne luke, a što je između ostalog i slučaj u okviru studije slučaja provedene u okviru ovog istraživanja.

Svi uzorkovani letovi u studiji slučaja ovog istraživanja obavljani su *De Havilland Canada DHC-8-400*, elisnomlaznim zrakoplovom. Navedeni zrakoplov predstavlja dodatno produženu i učinkovitiju verziju serije *Dash-8*. Opremljen je novom, tišom pogonskom grupom i računalno upravljanim sustavom za suzbijanje buke i vibracija. Pri tome se značajno poboljšava udobnost putnika. Oznaka tipa sadrži "Q" za *quiet*, što naglašava smanjenu razinu buke. Pored proizvodnog pogona u Kanadi, proizvodnja ovog zrakoplova se dijeli s tvrtkom Mitsubishi u Japanu, koristeći njihove napredne proizvodne tehnologije za osiguranje visoke kvalitete i performansi. Povrh toga, indikativni podaci o performansama zrakoplova, prikazani na slici 9, ističu njegovu praktičnost za kraće regionalne letove. Zrakoplov može postići maksimalnu brzinu krstarenja od približno 667 km/h (360 čvorova) i dolet od 1300 nautičkih milja ovisno o teretu i operativnim uvjetima. Njegova maksimalna masa pri polijetanju iznosi oko 28.988 kg. Nadalje, u maksimalnoj konfiguraciji zrakoplov može primiti do 90 putnika.

Uz to, Dash-8 je poznat po svojoj energetskej učinkovitosti i mogućnosti uzlijetanja i slijetanja s kratkih uzletno-sletnih staza, što potvrđuje njegovu praktičnu ulogu za regionalnu povezanost [79].

Faza krstarenja

TAS: 360 čvorova Maksimalna visina leta: FL250 Dolet: 1300 NM



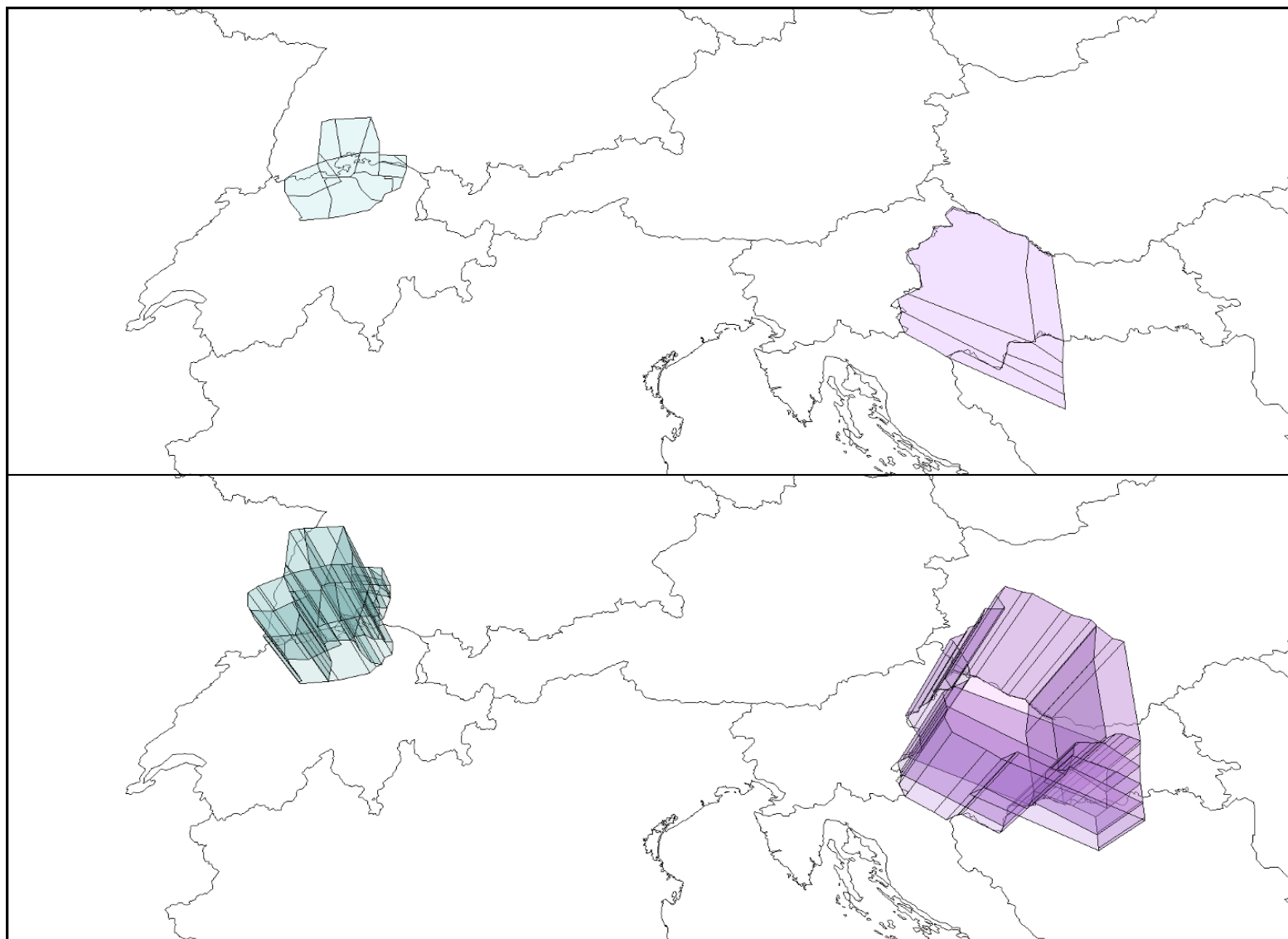
Slika 9. Podaci o performansama zrakoplova De Havilland Canada DHC-8-400

Izvor: [82]

Što se tiče prostornih odrednica, studija slučaja se usredotočila na letove unutar Europe. Polazišna zračna luka za sve letove obuhvaćene studijom slučaja je Zračna luka Franjo Tuđman (ICAO oznaka: LDZA) u Hrvatskoj, kojom od 2013. godine upravlja tvrtka *Međunarodna zračna luka Zagreb d.d.* Odredišna zračna luka za letove u ovoj studiji je Zračna luka Zürich u Švicarskoj, kojom upravlja tvrtka *Flughafen Zürich AG*. Opisani par zračnih luka odabran je radi osiguravanja dosljednosti i usporedivosti letova međusobno. Važno je istaknuti postojanje razlika u konfiguraciji, dizajnu i kapacitetu zračnog prostora predmetnih lokacija.

U Republici Hrvatskoj, tvrtka Hrvatska kontrola zračne plovodbe d.o.o. je odgovorna za pružanje usluga u zračnoj plovidbi. Za potrebe Zračne luke Franjo Tuđman, Hrvatska kontrola zračne plovodbe d.o.o. pruža usluge aerodromske kontrole zračnog prometa. Osim toga, tvrtka pruža usluge prilazne kontrole zračnog prometa u završnoj kontroliranoj oblasti Zagreb. Navedene usluge osiguravaju urednu i sigurnu koordinaciju dolaznih i odlaznih operacija na Zračnoj luci Franjo Tuđman. Uvođenje postupaka za smanjenje buke u Zračnoj luci Franjo Tuđman ključno je za smanjenje utjecaja zrakoplovstva na okoliš okolnih zajednica i osiguravanje održivog poslovanja. Zrakoplovi koji uzlijeću s uzletno-sletne staze 04 se moraju pridržavati postupka NADP 1, definiranog u ICAO dokumentu 8168 OPS/611 VOL III [80][81]. Isto tako, prilikom operacija uzlijetanja s uzletno-sletne staze 22, operatori zrakoplova moraju slijediti NADP 1 postupak [80]. Navedeni postupci su osmišljeni s ciljem smanjenja buke u područjima u neposrednoj blizini aerodroma, osiguravajući da operacije zrakoplova poštuju međunarodne standarde za smanjenje buke i doprinose ukupnom smanjenju zagađenja bukom.

U Švicarskoj konfederaciji, tvrtka *Skyguide, Swiss Air Navigation Services Ltd.*, zadužena je za pružanje usluga u zračnoj plovidbi. Tvrtka pruža operativne usluge u zračnom prometu u sklopu švicarskog područja letnih informacija (*Flight information region - FIR*) i gornjeg područja letnih informacija. Jurisdikcija švicarskog ATS-a obuhvaća zračni prostor iznad Švicarske, Lihtenštajna, te dijelove susjednih stranih zračnih prostora, uključujući one Njemačke, Francuske i Austrije. Osim toga, *Skyguide, Swiss Air Navigation Services Ltd.*, pruža usluge aerodromske i prilazne kontrole zračnog prometa na Zračnoj luci Zürich. Vertikalno i horizontalno prostiranje završnih kontroliranih oblasti Zagreb i Zürich, prikazano je na slici 10. Vizualizacija pruža sveobuhvatan pregled složene strukture prilaznog zračnog prostora Zračne luke Zürich i Zračne luke Franjo Tuđman. Također, vizualizacija doprinosi jasnijem i boljem razumijevanju slojeva kontroliranog zračnog prostora i granica sektora.



Slika 10. Horizontalno (gornji prikaz) i vertikalno prostiranje (donji prikaz) završnih kontroliranih oblasti Zračnih luka Zürich i Zagreb

Nadalje, analizom prostorne komponente, svi letovi unutar ove studije slučaja su prošli kroz zračne prostore Hrvatske, Slovenije, Njemačke i Švicarske. Tako su svi promatrani letovi izvedeni unutar granica dva značajna funkcionalna bloka zračnog prostora:

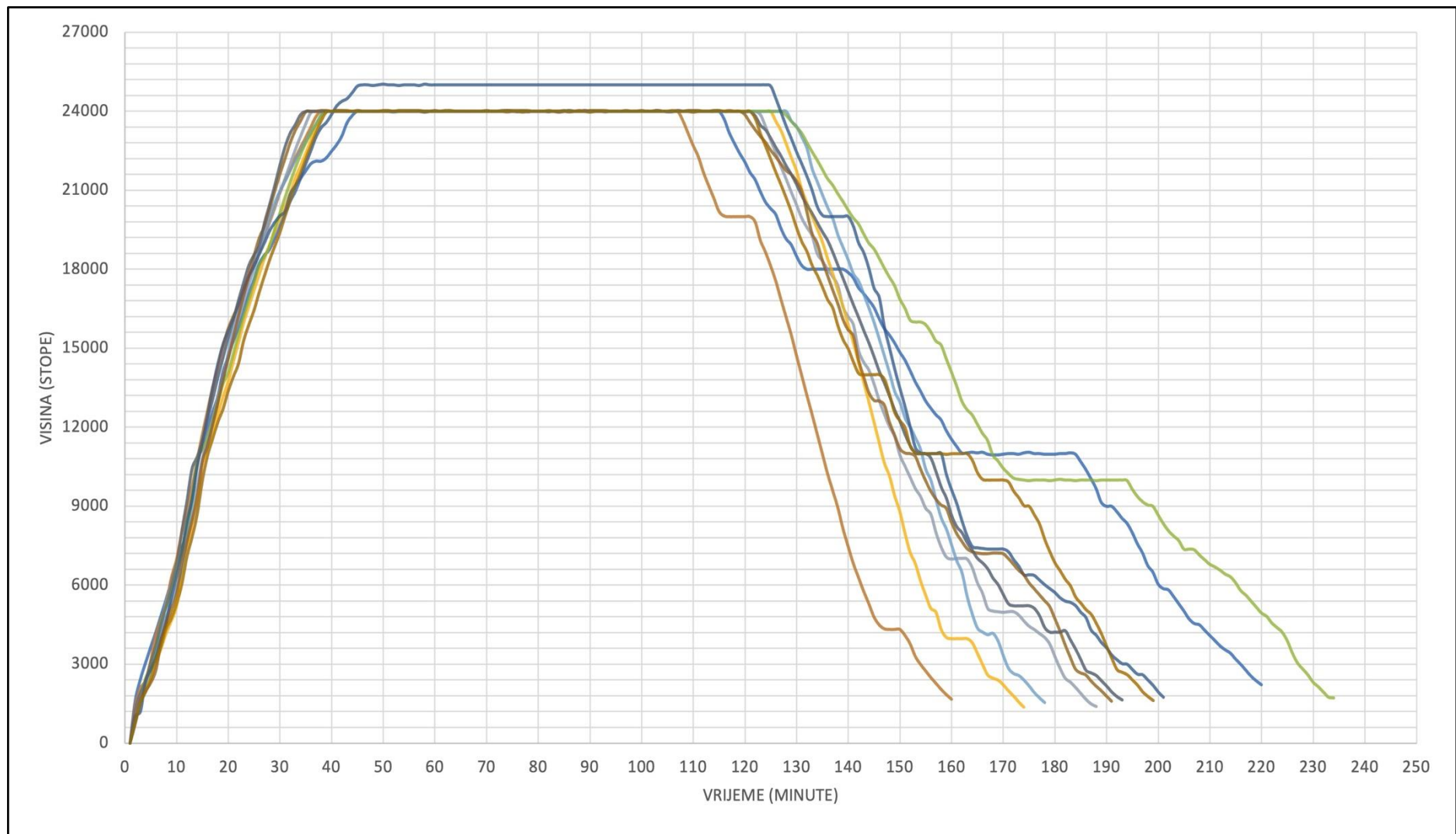
- *Functional Airspace Block Central Europe (FAB CE)*,
- *Functional Airspace Block Europe Central (FABEC)*.

Navedeni blokovi zračnog prostora imaju za cilj poboljšati učinkovitost upravljanja zračnim prometom preko nacionalnih granica, čime je njihovo razmatranje od velike važnosti za jasnije razumijevanje utjecaja operativnih okvira na profile promatranih letova. Slika 11 prikazuje prostorne odrednice studije slučaja ovog istraživanja. Preciznije, slika prikazuje horizontalne putanje leta zrakoplova. Grafički prikaz horizontalne putanje leta bitan je u kontekstu jasnijeg razumijevanja geografskog okvira i strukture zračnog prostora u kojem su izvedeni promatrani letovi. Također, prikaz uključuje pregled horizontalnih putanja proučavanih profila letova, prikazujući stvarne rute koje su pređene između dviju zračnih luka.

Vertikalni profil proučavanih letova prikazan je u sklopu grafa 1. Navedeni graf detaljno prikazuje promjene, odnosno oscilacije, u visini tijekom trajanja svakog leta. Na ordinati se nalazi zapis visine u mjernoj jedinici stopa, dok se na apscisi nalazi zapis o vremenu u minutama. Promatranje zapisa apscise i ordinate bitno je za razumijevanje različitih aspekata performansi leta, kao što su primjerice učinkovitost potrošnje goriva i pridržavanje uputa kontrole zračnog prometa. Osim toga, grafičkim prikazom mogu se uočiti segmenti „na istoj visini“ u profilima letova. Detaljni podaci o visini pružaju uvid u faze penjanja, krstarenja i poniranja letova, ističući sve anomalije ili obrasce koji bi mogli zahtijevati daljnje istraživanje.



Slika 11. Prikaz horizontalnog profila uzorkovanih letova



Graf 1. Prikaz vertikalnog profila uzorkovanih letova

6. SINTEZA REZULTATA STUDIJE SLUČAJA

Sinteza rezultata studije slučaja prikazuje sveobuhvatne nalaze dobivene analizom prikupljenih izlaznih podataka. Rezultati su organizirani i kategorizirani prema istraživačkim pitanjima, odnosno hipotezama navedenim u uvodnom poglavlju predmetnog istraživanja, osiguravajući koherentan i logičan slijed u interpretaciji istih. Kvantitativni podaci prvo su sažeti koristeći deskriptivnu statistiku. Tako se utvrđivanjem osnovnih statističkih značajki promatranog skupa podataka izlaznih vrijednosti, poput srednjih vrijednosti, medijana, standardnih devijacija, minimalnih i maksimalnih vrijednosti, nastojao osigurati jasan pregled distribucije skupa izlaznih vrijednosti. Nakon toga provodi se inferencijalna statistička analiza kako bi se testirala predložena hipoteza, utvrđujući statističku značajnost uočenih razlika i uzročno-posljedičnih veza. Navedene analize imaju za cilj pružiti kvantitativne uvide te doprinose robusnijoj interpretaciji izlaznih podataka u kontekstu postavljenih istraživačkih hipoteza. Osim deskriptivne analize, kvalitativni podaci tematski se analiziraju kako bi se otkrili dublji uvidi i nijansirana razumijevanja promatranih fenomena. Tematska analiza uključuje kodiranje podataka i identificiranje ponavljajućih uzoraka i obrazaca, koji se zatim raspravljaju u odnosu na istraživačka pitanja. Rezultati su argumentirani na način kako bi se osigurala jasnoća i relevantnost u odnosu na svrhu i cilj istraživanja. Izdvojeni su statistički značajni obrasci, trendovi i odstupanja, pružajući jasnije razumijevanje takvih podataka. Svi nalazi su predstavljeni na način koji je usklađen s metodološkim okvirom modela, osiguravajući pouzdanu interpretaciju. U analizu rezultata uključeni su dodaci kao što su tablice kako bi podržali tekstualne opise i pružili vizualni prikaz podataka. Osim toga, kreirane tablice nude sažet način predstavljanja kvantitativnih rezultata, smanjujući potrebu za dugim opisima u glavnom tekstu.

U okviru istraživanja, nomenklatura osigurava preciznost i jasnoću definiranjem svih tehničkih pojmova, čime se izbjegavaju možebitni nesporazumi i terminološke nejasnoće. Osim toga, usklađuje istraživanje s utvrđenim znanstvenim standardima, olakšavajući učinkovitu komunikaciju i opće razumijevanje sadržaja. Nadalje, sadržaj nomenklature je vidljiv u Tablici 2. Pri tome, pojam DrLS odnosi se na trajanje segmenta „na istoj razini“, označavajući ukupno vrijeme tijekom kojeg let održava stalnu visinu bez penjanja ili poniranja. Uz to, DisLS označava udaljenost prijeđenu tijekom tih segmenata. Omjer λ_{drLSPH} uspoređuje trajanje segmenta „na istoj visini“ s ukupnim trajanjem odgovarajuće faze leta, bilo penjanja

ili poniranja, čime se daje uvid u udio vremena dodijeljenog segmentima razine u odnosu na cijelu fazu. Slično, λ_{disLSPH} uspoređuje udaljenost segmenta razine s ukupnom udaljenošću odgovarajuće faze leta, olakšavajući razumijevanje prostorne raspodjele segmenata razine unutar faze. Pojam \bar{X}_{drLS} predstavlja prosječno trajanje segmenata razine kroz više letova, nudeći mjeru konzistentnosti i tipičnog ponašanja zrakoplova tijekom tih segmenata. Nasuprot tome, \bar{X}_{disLS} označava prosječnu udaljenost prijedenu u segmentima razine kroz više letova, što je ključno za procjenu ukupne učinkovitosti i izvedbe ruta leta. Omjer λ_{flLSPH} uspoređuje količinu potrošenog goriva tijekom segmenta „u istoj razini“ s ukupnom potrošnjom goriva tijekom odgovarajuće faze leta, pružajući uvid u učinkovitost korištenja goriva kroz različite segmente leta. Konačno, λ_{flcLSPH} predstavlja omjer troška goriva utrošenog tijekom segmenta razine s ukupnim troškom goriva korištenog tijekom cijelog leta, što je od značajne važnosti u procjeni ekonomskih aspekata operacija leta zrakoplova.

Tablica 2. Nomenklatura

Oznaka	Nomenklatura
DrLS	Trajanje segmenta „na istoj visini“ (<i>Duration of level segment</i>)
DisLS	Udaljenost segmenta „na istoj visini“ (<i>Distance of level segment</i>)
λ_{drLSPH}	Omjer trajanja segmenta „na istoj visini“ i faze (<i>Ratio of duration of level segment to phase</i>)
λ_{disLSPH}	Omjer udaljenosti segmenta „na istoj visini“ i faze (<i>Ratio of distance of level segment to phase</i>)
\bar{X}_{drLS}	Prosječno trajanje segmenta „na istoj visini“ (<i>Average duration of level segment</i>)
\bar{X}_{disLS}	Prosječna udaljenost segmenta „na istoj visini“ (<i>Average distance of level segment</i>)
λ_{flLSPH}	Omjer potrošnje goriva između segmenta „na istoj visini“ i svih faza leta (<i>Ratio of fuel consumed between level segment and phase</i>)
λ_{flcLSPH}	Omjer troška goriva segmenta „na istoj visini“ i svih faza leta (<i>Ratio of fuel cost of level segment to phase</i>)

6.1. Analiza rezultata detekcije profila letova

Kvantitativna analiza provedene studije slučaja otkriva da je ukupno trajanje faze penjanja (za 10 letova), značajno kraće u usporedbi s fazom spuštanja, s prosječnim omjerom od 42,3%. Navedena vrijednost temelji se na kumulativnom trajanju faze penjanja od dva sata i 50 minuta, dok faza poniranja kumulativno traje šest sati i 43 minute. Što se tiče udaljenosti, faza penjanja pokriva manji geografski prostor, u prosjeku 42,0% ukupne prijedene udaljenosti

u usporedbi s fazom poniranja. Konkretno, faza penjanja pokriva 687,42164 NM, dok faza spuštanja pokriva 1.638,13897 NM. Detaljni rezultati trajanja i udaljenosti s omjerima faza letova prikazani su u Tablici 3. Uz navedeno, deskriptivna analiza obuhvaća i medijan, standardnu devijaciju, te minimalne i maksimalne vrijednosti za obje faze. Medijan trajanja faze penjanja iznosi 16 minuta i 46 sekundi, uz standardnu devijaciju od minute i 53 sekunde, pri čemu se trajanje kreće od najmanje 14 minuta i 46 sekundi do najviše 20 minuta i 21 sekundu. Navedeni podaci ukazuju na relativno konzistentno trajanje faze penjanja među različitim uzorcima. S druge strane, medijan trajanja faza spuštanja iznosi 43 minute i 36 sekundi, sa standardnom devijacijom od 11 minuta i dvije sekunde, pri čemu se trajanje kreće od najmanje 20 minuta i 17 sekunda do najviše 52 minute i dvije sekunde. Navedene vrijednosti sugeriraju veću varijabilnost u trajanju faze spuštanja u usporedbi s fazom penjanja.

Promatrajući udaljenosti, medijan udaljenosti izmjeren tijekom faza penjanja iznosi 66,99481 NM, uz standardnu devijaciju od 9,03788 NM, s rasponom od 58,29692 NM do 84,26830 NM. Navedeni podaci pokazuju relativno usku distribuciju udaljenosti nastalih tijekom faze penjanja, što upućuje na dosljednost u ovoj fazi. Faza poniranja, pak, pokazuje medijan udaljenosti od 189,67281 NM, uz standardnu devijaciju od 46,21947 NM, s rasponom od 84,50893 NM do 197,89690 NM. Navedeni nalazi sugeriraju da faza poniranja pokriva šire geografsko područje, što može biti rezultat različitih faktora koji utječu na ovu fazu leta.

Tablica 3. Rezultati detekcije profila letova

Parametar	Faza penjanja	Faza poniranja	Omjer
Ukupno trajanje (10 letova)	2:50:23	6:43:03	42,3%
Medijan trajanja po letu	0:16:46	0:43:36	38,5%
Standardna devijacija trajanja	0:01:53	0:11:02	17,1%
Minimum trajanja	0:14:46	0:20:17	72,8%
Maksimum trajanja	0:20:21	0:52:02	39,1%
Ukupna udaljenost (10 letova)	687,42164 NM	1.638,13897 NM	42,0%
Medijan udaljenosti po letu	66,99481 NM	189,67281 NM	35,3%
Standardna devijacija udaljenosti	9,03788 NM	46,21947 NM	19,6%
Minimum udaljenosti	58,29692 NM	84,50893 NM	69,0%
Maksimum udaljenosti	84,26830 NM	197,89690 NM	42,6%

U sklopu ovog istraživanja ispitana je ukupna potrošnja goriva za 10 letova, prikazana u Tablici 4. Za sve profile letova ta vrijednost kumulativno iznosi 14.961,96 kilograma (kg) goriva. Navedena potrošnja goriva se prevodi u trošak od 6.433,30 eura. U prosjeku, svaki profil leta potroši 1.496,19550 kg goriva, što prouzrokuje troškove od 643,33 eura. Razvijeni model za predviđanje potrošnje goriva pokazao se vrlo preciznim, s razinom pouzdanosti većom od 95,00%, što se usko podudara sa stvarnim podacima o potrošnji goriva koje je prijavio promatrani zračni prijevoznik. Uz navedeno, podaci profila letova ukazuju da je minimalna potrošnja goriva iznosila 1.281,53 kg, što je rezultiralo troškovima u iznosu od 551,06 €. Naznačeno ističe učinkovitost profila leta s najnižom stopom potrošnje. S druge strane, profil leta s najvećom potrošnjom goriva koristio je 1.757,04 kg goriva, što je dovelo do značajno većih troškova u vrijednosti od 755,53 €. Ova usporedba naglašava značajnu korelaciju, odnosno utjecaj učinkovitost potrošnje goriva na ukupne operativne troškove zračnog prijevoznika. Što se tiče emisija, profili letova ukupno su emitirali značajne količine tvari u atmosferu. Ukupna emisija uključuje 18.506,95 kg H₂O, koja je jedna od prirodnih komponenti emisija zrakoplovnih operacija. Također, profili letova su emitirali 12,57 kg SO₂ emisija, čiji su utjecaji na okoliš također važni za razmatranje. Uz to, letovi su ukupno emitirali 42.127,64 kg CO₂, koji je glavni antropogeni plin odgovoran za globalno zatopljenje.

Tablica 4. Rezultati sveobuhvatne potrošnje goriva i emisija letova

Parametar	Količina goriva	Troškovi goriva	H ₂ O	SO ₂	CO ₂
Ukupno	14.961,95500 kg	6.433,64065 €	18.507,93834 kg	12,56804 kg	47.130,15825 kg
Prosjek	1.496,19550 kg	643,36407 €	1.850,79383 kg	1,25680 kg	4.713,01583 kg
Medijan	1.463,99750 kg	629,51893 €	1.810,96491 kg	1,22976 kg	4.611,59213 kg
Standardna devijacija	132,62661 kg	57,02944 €	164,05912 kg	0,11141 kg	417,77382 kg
Minimum	1.281,52833 kg	551,05718 €	1.585,25055 kg	1,07648 kg	4.036,81425 kg
Maksimum	1.757,04000 kg	755,52720 €	2.173,45848 kg	1,47591 kg	5.534,67600 kg

6.1. Deskriptivna analiza neučinkovitosti faze penjanja

Tablica 5 pruža detaljan uvid u rezultate istraživanja o neučinkovitostima uočenim tijekom faze penjanja zrakoplova, usmjeravajući se primarno na procjenu utjecaja performansi

različitih segmenata leta. Tijekom faze penjanja, segmenti „na istoj visini“ identificirani su u 10% profila letova, s ukupnim trajanjem od 90 sekundi i prosječnim trajanjem od 9 sekundi po segmentu „na istoj visini.“ Kao što je ranije navedeno, ove neučinkovitosti predstavljaju kritične trenutke kada zrakoplov ne ostvaruje optimalnu visinsku promjenu, što može biti uzrokovano različitim operativnim i tehničkim čimbenicima. Ukupna prijeđena udaljenost tijekom segmenata „na istoj visini“ iznosila je 6,53 NM, s prosjekom od 0,65 NM po segmentu.

Potrošnja goriva tijekom ovih segmenata iznosila je 28,95 kilograma, što je rezultiralo troškovima od 12,45 eura i emisijama od 35,81 kilograma H₂O emisija, 0,02 kilograma SO₂ emisija i 91,19 kilograma CO₂ emisija. Navedene vrijednosti jasno ilustriraju ekonomski i ekološki utjecaj neučinkovitosti tijekom faze penjanja. Dodatno, Tablica 5 prikazuje deskriptivne rezultate, odnosno, prosječne vrijednosti, medijane, standardne devijacije, minimalne i maksimalne vrijednosti, pružajući detaljan uvid u varijabilnost i prirodu neučinkovitosti tijekom ove faze leta. Osim toga, istraživanje stavlja naglasak na prostornu distribuciju ovih nalaza, uspoređujući prosječna trajanja „na istoj visini“ između različitih funkcionalnih blokova zračnog prostora.

Uzimajući u obzir da su letovi obavljani između FAB CE i FABEC, provedena je usporedna analiza učinka na razini FAB-ova, odnosno pružatelja koji čine iste. Prvenstveno kako bi se utvrdio odnos, izražen omjerima, između nalaza studije slučaja i nalaza dobivenih od strane Jedinice za nadzor učinkovitosti za promatrane funkcionalne blokove zračnog prostora. Usporedna analiza osmišljena je kako bi se ocijenile i uskladile razlike između empirijskih podataka izvedenih iz studije slučaja i službenih pokazatelja uspješnosti koje je pružilo tijelo za nadzor učinkovitosti. Na taj način analiza doprinosi boljem razumijevanju učinkovitosti operacija u zračnom prostoru između predmetnih geografskih regija. Preciznije, za FAB CE, omjer je iznosio 19,63840%, dok je za FABEC bio 18,83502%. Kada se usporede s prosjecima Jedinice za nadzor učinkovitosti za Zračnu luku Zagreb i Zračnu luku Zürich, procjene modela pokazale su omjere od 31,88643% i 18,83502%. Takvi omjeri se očekivani s obzirom na to da se odnose na relativno mali skup letova. Nasuprot tome, podaci dobiveni od Jedinice za nadzor učinkovitosti obuhvaćaju cijeli mjesec, pružajući širu perspektivu na pokazatelje učinkovitosti. Udio trajanja "segmenata na istoj visini" u odnosu na ukupno trajanje faze penjanja bio je 0,88296%, dok je udio udaljenosti "segmenata na istoj visini" u odnosu na ukupnu udaljenost faze penjanja bio 0,95321%. Navedeni pokazatelji jasno ilustriraju kako relativno mali segmenti mogu imati relativno značajan utjecaj na ukupnu učinkovitost faze penjanja.

Naposljetku, rezultati ukazuju na to da su omjeri potrošnje goriva i pripadajućih troškova tijekom cijelog leta iznosili 0,193501%. Ovo pokazuje kako se neučinkovitost u potrošnji goriva tijekom faze penjanja može direktno prevesti u povećane operativne troškove, čime se dodatno naglašava važnost optimizacije. Navedeni uvidi nepobitno naglašavaju važnost razumijevanja i smanjenja neučinkovitosti tijekom faze penjanja. Prvenstveno s ciljem poboljšanja ukupne razine performanse leta, uključujući smanjenje operativnih troškova i minimiziranje štetnih utjecaj zračnog prometa na okoliš.

Tablica 5. Rezultati neučinkovitosti u sklopu faze penjanja

Parametar	Ukupno	Prosjek	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
DrLS	0:01:30	0:00:09	0:00:00	0:00:28	0:00:00	0:01:30
DisLS	6,53089 NM	0,65309 NM	0,00000 NM	2,06525 NM	0,00000 NM	6,53089 NM
H ₂ O	35,81115 kg	3,58111 kg	0,00000 kg	11,32448 kg	0,00000 kg	35,81115 kg
SO ₂	0,02432 kg	0,00243 kg	0,00000 kg	0,00769 kg	0,00000 kg	0,02432 kg
CO ₂	91,19250 kg	9,11925 kg	0,00000 kg	28,83760 kg	0,00000 kg	91,19250 kg
Količina goriva	28,95000 kg	2,89500 kg	0,00000 kg	9,15479 kg	0,00000 kg	28,95000 kg
Troškovi goriva	12,44850 €	1,24485 €	0,00000 €	3,93656 €	0,00000 €	12,44850 €
FAB CE ¹	0:05:21 (zbroy prosjeka svih članica)	0:00:46	0:00:45	0:00:16	0:00:22	0:01:14
FABEC ¹	0:03:34 (zbroy prosjeka svih članica)	0:00:43	0:00:41	0:00:08	0:00:35	0:00:53
LDZA ¹	-	0:00:28	-	-	-	-
LSZH ¹	-	0:00:52	-	-	-	-
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ FAB CE			19,63840%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ FABEC			18,83502%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ LDZA			31,88643%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ LSZH			17,39883%			
λ_{drLSPH}			0,88296%			
$\lambda_{disLSPH}$			0,95321%			
λ_{flLSPH}			0,193501%			
$\lambda_{flcLSPH}$			0,193501%			

¹ Podatak Jedinice za nadzor učinkovitosti [80]

6.2. Deskriptivna analiza neučinkovitosti faze poniranja

Za fazu poniranja, svi profili letova sadržavali su barem jedan segment „na istoj razini“, s ukupnim trajanjem od 00:36:27 i prosječnim trajanjem od 00:03:39 po segmentu „na istoj razini“. Ukupna prijeđena udaljenost tijekom segmenta „na istoj razini“ iznosila je 131,29 NM, s prosjekom od 13,13 NM po segmentu „na istoj razini“. Potrošnja goriva tijekom segmenta „na istoj razini“ u fazi poniranja bila je značajno veća, iznosila je 754,87 kg, što je prouzrokovalo troškove od 324,60 eura, te je rezultiralo emisijama od 933,78 kg emisija H₂O, 0,64 kg emisija SO₂ i 2.377,86 kg emisija CO₂. Detaljna analiza neučinkovitosti unutar faze poniranja je prikazana u Tablici 6.

Usporedbe trajanja neučinkovitosti između nalaza studije slučaja i podataka Jedinice za nadzor učinkovitosti pokazale su omjer od 51,00612% za FAB CE i 104,40802% za FABEC. Provedena je usporedba rezultata studije slučaja s podacima Zračne luke Zürich dobivenih od strane Jedinice za nadzor učinkovitosti. Navedeni omjer je iznosio 117,99997% što dodatno prikazuje značajnu pouzdanost rezultata dobivenih putem generičkog modela za praćenje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Pored navedenog, prethodno navedeni omjer prosječnog trajanja neučinkovitosti u studiji slučaja i FAB CE, također ukazuje na vjerodostojnost modela za praćenje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Trajanje segmenta „na istoj visini“ u odnosu na trajanje faze u fazi poniranja iznosilo je 9,04354%, a omjer udaljenosti prijeđene tijekom trajanja neučinkovitosti i udaljenosti faze poniranja iznosio je 8,01463%. Omjer potrošnje goriva tijekom neučinkovitosti i svih faza leta iznosio 5,045566%. Isti rezultat se odnosi i na omjer troškova goriva prouzrokovane neučinkovitošću tijekom faze poniranja i troškova goriva svih faza leta.

U kontekstu monetarnih učinaka za zračnog prijevoznika, neučinkovitost u fazi poniranja može dovesti do značajnog povećanja operativnih troškova, s prosječnim dodatnim troškom od 32,46 € po letu na paru uzorkovanih zračnih luka. Usporedno s fazom penjanja u kojoj prosječni dodatni trošak iznosi 1,25 €. Čak i minimalni troškovi, u fazi poniranja, povezani s neučinkovitošću, prema nalazima studije slučaja, iznose 1,37 €, što ukazuje na to da svaka neučinkovitost, bez obzira na to koliko mala, ima mjerljiv financijski utjecaj. Nadalje, vertikalna neučinkovitost leta, osobito tijekom faza penjanja i poniranja, dodatno pridonosi ovim troškovima, s maksimalnim troškom goriva od 83,16 € utvrđenim putem generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti leta. Za razliku od faze poniranja, nalazi u fazi penjanja ukazuju na iznos od 12,45 € što je, ujedno, jednaka vrijednost ukupnim generiranim

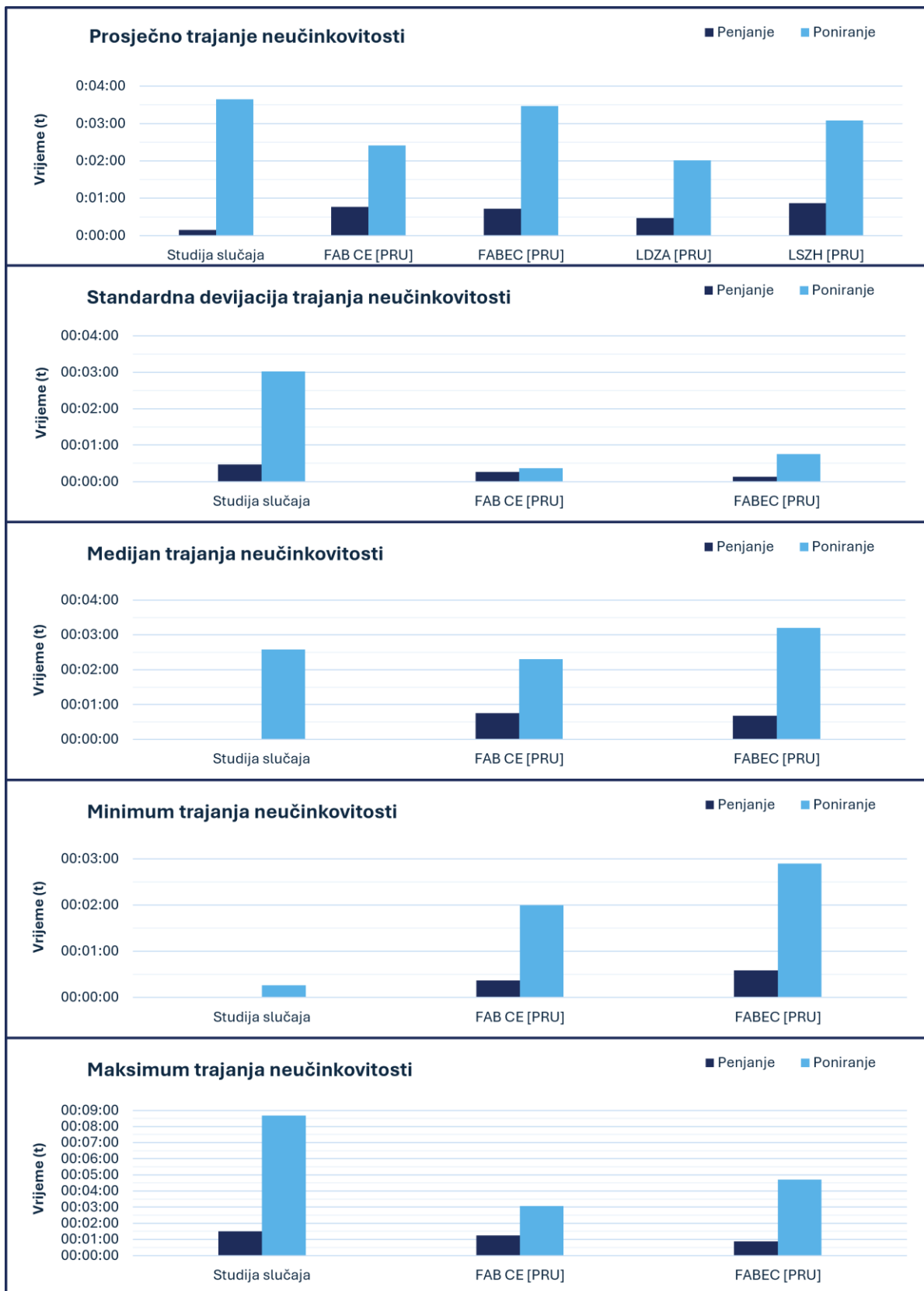
troškovima neučinkovitosti u sklopu faze penjanja. K tome, rezultati naglašavaju značajnu relevantnost u smislu potrebe za optimizacijom vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Prvenstveno kako bi se smanjili nepotrebni operativni troškovi. Pored navedenog, rezultati također jasno ukazuju na gospodarski i društveni potencijal izražen u smislu utjecaja troškovnih ušteda i ekološke koristi kroz poboljšanje vertikalnog profila leta i u konačnici, učinkovitosti leta.

Vizualizacija podataka ključna je komponenta u učinkovitom prenošenju složenih informacija, omogućujući istraživačima da predstavljaju podatke na jasan način. Korištenjem različitih grafičkih tehnika, vizualizacija podataka pomaže u otkrivanju obrazaca, trendova i odnosa unutar podataka, čime olakšava intuitivnije razumijevanje i omogućuje donošenje informiranijih odluka. Shodno tome, na slici 12 su prikazani odnosi faze penjanja i poniranja studije slučaja i nalaza dobivenih od strane Jedinice za nadzor učinkovitosti. Konkretno, prikazan je omjer prosječnog trajanja, standardne devijacije, medijana, minimuma i maksimuma za faze penjanja i poniranja. U kontekstu postavljene hipoteze istraživanja, na temelju prikazanog jednoznačno proizlazi argumentiranost tvrdnji da upotreba naprednih alata za vizualizaciju podataka može značajno poboljšati interpretaciju i utjecaj istraživačkih nalaza.

Tablica 6. Rezultati neučinkovitosti u sklopu faze poniranja

Parametar	Ukupno	Prosjek	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
DrLS	0:36:27	0:03:39	0:02:35	0:03:01	0:00:16	0:08:41
DisLS	131,29071 NM	13,12907 NM	9,99893 NM	10,81613 NM	1,09244 NM	31,83388 NM
H ₂ O	933,78038 kg	93,37804 kg	52,00142 kg	89,17646 kg	3,92541 kg	239,23992 kg
SO ₂	0,63410 kg	0,06341 kg	0,03531 kg	0,06056 kg	0,00267 kg	0,16246 kg
CO ₂	2377,85625 kg	237,78563 kg	132,42075 kg	227,08638 kg	9,99600 kg	609,22050 kg
Količina goriva	754,87500 kg	75,48750 kg	42,03833 kg	72,09091 kg	3,17333 kg	193,40333 kg
Troškovi goriva	324,59625 €	32,45963 €	18,07648 €	30,99909 €	1,36453 €	83,16343 €
FAB CE ²	0:16:54 (zbroj prosjeka svih članica)	0:02:25	0:02:18	0:00:22	0:02:00	0:03:04
FABEC ²	0:17:18 (zbroj prosjeka svih članica)	0:03:28	0:03:12	0:00:45	0:02:54	0:04:42
LDZA ²	-	0:02:01	-	-	-	-
LSZH ²	-	0:03:05	-	-	-	-
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ FAB CE			51,00612%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ FABEC			104,40802%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ LDZA			181,46104%			
Omjer $\bar{X}_{drLS}/\bar{X}_{drLS}$ LSZH			117,99997%			
λ_{drLSPH}			9,04354%			
$\lambda_{disLSPH}$			8,01463%			
λ_{flLSPH}			5,045566%			
$\lambda_{flcLSPH}$			5,045566%			

² Podatak Jedinice za nadzor učinkovitosti [80]



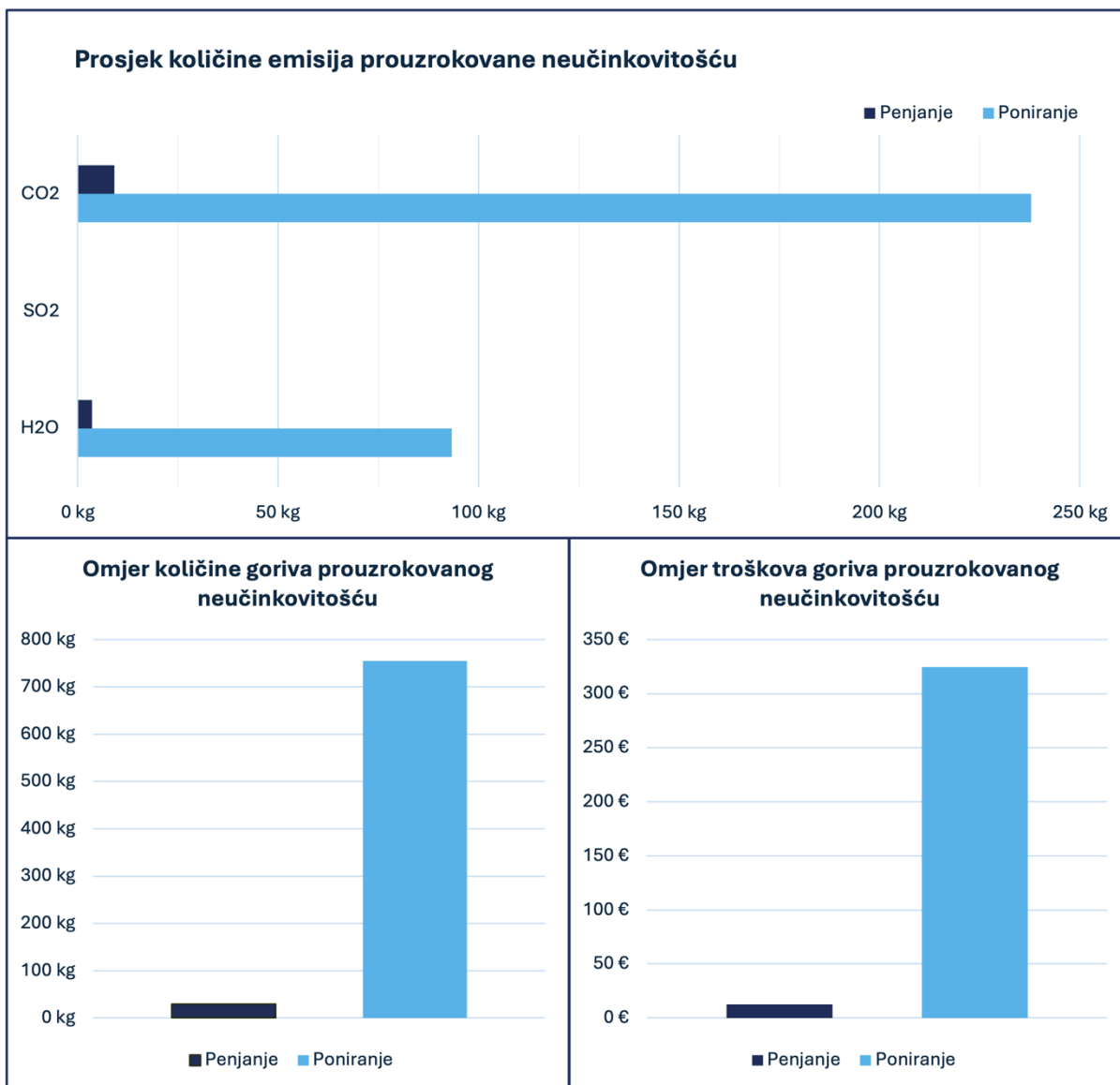
Slika 12. Vizualizacija rezultata neučinkovitosti

Trajanje segmenta „na istoj visini“ tijekom faze penjanja bilo je značajno kraće nego tijekom faze poniranja, s omjerom od 4,11523%. Slično tome, udaljenost prijeđena tijekom segmenta „na istoj visini“ u fazi penjanja bila je manja, s omjerom od 4,97437%. Emisije tijekom segmenta „na istoj visini“ u fazi penjanja bile su niže, s omjerom od 3,83507%. Omjeri za potrošnju goriva i troškove bili su dosljedni s tim postocima. Dodatno, prosječne vrijednosti trajanja i udaljenosti segmenta „na istoj visini“ u fazi penjanja u usporedbi s fazom poniranja iznosile su 4,11523% i 4,97437%. Promatrani omjeri prosječnog trajanja neučinkovitosti tijekom faza penjanja i poniranja unutar FAB CE, FABEC, Zračnoj luci Franjo Tuđman i Zračnoj luci Zürich, značajno su viši u usporedbi s omjerima dobivenim iz studije slučaja. Navedena razlika proizlazi zbog nekoliko razloga. Naime, podaci korišteni u ovim omjerima prikupljeni su od Jedinice za nadzor učinkovitosti, koja je provela sveobuhvatno istraživanje obuhvaćajući veći skup letova zabilježen tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Uzimajući u obzir da je studija slučaja razmatrala učinke za samo 10 letova, može se zaključiti da bi opsežniji skup podataka omogućio identificiranje neučinkovitosti u širem spektru letova. Omjeri faze penjanja i poniranja su prikazani u Tablici 7.

Tablica 7. Omjer faze penjanja i poniranja

Oznaka	Omjer faze penjanja i faze poniranja
DrLS	4,11523%
DisLS	4,97437%
H ₂ O	3,83507%
SO ₂	3,83507%
CO ₂	3,83507%
Količina goriva	3,83507%
Troškovi goriva	3,83507%
\bar{X}_{drLS}	4,11523%
\bar{X}_{disLS}	4,97437%
\bar{X}_{drLS} FAB CE	31,64332%
\bar{X}_{drLS} FABEC	22,81190%
\bar{X}_{drLS} LDZA	23,41915%
\bar{X}_{drLS} LSZH	27,90973%

Unutar okvira sustava upravljanja zračnim prometom i područja ekološke učinkovitosti, provedena je detaljna procjena kako bi se kvantificirale emisije CO₂, H₂O i SO₂ koje su posljedica vertikalne neučinkovitosti leta. Navedena procjena prikazana je na slici 13. Pri tome, studija slučaja je pokazala da takve neučinkovitosti dovode do značajnih ekoloških utjecaja u fazi poniranja u odnosu na fazu penjanja, s prosječnim emisijama od 93,37804 kg emisija H₂O po letu, 0,06341 kg emisija SO₂ po letu i 237,78563 kg emisija CO₂ po letu u fazi poniranja. Omjer u navedenom slučaju iznosi 3,83507%. Sveobuhvatna analiza kvantificira utjecaje na okoliš povezane s vertikalnim neučinkovitostima leta i ističe potrebu za ciljanim intervencijama kako bi se smanjila razina štetnih emisija i poboljšala ukupna učinkovitost leta. Osim toga, na slici 13 prikazan je i omjer količine dodatne potrošnje goriva prouzrokovane neučinkovitošću profila leta zrakoplova. Isto tako, prikazan je i omjer dodatnih operativnih troškova goriva nastale tijekom faze penjanja i poniranja zrakoplova.



Slika 13. Procjena omjera goriva, troškova i utjecaja na okoliš povezanih s neučinkovitostima tijekom penjanja i poniranja

U konačnici, opisani omjeri, u praktičnom smislu, ukazuju na to da detektirane i kvantificirane neučinkovitosti leta zrakoplova, artikulirane u smislu njihovog trajanja i udaljenosti, imaju značajno manje vrijednosti tijekom faze penjanja u usporedbi sa neučinkovitostima tijekom faze poniranja. Posljedično, utjecaj na okoliš detektiranih neučinkovitosti u fazi penjanja je „manji“ u usporedbi sa učincima ostvarenim tijekom faze poniranja. K tome, istovjetan trend je otkriven u omjerima količine goriva i troškova goriva.

7. PRIJEDLOG POBOLJŠANJA VERTIKALNE UČINKOVITOSTI LETA ZRAKOPLOVA U PRILAZU I PENJANJU

Poglavlje pod naslovom *Prijedlog poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju* bavi se ključnim aspektima poboljšanja u pogledu performansi zrakoplova tijekom dvije promatrane faze leta zrakoplova. Kako bi se sveobuhvatno obradilo navedeno pitanje, poglavlje je podijeljeno u dva potpoglavlja. Prvo potpoglavlje, *Strateške smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova*, opisuje strategije na visokoj razini i dugoročno planiranje neophodno za optimizaciju i implementaciju postupaka za poboljšanje istog. Spomenuto uključuje preporuke donositeljima odluka, osvrt na tehnološki napredak kao i okvira za suradnju dionika koji mogu značajno utjecati na unapređenje vertikalne učinkovitost leta zrakoplova. Drugo potpoglavlje, *Praktične smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova*, sažima prijedloge za djelotvorne korake i najbolje prakse u području istraživanja. Na taj način, opisane smjernice pružaju pregled metoda i aktivnosti koje korisnici zračnog prostora, pružatelji usluga u zračnoj plovidbi i državne zrakoplovne vlasti mogu implementirati u cilju poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova, tako nadilazeći jaz između strateških ciljeva i svakodnevnih operacija. U konačnici, ova potpoglavlja pružaju holistički pregled poboljšanja vertikalne učinkovitosti, osvrćući se i na strateške smjernice definirane na globalnoj i regionalnoj razini kao i na praktične aspekte provedbe iste.

7.1. Strateške smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova

U sklopu potpoglavlja pod nazivom *Strateške smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova* sintetiziran je skup strateških smjernica, ključnih za poboljšanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova tijekom faza prilaza i penjanja. Potpoglavlje je koncipirano u dva dijela. Prvi dio predstavlja osvrt na strateške smjernice na globalnoj razini, usredotočujući se na okvir i perspektivu koje osigurava Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo. Drugi dio predstavlja analizu regionalnog konteksta, preciznije, konteksta Europe. Pri tome, predstavlja se doprinos i uloga svakog dionika unutar europskog sustava zračnog prometa. Opisana analiza naglašava važnost suradničkih napora na regionalnoj razini za postizanje poboljšanja u vertikalnoj učinkovitosti leta zrakoplova tijekom faza prilaza i penjanja.

7.1.1. Strateške smjernice na globalnoj razini

Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva predstavlja ključnog dionika u unapređenju vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u fazama penjanja i poniranja. Kao specijalizirana agencija Ujedinjenih naroda, ICAO, u najširem smislu, uspostavlja globalne standarde i preporučene prakse koje uređuju sustav civilnog zrakoplovstva. Pri tome, organizacija osigurava sigurnost, učinkovitost i ekološku održivost zračnog prometa. Doprinosi organizacije značajni su i u prizmi vertikalne učinkovitosti leta, u kojima optimizacija profila penjanja i poniranja može dovesti do značajnih poboljšanja u učinkovitosti goriva, smanjenju emisija ugljika i ukupnoj operativnoj učinkovitosti. Kako bi se poboljšala vertikalna učinkovitost leta tijekom faza penjanja i poniranja na globalnoj razini, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo bi trebala prioritetno usvojiti i implementirati napredne tehnologije i operativne procedure. Navedeno uključuje promicanje korištenja operacija kontinuiranog penjanja i poniranja, koje, u konačnici, smanjuju potrebu za segmentima “na istoj visini”. Naglasak na integraciji Koncepta navigacije bazirane na performansama (*Performance Based Navigation – PBN*), također omogućuje zrakoplovima da prate učinkovitije vertikalne profile, prilagođene specifičnim sposobnostima zrakoplova i uvjetima prometa. Osim toga, razvoj procesa Zajedničkog donošenja odluka (*Collaborative Decision Making - CDM*), koji uključuje pružatelje usluga u zračnoj plovidbi, zračne prijevoznike i zračne luke osigurava koordiniranu težnju prema optimizaciji vertikalne učinkovitosti leta.

Osim navedenog, ključna smjernica je standardizacija protokola dijeljenja podataka i komunikacije u stvarnom vremenu između dionika. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo olakšava razmjenu informacija o najboljim praksama, naprednim tehnologijama i proceduralnim inovacijama. Povrh toga, nužno je poticati usklađivanje sustava upravljanja zračnim prometom na globalnoj razini u svrhu usklađivanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Nadalje, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo uspostavlja harmonizirane modele za mjerenje performansi vertikalne učinkovitosti leta, osiguravajući kontinuirano poboljšanje i prilagodbu strategija. Također, teži ka razvoju programa obuke i obrazovanja kako bi se poboljšale vještine pilota i kontrolora zračnog prometa, potičući kulturu sigurnosti i učinkovitosti u fazama penjanja i poniranja leta.

Kako bi se potaklo unapređenje i prikazali izazovi implementacije vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo je razvila nekoliko ključnih dokumenata koji su vezani za ovu problematiku. Kao što je prethodno spomenuto, temeljni dokumenti u prizmi vertikalne učinkovitosti leta na globalnoj razini su

dokumenti 9993 i 9931. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo je, u sklopu Dokumenta 9993 [44], definirala četiri faze implementacije operacija kontinuiranog penjanja. Preciznije, ove četiri faze uključuju:

- faza planiranja,
- faza dizajna,
- faza validacije,
- faza implementacije.

Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo, u dokumentu 9993 [44], naglašava kako je uvažavanje ključnih načela bitno za osiguranje sigurnosti, suradnje i učinkovitosti prilikom unapređenja vertikalne učinkovitosti leta. Sigurnost nikada ne smije biti ugrožena, a bliska suradnja između pružatelja usluga u zračnoj plovidbi, operatora zrakoplova i operatora aerodroma predstavlja nužnost. Razlog tome je prvenstveno to što implementacija operacija kontinuiranog penjanja i poniranja može zahtijevati značajne promjene unutar dizajna zračnog prostora.

Nadalje, u dokumentu [44] je navedeno da se učinkovita implementacija operacija kontinuiranog penjanja oslanja na optimiziranje profila penjanja, minimiziranje nepotrebnih ograničenja i omogućavanje unapređenje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Operacije kontinuiranog penjanja bi trebale biti integrirane s cjelokupnim procedurama, uzimajući u obzir utjecaje na dolaske, planirane promjene i povezane postupke. Postupci bi trebali podržavati penjanje bez ograničenja duž unaprijed planiranih vertikalnih profila. Osim toga, procedure uzlijetanja sa smanjenom bukom trebaju biti integrirane bez ugrožavanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Optimiziranje profila penjanja za operativnu učinkovitost i učinkovitost goriva je ključno, a upravljanje brzinom to može dodatno poboljšati. Koordinacija kontrole zračnog prometa je neophodna kako bi se spriječila zabuna, a operacije kontinuiranog penjanja ne bi trebale negativno utjecati na kapacitet, sigurnost ili druge operacije. Implementacija bi trebala biti jednostavna, temeljena na iskustvu uvođenja procedura. U načelu, operacije kontinuiranog penjanja bi trebale izbjeći operativne nedostatke. Procjena osnovne izvedbe je prvi korak, budući da se optimalna razina kontinuiranog penjanja može postići i sa postojećim postupcima. U konačnici, promjene putanje leta mogu zahtijevati konzultacije s vanjskim subjektima kao dio lokalnih procesa pristanka i pravnih procedura.

U prizmi operacija kontinuiranog poniranja, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo, u dokumentu [57], navodi kako učinkovitost operacija kontinuiranog poniranja

ovisi o upotrebi odobrenja kontrole zračnog prometa koje sprječavaju rani, odnosno kasni početak faze poniranja, minimiziraju potisak, izbjegavaju nepotrebne segmente „na istoj visini“ i omogućuju zrakoplovu da leti optimalnim brzinama i profilima radi unapređenja vertikalne učinkovitosti. Pri tome, optimalni profil zahtijeva fiksnu lateralnu putanju i unaprijed planiranu vertikalnu putanju kako bi se omogućilo nesmetano poniranje, s objavljenim ograničenjima razine definiranim da to podrže. Na višim nadmorskim visinama, gdje je buka zrakoplova manje značajna, fokus se pomiče na poboljšanje učinkovitosti goriva i smanjenje emisija. Upravljanje energijom ključno je za uspješne operacije kontinuiranog poniranja, s odgovarajućom kontrolom brzine koja predstavlja ključan čimbenik; čak i malo smanjenje brzine prilaza može značajno smanjiti utjecaj buke. Implementaciji operacija kontinuiranog poniranja treba pristupiti pragmatično, počevši od jednostavnih postupaka i nadovezujući se na iskustvo, pripremajući se za usvajanje novih tehnologija.

7.1.2. Strateške smjernice na regionalnoj razini

U geografskom području Europske konferencije civilnog zrakoplovstva (*European Civil Aviation Conference - ECAC*), EUROCONTROL-ova Sedmogodišnja prognoza za razdoblje 2024.-2030. [83], predviđa značajan oporavak i rast zračnog prometa nakon smanjenja prometne potražnje zbog pandemije COVID-19 tijekom prethodnih godina. Tako na kraju 2024. godine, EUROCONTROL očekuje da će broj letova dosegnuti 10,6 milijuna. Navedeni broj letova predstavlja povećanje od 4,9% u usporedbi s 2023. godinom, uz interval pouzdanosti od $\pm 2,3$ postotna boda. Navedeni rast ukazuje na oporavak do 96% razine iz 2019. godine, što odražava oporavak nakon učinaka pandemije COVID-19. Iako je riječ o snažnom oporavku, prognoza prometa ne ukazuje na potpuni oporavak prometa u usporedbi s 2019. godinom. Nadalje, EUROCONTROL očekuje nastavak trenda oporavka, s predviđenim porastom broja letova na 10,9 milijuna u 2025. godini (99% razine iz 2019.), te daljnji rast na 11,2 milijuna letova (101% razine iz 2019.) do 2026. godine. Osim toga, EUROCONTROL predviđa da će se do ljeta 2025. broj mjesečnih letova vratiti na razine iz 2019. godine, što je ključni pokazatelj povratka potražnje tijekom vrhunca turističke sezone.

Nakon 2025. godine, EUROCONTROL [83] predviđa da će broj letova rasti po prosječnoj godišnjoj stopi od 2,0%, uz moguću varijaciju od $\pm 1,4$ postotna boda. Do 2030. godine očekuje se da će ukupan broj letova iznositi više od 12 milijuna i tako premašiti razine prije pandemije. Predviđeni porast predstavlja izazove i prilike za dionike, uključujući zračne

prijevoznike, operatore zračnih luka, pružatelje usluga u zračnoj plovidbi i donositelje politika, koji moraju surađivati kako bi upravljali promjenjivim okruženjem i osigurali nesmetan oporavak i širenje industrije. Osim toga, s obzirom na očekivano povećanje prometa, poboljšanje sustava upravljanja zračnim prometom postaje sve važnije. Posebno je važno poboljšati vertikalnu učinkovitost leta zrakoplova u fazama penjanja i poniranja. Kao što je ranije navedeno, optimiziranje ovih faza može pomoći u smanjenju potrošnje goriva, smanjenju emisija i povećanju sigurnosti, što je ključno za učinkovito upravljanje rastućim brojem letova.

U okvirima Akcijskog plana za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja (*CCO/CDO Action Plan*) [84] razvijenog od strane EUROCONTROL-ove Radne skupine za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja (*CCO/CDO Task Force*), istaknuto je da bi optimizacija faza penjanja i poniranja mogla donijeti značajne koristi. Jedna od koristi uključuje uštede do 350.000 tona goriva godišnje za zračne prijevoznike. Navedeno rezultira smanjenju emisija od preko jedan milijun tona CO₂ i približno 150 milijuna eura u troškovima goriva. Međutim, postizanje potpune vertikalne učinkovitosti u fazama penjanja i poniranja u Europi može biti izazovno zbog različitih čimbenika. Čimbenici uključuju sigurnosne zahtjeve, poput održavanja odgovarajuće udaljenosti između zrakoplova, kao i vremenske uvjete, ograničenja kapaciteta i radno opterećenje kontrolora zračnog prometa. Spomenute međuovisnosti znače da, iako je idealno težiti potpunoj optimizaciji, kao što je prethodno spomenuto, određena razina operativne neučinkovitosti predstavlja nužnost u kontekstu održavanja fleksibilnosti i učinkovitosti prometne mreže u Europi.

Institucije poput prethodno spomenutog SESAR-a trebale bi u svoje planove istraživanja i razvoja uključiti aktivnosti i smjernice usmjerene na poboljšanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Nadalje, u smislu strateških odrednica koje teže maksimiziranju vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju potrebno je izdvojiti aktivnosti i mjere iz djelokruga SESAR-a. Primjeri strateških odrednica su [84]:

- poticanje inovacija - identificiranje i razvoj naprednih tehnologija i procedura koje poboljšavaju vertikalnu učinkovitost leta,
- strateška integracija - osiguranje da se područje istraživanja vertikalne učinkovitosti leta integrira u SESAR-ov strateški plan. Pri tome, usklađujući ih s budućim sustavima upravljanja zračnim prometom i infrastrukturom,
- suradničko istraživanje - suradnja s dionicima iz industrije, uključujući zračne prijevoznike, pružatelje usluga u zračnoj plovidbi i operatore aerodroma, kako bi se provela istraživanja i razvila rješenja koja poboljšavaju vertikalnu učinkovitost leta.

- regulatorna usklađenost - koordinacija s regulatornim tijelima za uspostavljanje standarda i smjernica koje podržavaju implementaciju optimizirane vertikalne učinkovitosti leta,
- praćenje izvedbe - implementacija postupaka za praćenje performansi vertikalne učinkovitosti leta, osiguravajući kontinuirano poboljšanje i usklađenost s ciljevima zaštite okoliša i učinkovitosti.

Osvrtom na ova područja, SESAR može značajno doprinijeti smanjenju potrošnje goriva, minimiziranju utjecaja na okoliš i poboljšanju ukupne učinkovitosti leta i sigurnosti zračnog prometa.

7.2. Praktične smjernice poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova

U okviru EUROCONTROL-ovog dokumenta [84], navodi se da europski sustav zračnog prometa uključuje više dionika, a odgovornost za omogućavanje, implementaciju i izvođenje operacija kontinuiranog penjanja i poniranja raspodijeljena je, posljedično, između više različitih dionika. Pri tome, poboljšanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova nije isključiva odgovornost letačkog osoblja, stručnjaka za oblikovanje letačkih postupaka ili kontrole zračnog prometa, već je riječ o zajedničkoj odgovornosti. Dionici europskog sustava zračnog prometa trebaju se pridržavati jedinstvenog pristupa upravljanju zajedničkim i pojedinačnim dužnostima u prizmi poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. EUROCONTROL smatra kako odgovornost leži na svima uključenima i da je ključ uspjeha u suradnji. Na primjer, spomenuta suradnja uključuje diseminaciju informacija, podizanje svijesti o uštedama goriva i ekološkim prednostima optimizacije vertikalne učinkovitosti leta te standardizaciju mjerenja performansi prema usklađenim europskim definicijama. Korištenje inovativnih rješenja kao što su *CCO/CDO Tool Kit* i *Performance Dashboard*, u načelu može poboljšati vertikalnu učinkovitost leta i podržati široku primjenu CCO/CDO na najvišim razinama. Implementacija CCO/CDO postupaka zajedno s pridržavanjem načela za optimizaciju vertikalnih profila navedenih u Planu za poboljšanje Europske mreže ruta (*European Route Network Improvement Plan – ERNIP*), također je od izrazite važnosti. Redovita ažuriranja Akcijskog plana trebaju odražavati napredak u sustavu upravljanja zračnim prometom, poput dizajna zračnog prostora prema Konceptu navigacije bazirane na performansama. Uspostavljanje suradničkih foruma može olakšati raspravu o operativnim poboljšanjima i najboljim praksama. Osim toga, treba redovito usuglašavati i optimizirati

sporazume o suradnji (*Letters of Agreement* - LoA) između sektora zračnog prostora i granica područja letnih informacija kako bi se smanjila ograničenja i vertikalna neučinkovitost leta. Suradnja u pogledu novih rješenja s proizvođačima zrakoplova i promicanje razvoja naprednih ATM/CNS koncepata također predstavlja jednu od ključnih odrednica strategije za poboljšanje buduće razmjene podataka o namjeravanim putanjama i parametara FMS-a, čime se u konačnici optimizira vertikalna učinkovitost leta.

7.2.1. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti Mrežnog upravitelja

U okvirima poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova, Mrežni upravitelj (*Network Manager* – NM) ima nekoliko ključnih odgovornosti. Odgovornosti podrazumijevaju blisku suradnju s Europskom radnom skupinom za CCO/CDO kako bi se osigurala učinkovita provedba i praćenje implementacije spomenutih postupaka. Osim toga, nužno je i redovito praćenje performansi kako bi se informirali dionici. Mrežni upravitelj bi trebao podržavati inicijativu "*file it, fly it*" s ciljem smanjivanja *Route Availability Document* ograničenja kada to uvjeti prometa dopuštaju. Poglavitno iz razloga omogućavanja zrakoplovima da duže zadrže optimalne visine leta, što u konačnici poboljšava vertikalnu učinkovitost leta. Nadalje, važno je da Mrežni upravitelj uklopi CCO/CDO postupke, kako je navedeno u ERNIP dokumentu, u procese dizajniranja zračnog prostora na lokalnoj i regionalnoj razini. Sljedeće točke obuhvaćaju ključne odgovornosti Mrežnog upravitelja u cilju unapređenja vertikalne učinkovitosti leta [84]:

- suradnja s europskom Radnom skupinom za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja kako bi se praktično integrirali postupci u operacije, zajedno s optimiziranim vertikalnim profilima,
- praćenje performansi operacija kontinuiranog penjanja i poniranja na razini mreže i redovito obavještanje dionika o performansama,
- u skladu s NM kampanjom "*file it, fly it*", nužno je zagovaranje taktičkog opuštanja RAD ograničenja kada to dopuštaju uvjeti prometa. Navedena fleksibilnost pomaže zrakoplovima da duže održavaju optimalne razine leta i smanjuje vertikalna ograničenja, poboljšavajući izvedbu. Potrebna je koordinacija s susjednim sektorima kako bi se spriječio negativan utjecaj na sekvencu unutar sektora i radno opterećenje,
- osigurati da su načela koja omogućuju optimizirane vertikalne profile, kao što je navedeno u ERNIP dokumentu, uključena u procese dizajna zračnog prostora i procedura na lokalnoj i regionalnoj razini.

7.2.2. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti pružatelja usluga u zračnoj plovidbi

Pružatelji usluga u zračnoj plovidbi su neizostavni dionici kako u sustavu europskog zračnog prometa tako i u pogledu poboljšanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova pružanjem određenih usluga u prizmi upravljanja i optimizacije korištenja zračnog prostora. Putem naprednih tehnologija i integracije podataka u stvarnom vremenu, pružatelji usluga u zračnoj plovidbi osiguravaju osnovne usluge kao što su upravljanje zračnim prometom, meteorologija, zrakoplovno informiranje, traganje i spašavanje te komunikacija, navigacija i nadzor. Navedene usluge imaju za cilj da se zrakoplovne operacije odvijaju u okvirima najsigurnijih i najučinkovitijih putanja leta, optimizirajući potrošnju goriva, smanjujući buku, minimizirajući kašnjenja i reducirajući negativan utjecaj zračnog prometa na okoliš. Kontinuiranim poboljšavanjem oblikovanja letačkih postupaka i uvođenjem Koncepta navigacije bazirane na performansama, pružatelji usluga značajno doprinose ukupnoj vertikalnoj učinkovitosti leta zrakoplova i održivosti zračnog prometa. Povrh toga, unapređenje usluge kontrole zračnog prometa putem inovativnih rješenja znatno može poboljšati operativnu učinkovitost i poslovanje. Sljedećim potpoglavljima se opisuju smjernice i aktivnosti u pogledu usluga dizajna zračnog prostora i oblikovanja letačkih postupaka i usluga kontrole zračnog prometa koje doprinose poboljšanju vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.

7.2.2.1. Dizajn zračnog prostora i oblikovanja letačkih postupaka

U pogledu dizajna zračnog prostora i oblikovanja letačkih postupaka, EUROCONTROL u [84] ističe nužnost prilagođenog pristupa na lokalnoj razini. Prvenstveno zbog toga što jedinstveno rješenje ne može zadovoljiti potrebe svih aerodroma. Optimizacija bi trebala uključivati blisku suradnju između pružatelja usluga u zračnoj plovidbi, zračnih prijevoznika i zračnih luka, uzimajući u obzir ograničenja i zahtjeve svih dionika. Načela koja omogućuju operacije kontinuiranog penjanja i poniranja trebaju biti potpuno integrirana u procese dizajna zračnog prostora na nacionalnoj i regionalnoj razini. Dizajn profila penjanja i poniranja bi trebao težiti lateralnoj neovisnosti i gdje su neizbježni segmenti „na istoj visini“, planirati ih na što većoj visini. Rute trebaju biti kratke, s minimalnim ograničenjima, te trebaju koristiti postojeće metodologije za procjenu utjecaja na okoliš. Sporazumi o suradnji trebaju biti redovito pregledani i po potrebi ažurirani s ciljem optimiziranja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. U načelu, operativne procedure trebaju smanjiti „egzaktna“ ograničenja visine, umjesto toga koristeći ograničenja "na ili iznad" ili koristeći tzv. „visinske prozore“. Potrebno je izbjegavati obvezne segmente „na istoj visini“ osim ako je neizbježno, te ih dizajnirati na

način da omogućuju učinkovito upravljanje kinetičkom energijom. Nadalje, važno je uzeti u obzir utjecaj postupaka kontrole zračnog prometa, kao što je vektoriranje zrakoplova i smanjiti broj ograničenja brzine samo na ona koja su nužna i prilagođena prometnoj strukturi tokova i gustoći istih. U konačnici, EUROCONTROL navodi da trenutna istraživanja sugeriraju da je davanje prioriteta operacijama kontinuiranog poniranja u odnosu na operacije kontinuiranog penjanja manje štetno u smislu potrošnje goriva. Preciznije, odgovornosti stručnjaka za dizajn zračnog prostora i oblikovanje letačkih postupaka u svrsi unapređenja vertikalne učinkovitosti su [84]:

- za svaki aerodrom treba optimizirati specifični postupak prilaza na lokalnoj razini, jer jedno rješenje ne može zadovoljiti jedinstvene potrebe za dizajnom zračnog prostora i postupaka svih aerodroma,
- razvijati svaki postupak poniranja i penjanja u bliskoj suradnji između pružatelja usluga zračne plovidbe, zračnih prijevoznika i gdje je potrebno, zračnih luka, osiguravajući da dizajn uzima u obzir ograničenja i zahtjeve svakog dionika,
- osigurati da su principi za omogućavanje CCO/CDO u potpunosti integrirani u procese dizajna zračnog prostora i postupaka, kako na lokalnoj tako i na regionalnoj razini,
- prilikom razvoja koncepta operacija kontrole zračnog prometa (*Concept of Operations* - CONOPS), nužno je implementirati optimizaciju vertikalnog profila leta,
- profile za penjanje i poniranje treba dizajnirati tako da budu što je više moguće lateralno neovisni. Ako su segmenti „na istoj visini“ obavezni, trebali bi biti na što većoj visini. Optimizacija vertikalnih i lateralnih profila treba uzeti u obzir lokalne uvjete,
- istovremeni dizajn dolaznih i odlaznih ruta unutar zračnog prostora,
- fleksibilan dizajn dolaznih ruta - osobito kako bi se optimizirali profili tijekom razdoblja izvan vršnih prometnih opterećenja, omogućujući optimizirane profile poniranja u određenim vremenima, danima, sezonama ili uvjetima,
- optimalna *Idle Descent* putanja – profili leta u poniranju se trebaju što bliže uskladiti s optimalnom *Idle descent* putanjom, odnosno poniranjem s minimalnim potiskom, uzimajući u obzir čimbenike poput mase zrakoplova, prevladavajućih vjetrova, temperatura i kutova poniranja,
- potrebno je dizajnirati dolazne profile tako da budu što kraći s minimalnim ograničenjima i restrikcijama, izbjegavajući blisko locirana ograničenja koja bi mogla biti zahtjevna za obradu unutar FMS-a zrakoplova,

- primijeniti postojeće metode procjene utjecaja na okoliš kao dio procesa dizajna zračnog prostora i postupaka,
- prilagodba zračnog prostora za operacije kontinuiranog poniranja - razmotriti restrukturiranje zračnog prostora kako bi se bolje prilagodio postupcima operacija kontinuiranog poniranja, potencijalno ga konsolidirajući pod jednom sektorskom grupom zračnog prostora osobito oko dolaznih ruta u velike zračne luke,
- razvoj LoA tako da budu prilagodljivi smjeru uzletno-sletne staze, razdobljima velike i male prometne potražnje i sezonskom prometu, redovito ih pregledati kako bi se optimizirali profili leta,
- smanjiti upotrebu „egzaktnih“ uputa za razine leta: Zamijeniti upute za razine u operativnim postupcima s „na ili iznad“ ili upotrijebiti koncept „visinskih prozora“ gdje god je moguće,
- minimizirati obvezne segmente „na istoj razini“. U slučaju da su neizbježni, postaviti ih na mjestima i visinama gdje letačke posade mogu mijenjati konfiguraciju ili upravljati kinetičkom energijom.
- uzimati u obzir postupke kontrole zračnog prometa, kao što je kontrola brzine i vektoriranje,
- smanjiti broj ograničenja brzine u fazama penjanja i poniranja,
- u dizajnu SID-ova (*Standard Instrument Departure Routes*) i STAR-ova (*Standard Arrival Routes*), potrebno je razmotriti, ovisno o situaciji, davanje prednosti operacijama kontinuiranog poniranja/zrakoplovu u poniranju u odnosu na operacije kontinuiranog penjanja/zrakoplovu u penjanju. Poglavitito iz razloga što navedeno, a naročito u slučaju istog tipa zrakoplova, može doprinijeti uštedi goriva.

U pravilu, broj ograničenja treba svesti na minimum. Na temelju iskustva članova radne skupine za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja, predložen je osnovni skup „razumnih“ preporuka za dizajn zračnog prostora [85]:

- rute bi trebale biti dizajnirane s minimalnim brojem ograničenja kako bi se maksimalizirala mogućnost optimizacije profila penjanja i poniranja leta, kao i smanjila vjerojatnost nesukladnosti,
- ograničenja koja su osmišljena u razmaku od manje od 10 nautičkih milja treba izbjegavati jer FMS može imati poteškoća s njihovom obradom,

- kada su potrebna ograničenja brzine duž STAR-a, poželjno je utvrditi ulaznu brzinu u STAR umjesto uvođenja više ograničenja duž STAR-a. Međutim, važno je napomenuti da takve upute ponekad mogu biti zanemarene od strane letačkog osoblja.
- ograničenja brzine treba izbjegavati unutar visina FL110-FL090, jer većina FMS-ova ima unaprijed programirano ograničenje brzine poniranja od 250 čvorova ispod FL100, što bi poništilo ograničenja,
- ako su potrebna ograničenja visine na ruti, treba se pridržavati sljedećeg redoslijeda prioriteta:
 - ograničenja *iznad ili na*,
 - ograničenja *ispod ili na*,
 - ograničenja *između*,
 - ograničenja *na*.
- prilikom dizajniranja dolaznih ruta, treba uzeti u obzir zahtjeve i prakse korisnika zračnog prostora usmjerene na smanjenje stope spuštanja na 1.500 stopa u minuti unutar posljednjih 2.000 stopa, te na 1.000 stopa u minuti unutar posljednjih 1.000 stopa.

7.2.2.2. Usluga kontrole zračnog prometa pružatelja usluga u zračnoj plovidbi

U načelu, vertikalne neučinkovitosti leta predstavljaju značajan izazov za pružatelje usluga u zračnoj plovidbi u održavanju urednog toka prometa i smanjenju utjecaja na okoliš. Nalazi provedene studije slučaja ukazuju, kao što je ranije navedeno, na statistički značajnu neusklađenost između rezultata konsolidiranih na razini faze penjanja i poniranja, s emisijama u fazi penjanja od ukupno 35,81115 kg emisija H₂O, 0,02432 kg emisija SO₂ i 91,19250 kg emisija CO₂ po letu. Faza poniranja, međutim, ukazuje na znatno veće neučinkovitosti, rezultirajući emisijama od 933,78038 kg emisija H₂O, 0,63410 kg emisija SO₂ i 2377,85625 kg emisija CO₂ po letu. Kako bi se riješile ove neučinkovitosti, pružatelji usluga u zračnoj plovidbi moraju provesti mjere koje imaju za cilj optimizirati vertikalni profil leta, posebno tijekom faze poniranja. Dodatno, poboljšanje sustava kontrole zračnog prometa i upravljanje optimalnim razinama leta može povećati vertikalnu učinkovitost leta. Poboljšanje tehničko-tehnoloških elemenata pružatelja usluga u zračnoj plovidbi i analitike podataka također može pomoći u preciznom predviđanju i upravljanju putanjama leta, što dovodi do smanjenja nepotrebnog sagorijevanja goriva i reduciranje štetnih emisija. Povrh toga, pružatelji usluga u zračnoj plovidbi, kao dionici sustava zračnog prometa, imaju ključnu ulogu u procesu unapređenja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova jer su odgovorni za projektiranje,

implementaciju i upravljanje postupcima u zračnom prostoru. Suradnjom s raznim dionicima sustava zračnog prometa, pružatelji usluga u zračnoj plovidbi mogu osigurati da dizajn zračnog prostora i operativni postupci budu u skladu s najboljim praksama za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja. Sljedeće točke ističu ključne strategije i aktivnosti koje pružatelji usluga u zračnoj plovidbi mogu provesti kako bi doprinijeli učinkovitom i djelotvornom unapređenju vertikalne učinkovitosti leta [84]:

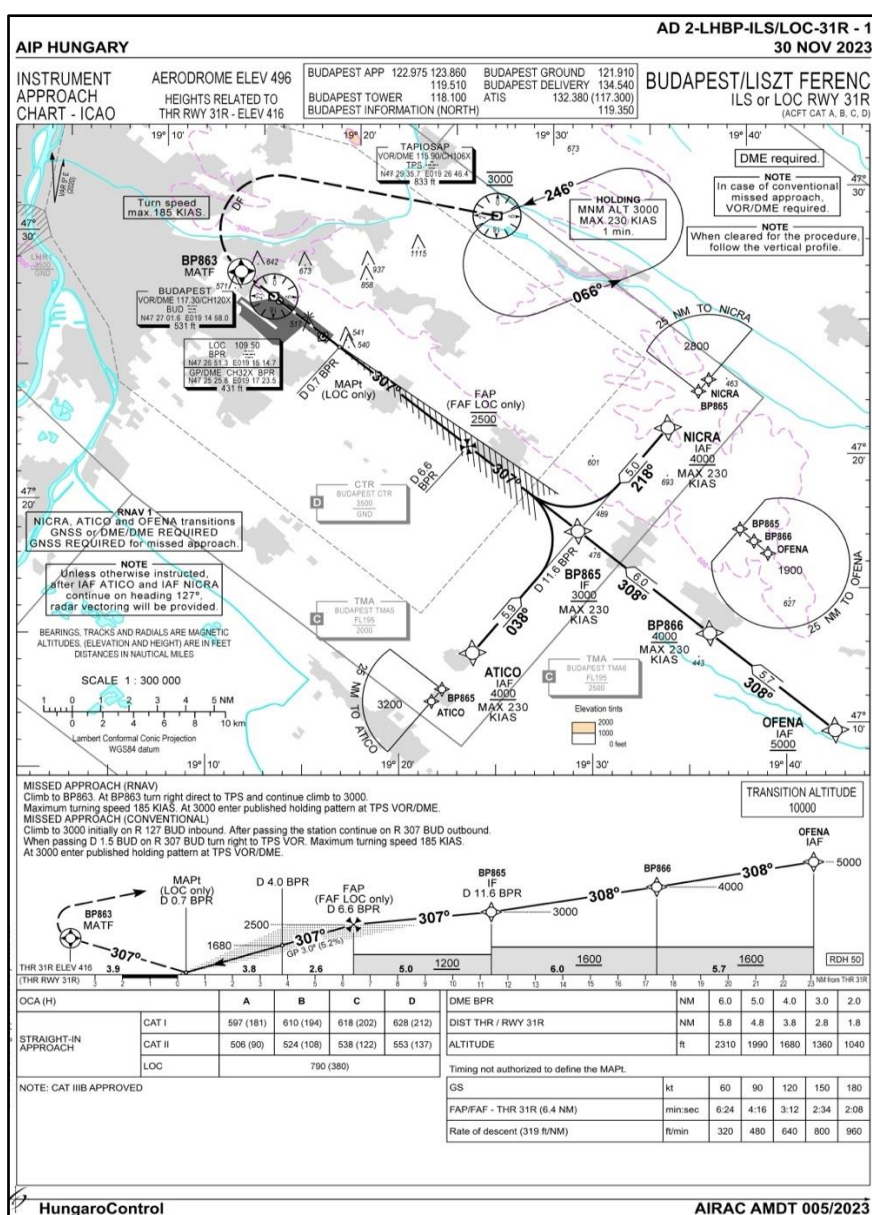
- integracija operacija kontinuiranog penjanja i poniranja u dizajn zračnog prostora i postupaka na lokalnoj i regionalnoj razini, prema smjernicama ERNIP-a,
- suradnja s operatorima aerodroma i regulatornim tijelima kako bi se osiguralo da dizajn zračnog prostora i rute podržavaju operacije kontinuiranog penjanja i poniranja,
- provođenje praćenja performansi operacije kontinuiranog penjanja i poniranja od strane pružatelja usluga u zračnoj plovidbi i pružanje povratnih informacija zračnim prijevoznicima,
- uključivanje optimizacije operacija kontinuiranog penjanja i poniranja, te utjecaja navedenih operacija u obuku kontrolora zračnog prometa uz suradnju regulatornih tijela,
- olakšavanje rasprave među korisnicima zračnog prostora, pružateljima usluga u zračnoj plovidbi i zračnim prijevoznicima o implementaciji i optimizaciji operacija kontinuiranog penjanja i poniranja,
- razvoj harmoniziranog sadržaja zbornika zrakoplovnih informacija o operacijama kontinuiranog penjanja i poniranja,
- prilagodba Koncepta operacija kontrole zračnog prometa za optimizaciju vertikalnih profila i pružanje informacije o udaljenosti do cilja (*Distance to go – DTG*) za potrebe predvidljivosti,
- kontrolori zračnog prometa bi trebali pružati točnu informaciju letačkom osoblju o udaljenosti do cilja kako bi pomogli u optimizaciji profila poniranja,
- promoviranje upotrebe standardnih postupaka za prilaze,
- suradnja između civilne i vojne komponente radi optimizacije vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova,
- redoviti pregledi i ažuriranje LoA, kako bi se smanjila nepotrebna vertikalna ograničenja,
- dizajn LoA-e treba biti takav da bude prilagodljiv smjeru uzletno-sletne staze i prometnoj situaciji,

- taktičko opuštanje ograničenja unutar *Route Availability Document (RAD)*, kako bi se omogućile optimalnije putanje poniranja i penjanja,
- promoviranje dosljedne upotrebe frazeologije Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo za odobrenja penjanja i poniranja,
- razmatranje prioriteta operacija kontinuiranog poniranja u odnosu na operacije kontinuiranog penjanja u dolaznim i odlaznim postupcima za slične tipove zrakoplova,
- restrukturiranje zračnog prostora, prema potrebi, kako bi se implementirali postupci operacija kontinuiranog poniranja, posebno oko čvorišnih zračnih luka.

Razmatrajući operativne implikacije, EUROCONTROL-ova Radna skupina za operacije kontinuiranog penjanja i poniranja, u Aneksu H [86], navodi da bi objavljene procedure poniranja trebale biti što bliže stvarnim putanjama leta zrakoplova, kako bi se ostvarile sve prednosti operacija kontinuiranog poniranja. Dosljedno pridržavanje procedura od strane kontrolora zračnog prometa i letačkog osoblja zrakoplova je od iznimne važnosti, a učestale devijacije treba svesti na minimum. Velike zračne luke se često suočavaju s izazovima nepridržavanja ovih procedura tijekom vršnih prometnih opterećenja. Pri tome, nepridržavanje procedura zahtijeva korištenje taktičkih postupaka poput vektoriranja i kontrole brzine od strane kontrolora zračnog prometa. Međutim, spomenuti postupci mogu narušiti predvidljivost na koju se letačko osoblje oslanja kako bi održala optimalan profil poniranja. Nadalje, kako bi se umanjio utjecaj taktičkih postupaka, ključno je rano sekvencioniranje zrakoplova. Ranim organiziranjem toka prometa, kontrolori zračnog prometa mogu povećati učestalost i trajanje operacija kontinuiranog poniranja, čak i tijekom vršnih prometnih opterećenja. Rano sekvencioniranje smanjuje potrebu za taktičkim prilagodbama u stvarnom vremenu, čime se zadržava željena predvidljivost i vertikalna učinkovitost leta.

U pogledu operativnog razvoja usluge kontrole zračnog prometa, Radna skupina u dokumentu [86], smatra da je uvođenje naprednih alata za razdvajanje, sekvencioniranje i reguliranje prometa jedan od ključnih faktora u učinkovitoj implementaciji operacija kontinuiranog poniranja. Navedeni alati, uključujući sustave za upravljanje dolascima, trebali bi se dosljedno i učinkovito koristiti za poboljšanje performansi vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Kao što je prethodno navedeno, svaka promjena u lateralnom, vertikalnom ili brzinskom profilu leta zrakoplova nakon početka poniranja može dovesti do odstupanja od optimalnog profila poniranja, što rezultira neučinkovitostima. Skraćivanja, smanjenja brzine ili ograničenja mogu dovesti zrakoplov u stanje „visoke energije“, dok povećanje udaljenosti,

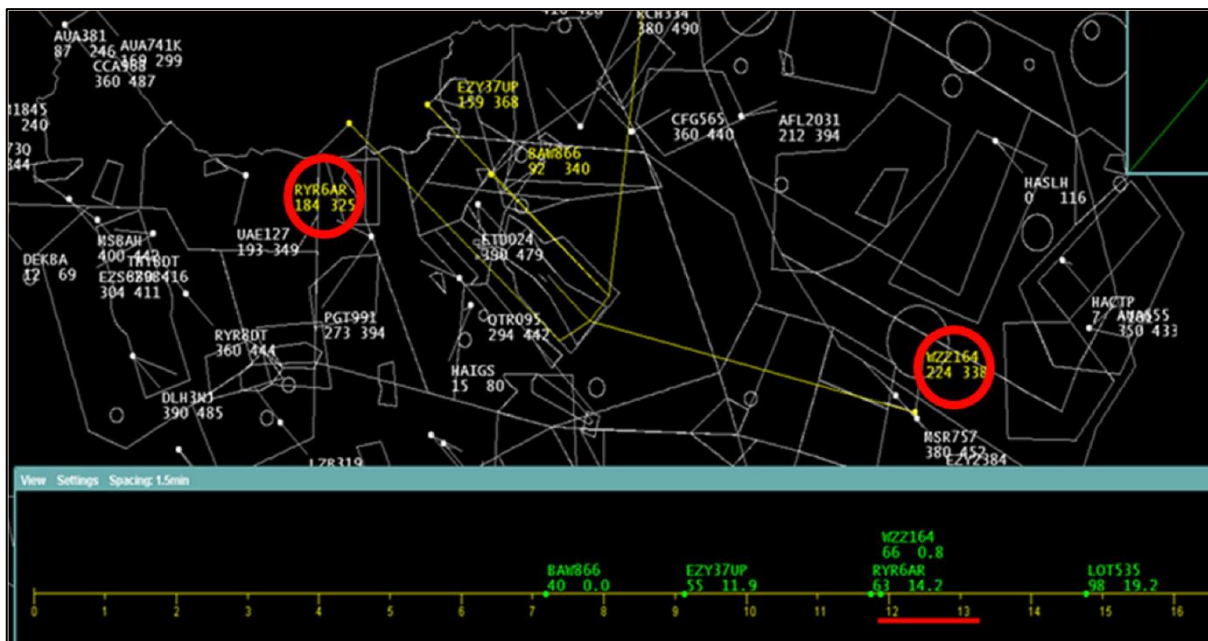
strmiji profili poniranja ili nepovoljni vremenski uvjeti mogu zahtijevati dodatni potisak na neoptimalnim visinama, čime se dodatno smanjuje učinkovitost. Stoga, podrška i razvoj sustava kontrole zračnog prometa mora uključivati funkcionalnosti unutar sustava za koordinaciju i prijenos, kako bi se kontrolorima omogućilo pružanje potrebnih informacija za optimizaciju profila poniranja znatno prije nego što zrakoplov dosegne točku vrha poniranja. Na primjer, kako bi riješili operativni problem sekvencioniranja zrakoplova, mađarski pružatelj usluga u zračnoj plovidbi *HungaroControl*, implementirao je tzv. *T-Bar* operacije. Na slici 14 prikazan je primjer *T-Bar* procedure implementirane za potrebe uzletno-sletne staze 31R na Zračnoj luci Liszt Ferenc (ICAO oznaka: LHBP) u Budimpešti, glavnom gradu Mađarske.



Slika 14. Primjer tzv. *T-Bar* procedure na Zračnoj luci Liszt Ferenc u Budimpešti

Izvor: [87]

Međutim, uvođenje *T-bar* operacija zahtijeva „sophisticiranu“ kontrolu brzine što je, operativno gledajući, zahtjevno za kontrolora zračnog prometa. U tom pogledu, HungaroControl je razvio koncept i alat nazvan *MergeStrip*. Navedeni alat ima za cilj olakšati kontrolu brzine i sekvencioniranje zrakoplova. U načelu, alat služi za dinamičko razmještanje zrakoplova, odnosno preciznije, alat kontinuirano računa najkraći mogući put do početne točke prilaza *T-bar* procedure (početne točke *ATICO*, *OFENA* i *NICRO* na slici 14) iz bilo kojeg smjera. U konačnici, alat pomaže kontrolorima zračnog prometa u pravovremenom primjenjivanju kontrole brzine i izdavanju skraćenih putanja. Navedeni alat (prikazan na slici 15), uvodi inovativan prikaz trenutne situacije u prometu u horizontalnoj i vertikalnoj dimenziji.



Slika 15. Prikaz alata *MergeStrip*

Izvor: [86]

7.2.3. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti korisnika zračnog prostora

U prizmi korisnika zračnog prostora i operatora zrakoplova, vertikalna neučinkovitost leta tijekom faze penjanja i poniranja povećava potrošnju goriva i posljedično tome, operativne troškove. Provedena studija slučaja od 10 letova kvantificira i naglašava ovaj problem. Studija slučaja je prikazala da neučinkovitosti tijekom faze penjanja rezultiraju potrošnjom od 28,9500 kg goriva uz trošak od 12,44850 €. Shodno tome, neučinkovitosti u fazi poniranja generiraju potrošnju goriva u iznosu od 754,87500 kg, što prouzrokuje troškove od 324,59625 €.

Navedene vrijednosti ilustriraju značajan ekonomski utjecaj takvih neučinkovitosti, s povećanom potrošnjom goriva koja povećava operativne troškove i smanjuje profitne marže. Kako bi se smanjio navedeni učinak, zračni prijevoznici bi trebali razviti i provoditi sveobuhvatne politike operacija kontinuiranog penjanja i poniranja, uključujući ih u planiranje i operativne prakse. Spomenute politike trebale bi osigurati dosljedno pridržavanje standardnih operativnih postupaka (*Standard Operating Procedures - SOP*), uz pružanje obuke za letačko osoblje o prednostima i najboljim praksama navedenih postupaka. Neprekidno praćenje performansi i povratne informacije ključni su za identificiranje područja za poboljšanje, dok je suradnja s pružateljima usluga u zračnoj plovidbi i drugim dionicima neophodna za optimizaciju vertikalnih profila i poboljšanje komunikacije u vezi s procedurama letenja. Sljedeće preporuke navode strategije za učinkovitu implementaciju i održavanje CCO/CDO praksi kako bi se postigla optimalna operativna učinkovitost i uštede u sklopu zračnih prijevoznika [84]:

- uspostavljanje sveobuhvatne politike operacija kontinuiranog penjanja i poniranja koja pokriva planiranje i operacije letova, te osiguranje stvaranja standardnih operativnih postupaka unutar zračnog prijevoznika. Dijeljenje najboljih praksi s letačkim osobljem kako bi se povećala svijest i dosljednost,
- uključivanje nastavnog programa o svijesti letačkog osoblja o operacijama kontinuiranog penjanja i poniranja kao ključnu kompetenciju u početnu linijsku obuku letačkog osoblja i ponovnu osvježavajuću obuku. Navedeno bi trebalo naglasiti prednosti CCO/CDO u okvirima smanjenja buke, uštede goriva i smanjenja emisija,
- praćenje performansi operacija kontinuiranog penjanja i poniranja zračnih prijevoznika, pružanje povratnih informacija letačkom osoblju i provođenje usporedbe kako bi se uspostavila osnovna razina za poboljšanje performansi,
- iniciranje i sudjelovanje u redovnim dijalozima s dionicima industrije o postupcima optimizacije vertikalne učinkovitosti leta. Dijalog se treba odvijati na individualnoj razini letačkog osoblja/kontrolora zračnog prometa i na institucionalnoj razini, posebno u matičnim bazama zračnih prijevoznika,
- poticanje letačkog osoblja da zatraži informacije o udaljenosti do cilja od kontrole zračnog prometa, osobito na nižim visinama tijekom poniranja, poglavito kako bi se učinkovito upravljalo energijom zrakoplova i izračunao optimalni profil poniranja,
- razumijevanje za zahtjeve kontrole zračnog prometa za protok i sekvenciranje, uključujući upotrebu postupaka kao što je vektoriranje i kontrola brzine, te

prepoznavanje kako ti postupci utječu na performanse vertikalnih profila i upravljanje energijom zrakoplova,

- zalaganje za dosljednu upotrebu frazeologije Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo prema Amandmanu 7A13 vezanoj za odobrenja penjanja i poniranja.

Operatori zrakoplova i letačko osoblje se potiču slijediti najbolju praksu kako bi osigurali da se operacije kontinuiranog poniranja provode kad god je to operativno moguće i sigurno. U nastavku su ključne operativne smjernice i preporuke za optimizaciju operativne izvedbe operacija kontinuiranog poniranja [85]:

- provoditi operacije kontinuiranog poniranja kad god je praktično i operativno sigurno,
- mjere za uštedu goriva - preporuča se započeti poniranje s visine krstarenja na optimalnoj ili točki vrha poniranja prema FMS-u, kad god je to praktično i operativno sigurno,
- operator zrakoplova treba koristiti minimalne postavke potiska što je više moguće tijekom poniranja radi optimizacije učinkovitosti goriva,
- smjernice operatora zrakoplova o profilu poniranja - operativni priručnik operatora zrakoplova treba uključivati smjernice o profilu poniranja, pružajući pilotima informacije o optimizaciji vertikalnog profila od točke vrha poniranja do završnog prilaza, čak i u slučajevima kada prometna situacija možda ne dopušta savršen CDO,
- sigurnosne informacije za specifične aerodrome – zračni prijevoznici često pripremaju dodatne sigurnosne informacije za specifične zračne luke kako bi nadopunile podatke iz Zbornika zrakoplovnih informacija. Preporučuje se uključiti odjeljak o ekološkim pitanjima. Postupci operacije kontinuiranog poniranja, prilagođeni različitim tipovima zrakoplova i specifičnim aerodromima, trebaju biti dio ovih informacija kako bi se optimizirala učinkovitost leta.
- smjernice za uštedu goriva i troškova – zračni prijevoznici i operatori zrakoplova trebaju izraditi i distribuirati detaljne informacije koje opisuju preporučene smjernice za uštedu goriva i troškova za posadu. Priručnik treba redovito ažurirati i uključiti smjernice o planiranju poniranja, posebno za scenarije koji uključuju ranija ili kasnija odobrenja za poniranje.
- redoviti izvještaji o učinkovitosti - mjesečne ili druge pravovremene izvještaje s informacijama o CDO učinkovitosti treba podijeliti s osobljem zračnog prijevoznika i letačkom osoblju.

- poticanje povratnih informacija posade o vertikalnoj učinkovitosti leta ključno je za identificiranje potencijalnih problema.

7.2.4. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti operatora aerodroma

Operatori aerodroma imaju manju, ali neizostavnu ulogu u implementaciji operacija kontinuiranog penjanja i poniranja. Odgovornosti operatora aerodroma uključuju suradnju s pružateljima usluga u zračnoj plovidbi i regulatornim tijelima kako bi se dizajnirali zračni prostor i rute koje omogućuju ove postupke. Promicanjem politika, praćenjem performansi i poticanjem dijaloga među dionicima, operatori aerodroma pomažu u optimizaciji upravljanja zračnim prometom i osiguravaju učinkovitu provedbu tih praksi. Sljedeće točke opisuju ključne odgovornosti operatora aerodroma u unapređenju vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova [84]:

- suradnja s pružateljima usluga u zračnoj plovidbi i regulatornim tijelima u cilju osiguranja da budući dizajn zračnog prostora i ruta dolaska/odlaska budu optimizirane za učinkovite operacije kontinuiranog penjanja i poniranja,
- poticanje implementacije operacija kontinuiranog penjanja i poniranja u zračnim lukama,
- promicanje provedbe i usvajanje CCO/CDO postupaka od strane operatora aerodroma,
- provođenje praćenja performansi operacija kontinuiranog penjanja i poniranja u zračnim lukama i pružanje povratne informacije zračnim prijevoznicima kako bi se uspostavila osnova za poboljšanje performansi,
- podržavanje politika koje potiču primjenu operacija kontinuiranog penjanja i poniranja na nižim visinama radi smanjenja buke i od ToC do ToD za maksimalnu uštedu goriva,
- suradnja s ostalim dionicima u pogledu razvijanja i ažuriranja sadržaja zbornika zrakoplovnih informacija o CCO/CDO postupcima temeljenim na usklađenom europskom okviru,
- iniciranje i aktivno sudjelovanje u sustavnoj komunikaciji između korisnika zračnog prostora, pružatelja usluga u zračnoj plovidbi i zračnih prijevoznika o optimizaciji vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova, kako na razini letačkog osoblja/kontrolora zračnog prometa, tako i na institucionalnoj razini, posebno u matičnim bazama zračnih prijevoznika.

U pogledu suradnje, Suradničko upravljanje okolišem (*Collaborative environmental management* - CEM), ima za cilj utvrditi utjecaj operativnih ograničenja na okoliš i omogućiti

koordinirani odgovor koji minimizira te utjecaje [88]. Suradničko upravljanje okolišem čini skup dionika aerodroma, odnosno, operator aerodroma, pružatelj usluga u zračnoj plovidbi i glavni operatori zrakoplova. U sklopu dokumenta [89] navedeno je da ako zračna luka već ima sklopljen radni dogovor Suradničkog upravljanja okolišem, neophodne su konzultacije dionika s operatorom aerodroma radi promjene letačkih procedura dolaska i odlaska. Prvenstveno radi utjecaja buke na lokalno stanovništvo. Ovakva vrsta suradnje je ključna za uspješnost vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova.

7.2.5. Pregled smjernica i aktivnosti u nadležnosti državnih zrakoplovnih vlasti

Državne zrakoplovne vlasti su, uglavnom, vladine agencije odgovorne za nadzor i regulaciju sigurnosti, sigurnosne zaštite i učinkovitosti zračnog prometa. Navedene institucije uspostavljaju i provode sveobuhvatni okvir propisa, politika i standarda koji upravljaju različitim aspektima civilnog zračnog prometa, uključujući upravljanje zračnim prostorom, rad zrakoplova, certificiranje zrakoplovnog osoblja i opreme, te utjecaj na okoliš. U suradnji s operatorima aerodroma i pružateljima usluga u zračnoj plovidbi, državne zrakoplovne vlasti predstavljaju ključnu ulogu u poboljšanju vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova, uključujući optimizaciju operacija kontinuiranog penjanja i poniranja. Njihova funkcija uključuje osiguravanje ažuriranja i usklađivanja informacija, promicanje standardiziranih postupaka te potporu međunarodnom usklađivanju u zrakoplovnoj praksi [84]:

- suradnja s operatorima aerodroma i pružateljima usluga u zračnoj plovidbi kako bi se osigurali da svi budući dizajni zračnog prostora i dolazni/odlazni postupci podržavaju učinkovite CCO/CDO postupke,
- razvijanje i promoviranje politika za podršku implementaciji i izvršenju operacija kontinuiranog penjanja i poniranja na lokalnoj i regionalnoj razini,
- suradnja s ostalim dionicima u pogledu razvijanja i ažuriranja sadržaja zbornika zrakoplovnih informacija o CCO/CDO postupcima temeljenim na usklađenom europskom okviru,
- osiguranje da početna obuka, lokalna kompetencija i obuka za osvježavanje kontrolora zračnog prometa uključuje simulacijske vježbe o optimizaciji vertikalne učinkovitosti leta, upravljanju energijom zrakoplova i razumijevanju učinaka postupaka poput vektoriranja i kontrole brzine na performanse vertikalne učinkovitosti leta,
- poticanje upotrebe standardne ICAO frazeologije iz amandmana 7A koja se odnosi na odobrenja za penjanja i poniranja,

- pružanje podrške državama u usvajanju frazeologije amandmana 7A za odlazne i dolazne postupke, uključujući pružanje pristupa obrazovnim materijalima dostupnim na javnoj internetskoj stranici Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo.

Osim toga, Radna skupina u dokumentu [90], preporučuje da za početnu obuku letačkog osoblja, državne zrakoplovne vlasti i regulatorna tijela uključe propisanu obuku za operacije kontinuiranog penjanja i operacije kontinuiranog poniranja u nastavni plan i program za sve dozvole letačkog osoblja i obuku za pojedine tipove zrakoplove. Navedeno se može postići izmjenom dokumenta *Part-FCL* kako bi se uključili ovi zahtjevi za obuku. Alternativno, odobrene organizacije za osposobljavanje mogu integrirati ove obuke u svoje obrazovne programe, osiguravajući da budu dio kurikuluma kao preporučene prakse. Oba pristupa imaju za cilj osigurati da letačke osobe prime sveobuhvatnu obuku u pogledu operacija kontinuiranog penjanja i poniranja, čime se poboljšava operativna učinkovitost i sigurnost.

8. ZAKLJUČAK

Vertikalna neučinkovitost leta prouzrokuje dodatne operativne troškove i doprinosi povećanju razine štetnog utjecaja zračnog prometa na okoliš. Zbog toga, navedeno iziskuje potrebu za razvojem naprednih alata i tehnologija koji bi omogućili daljnju optimizaciju resursa zračnog prostora, smanjenje potrošnje goriva i ublažavanje razine štetnih emisija na okoliš. Uzimajući u obzir da neučinkovitost leta u sklopu sustava upravljanja zračnim prometom ima cijenu, a utjecaj na okoliš ima još „veću cijenu“, nužno je dodatno upotpuniti postojeće modele i algoritme tako da su podjednako orijentirani ka smanjenju monetarnih učinaka i utjecaja na okoliš. U skladu s navedenim, poboljšanja trebaju obuhvaćati dvostruke ciljeve, prvenstveno izražene u svrhu smanjenja monetarnih učinaka i ublažavanja neželjenih utjecaja na okoliš. Integriranjem naprednijih analitika podataka, tehnika strojnog učenja, sustava za praćenje u stvarnom vremenu i alata koji olakšavaju upravljanje znanjem, moguće je dalje optimizirati rute leta zrakoplova i na taj način smanjiti potrošnja goriva i razinu generiranih emisija. Također, suradnja svih dionika, uključujući zračne prijevoznike, regulatorna tijela i ekološke agencije, ključan je preduvjet koji vodi ka poboljšanju u domeni sustava upravljanja zračnim prometom, a što posljedično vodi prema održivim i troškovno učinkovitim operacijama. Implementacija takvih i inih strategija ne samo da može poboljšati učinkovitost sustava upravljanja zračnim prometom, već također može značajno doprinijeti globalnim težnjama u borbi protiv klimatskih promjena i promoviranju ekološke održivosti.

Kao i u drugim domenama, tako i u sklopu sustava upravljanja zračnim prometom, uspješno i učinkovito poboljšanje performansi ponajviše ovisi o uspješnosti utvrđivanja područja poboljšanja, kao i njihovom učinkovitim rješavanju. U tom smislu, kvantitativni modeli namijenjeni za obradu velikih skupova podataka neophodni su, prvenstveno, za identifikaciju neučinkovitosti, donošenje informiranih odluka i provedbu proaktivnih i korektivnih operativnih mjera i aktivnosti. Na tom tragu, ovaj istraživački rad pruža detaljan uvid u razvoj i primjenu generičkog modela razvijenog u svrhu kvantificiranja utjecaja neučinkovitosti leta tijekom faza penjanja i poniranja. Osmišljeni model uvodi značajna unaprjeđenja u područje istraživanja ne samo procjenjujući vertikalnu neučinkovitost leta, već i korelirajući neučinkovitosti s ekonomskim i okolišnim reperkusijama. Značaj korelacije se posebno ističe u pogledu apsolutnih vrijednosti troškovne (ne)učinkovitosti i održivosti sustava upravljanja zračnim prometom u odnosu na klimatske promjene i s tim u vezi razvojne politike.

Istraživački doprinosi generičkog modela su višestruki. Prvenstveno, konceptualni i metodološki okvir značajno obogaćuju postojeću literaturu pružajući dublji uvid u složeni odnos između operativnih postupaka i praćenja performansi. Orijentirajući se prema potrošnji goriva, te okolišnim i financijskim učincima neučinkovitosti leta tijekom faza penjanja i poniranja, model nudi sveobuhvatan uvid u utjecaj neučinkovitosti na ukupne performanse. Uvid je posebno značajan za dionike industrije zračnog prometa koji nastoje optimizirati operacije leta i smanjiti njihov utjecaj na okoliš, istovremeno osiguravajući troškovne uštede. Drugo, rezultati istraživačkih i razvojnih napora, uključujući razvoj modela, primjenu, validaciju i prezentaciju rezultata, nedvosmisleno produbljuju razumijevanje područja istraživanja vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova i praćenja performansi sustava upravljanja zračnim prometom. Osim poboljšanog razumijevanja područja istraživanja, stečen je uvid u apsolutne vrijednosti potrošnje goriva i financijskih učinaka uzrokovanih neučinkovitošću leta, kao i utjecaja na okoliš. Nakon valorizacije performansi, model pruža jasan put prema utvrđivanju specifičnih područja za poboljšanje i provedbu ciljnih mjera za unaprjeđenje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova tijekom faza penjanja i poniranja.

U sklopu istraživačkog rada, na temelju razvijenog konceptualnog i metodološkog okvira, provedeno je istraživanje vertikalne (ne)učinkovitosti skupa 4D podataka o profilima letova. Rezultati istraživanja su uključivali potrošnju goriva, trošak goriva, te količinu emisija CO₂, H₂O i SO₂. Primjenom generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti zrakoplova i provedbom sveukupno 225.640 matematičkih operacija omogućen je prikaz rezultata istraživanja i donošenje odgovarajućih zaključaka o vertikalnoj (ne)učinkovitosti leta.

Praktična primjena razvijenog modela u sklopu studije slučaja, koja je koristila stvarne podatke i istraživačke odrednice, rezultirala je značajnom usklađenosti između rezultata dobivenih modelom i stvarnih profila letova provedenih od strane zračnog prijevoznika u stvarnim operativnim uvjetima. Pri tome, navedena konvergencija potvrđuje pouzdanost i točnost izlaznih podataka modela, dokazujući sposobnost i podjednaku primjenjivost razvijenog modela, kako u okviru budućih studija slučaja zasnovanih na stvarnim operativnim uvjetima, tako i u okviru budućih studija slučaja zasnovanih na simuliranim scenarijima i znanstveno-istraživačkim pretpostavkama proizašlim iz stvarnih operativnih uvjeta.

Slijedom provedenog istraživanja, može se zaključiti kako je identificirana vertikalna neučinkovitost u 10% letova u sklopu faze penjanja, dok u fazi poniranja, neučinkovitost je identificirana u 100% letova. Zaključuje se da je u uzorkovanim letovima studije slučaja, veća vertikalna neučinkovitost detektirana unutar završne kontrole oblasti odredišne zračne luke.

Promatrano sa ekonomskog gledišta, detektirane vertikalne neučinkovitosti leta su kumulativno prouzrokovale troškove goriva u ukupnoj vrijednosti od 337,04 € za promatranog zračnog prijevoznika. Skaliranjem uzorka na populaciju uz metodološku pretpostavku repetitivnosti distribucije rezultata i na većem uzorku, kao i operativnu pretpostavku da promatrani zračni prijevoznik prometuje četiri puta tjedno tijekom cijele godine na promatranoj ruti, tada se iznos neučinkovitosti od 337,04 € multiplicira na godišnji iznos od 7.010,43 €. Primjerice, tako godišnja vrijednost neučinkovitosti odgovara ukupnoj prosječnoj potrošnji goriva za 11 letova zrakoplova istog tipa na relaciji između dvije promatrane zračne luke. Nadalje, sa stajališta očuvanja okoliša, utvrđena vertikalna neučinkovitost u deset promatranih letova ukupno je generirala 969,59152 kg emisija H₂O, što dodatno potiče učinak staklenika. Osim toga, letovi su proizveli 0,65841 kg emisija SO₂, što potiče kisele kiše i dodatno zagađenje zraka. U konačnici, neučinkovitost je generirala 2469,04875 kg emisija CO₂, što pridonosi topljenju ledenjaka i podizanju razine mora.

Nalazi prikazani u okviru provedenog istraživanja potvrđuju prihvaćanje polazne hipoteze H₀ koja polazi od pretpostavke da integracija postojećeg metodološkog okvira za praćenje i izvještavanje vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova s odrednicama analize troškova i koristi, poboljšava jasnoću i razumijevanje učinaka vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova. Integrirani pristup rezultira dobivanjem apsolutnih vrijednosti što, u konačnici, pruža sveobuhvatnije razumijevanje vertikalne učinkovitosti leta. Osim toga, nadopunjuje postojeće metrike i prakse pružajući detaljniju i robusniju analizu učinkovitosti leta zrakoplova, pospješujući na takav način informirano donošenje odluka kao i razvoj daljnjih operativna unapređenja.

Razmatrajući ograničenja vezana uz istraživanje i razvoj osmišljenog modela, bitno je za naglasiti da je od velike važnosti detaljno provjeriti i ispraviti sve možebitne nepravilnosti u podacima profila leta dobivenih putem ADS-B sustava. S obzirom na razinu automatizacije takvog procesa, navedeno može biti vremenski intenzivan proces. Unatoč tom izazovu, primjena modela u stvarnim scenarijima pokazala je njegovu korisnost i potencijal za širu primjenu od strane industrije, u okviru ciljanih istraživanja, kao i od strane akademske zajednice, kao podrška znanstveno-istraživačkom radu i tehnološkom unapređenju visokoobrazovnog sustava.

Razmatrajući buduće istraživačko-razvojne aktivnosti usko vezane uz razvoj generičkog modela za procjenu vertikalne učinkovitosti zrakoplova u fazi penjanja i poniranja, može se zaključiti da postoje segmenti i značajke kojima bi se predmetni model mogao dalje

razvijati. Primjerice, od koristi bi bilo integrirati direktnu uzročno-posljedičnu korelaciju između operacija kontinuiranog penjanja i operacija kontinuiranog poniranja, te istu kroz višekriterijsku analizu korelirati sa performansama terminalnog zračnog prostora. Osim toga, nužno je korelirati rezultate za CCO i CDO, te iste dalje korelirati s meteorološkim uvjetima između parova zračnih luka. Prvenstveno kako bi se istražila uzročno-posljedična veza između vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova i meteoroloških uvjeta, iz razloga što meteorološki uvjeti predstavljaju značajan faktor koji utječe na performanse leta i vertikalnu učinkovitost leta. Dodatno, model treba dalje razvijati kako bi uključio analizu utjecaja buke, procjenjujući učinke neučinkovitosti leta na generiranje buke tijekom dolaznih i odlaznih putanja i korelirajući troškove buke u Europi. Shodno navedenom, daljnji razvoj i nadogradnja metodološkog i konceptualnog okvira generičkog modela, svakako bi doprinijeli većoj primjenjivosti razvijenog modela od strane industrije i akademske zajednice, poglavito u domenama strateškog planiranja, praćenja performansi, usklađenosti, utjecaja na okoliš, kontrolu kvalitete i ostalim područjima od značaja za industriju, kao i za akademsku zajednicu.

LITERATURA

- [1] Hrvatski zavod za norme. HRN EN ISO 9000:2015. *Sustavi upravljanja kvalitetom - Temeljna načela i terminološki rječnik*. Zagreb: HZN e-Glasilo 5/2015; 2015.
- [2] Cook AJ, Tanner G, Anderson S. *Evaluating the true cost to airlines of one minute of airborne or ground delay: Final report*. Bruxelles. EUROCONTROL. 2004. Preuzeto s: <https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/item/931w2/evaluating-the-true-cost-to-airlines-of-one-minute-of-airborne-or-ground-delay-final-report> [Pristupljeno: 19. lipnja 2024.]
- [3] Cook AJ, Tanner G. *European Airline delay cost reference values*. Bruxelles. EUROCONTROL. 2015. Preuzeto s: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/business-case/european_airline_delay_cost_reference_values_2011.pdf [Pristupljeno: 19. lipnja 2024.]
- [4] Post J, Bonn J, Bennett M, Howell D, Knorr D. The use of flight track and convective weather densities for national airspace system efficiency analysis. *Proceedings of the 21st Digital Avionics Systems Conference*. 27-31 October 2003, Irvine, California, United States of America. IEEE. pp. 2D4-2D4. <https://doi.org/10.1109/dasc.2002.1067925>.
- [5] Mihetec T, Odić D, Steiner S. Evaluation of night route network on flight efficiency in Europe. *IJTTE. International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2011;1(3): 132–141. https://bib.irb.hr/datoteka/531044.IJTTE2011_paper.pdf
- [6] Leones JL, Morales MP, D’Alto L, Escalonilla PS, Herrer DF, Bravo MS, Camara FC, Mateo AM, Mac Namee B, Wang S, Grover A, Plantholt P. Advanced Flight Efficiency Key Performance Indicators to support Air Traffic Analytics: Assessment of European flight efficiency using ADS-B data. *Proceedings of the 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE; 2018. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1109/dasc.2018.8569584>.
- [7] Mihetec T. *Upravljanje zračnom plovidbom - autorizirana predavanja*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2023.

- [8] International Civil Aviation Organization. *Global Air Navigation Plan Strategy*. Preuzeto s: <https://www4.icao.int/ganpportal/> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]
- [9] International Civil Aviation Organization. *Global Air Traffic Management Operational Concept (Doc 9854)*. 1st ed. Montreal, Canada; 2005.
- [10] International Civil Aviation Organization. *Manual on Air Traffic Management System Requirements (Doc 9882)*. 1st ed. Montreal, Canada; 2008.
- [11] International Civil Aviation Organization. *Manual on Global Performance of the Air Navigation System (Doc 9883)*. 1st ed. Montreal, Canada; 2009.
- [12] International Civil Aviation Organization. *Global Air Navigation Plan (Doc 9750-AN/963)*. 5th ed. Montreal, Canada; 2016.
- [13] Europski parlament i Vijeće Europske Unije. *Uredba (EZ) br. 549/2004 Europskog parlamenta i Vijeća od 10. ožujka 2004. o utvrđivanju okvira za stvaranje jedinstvenog europskog neba*. Izdanje: 2. Bruxelles; 2009.
- [14] SkyBrary. *Single European Sky – SES II*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/single-european-sky-ses-ii> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]
- [15] Republika Hrvatska. *Pravilnik o upravljanju zračnim prostorom*. Izdanje: 342. Zagreb: Narodne novine; 2023.
- [16] SkyBrary. *Functional Airspace Block (FAB)*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/functional-airspace-block-fab> [Pristupljeno: 15. lipnja 2024.]
- [17] Europska komisija. *Uredba Komisije (EU) br. 691/2010 od 29. srpnja 2010. o utvrđivanju plana performansi za usluge u zračnoj plovidbi i mrežnih funkcija i izmjeni Uredbe (EZ) br. 2096/2005 o utvrđivanju zajedničkih zahtjeva za pružanje usluga u zračnoj plovidbi*. Izdanje: 2. Bruxelles; 2010.
- [18] Europska komisija. *Provedbena uredba Komisije (EU) br. 390/2013 od 3. svibnja 2013.*

o utvrđivanju plana performansi za usluge u zračnoj plovidbi i mrežne funkcije. Izdanje: 2. Bruxelles; 2020.

[19] Europska komisija. *Provedbena uredba Komisije (EU) 2019/317 od 11. veljače 2019. o utvrđivanju programa performansi i sustava utvrđivanja naknada u okviru jedinstvenog europskog neba i stavljanju izvan snage provedbenih uredaba (EU) br. 390/2013 i (EU) br. 391/2013*. Izdanje: 1. Bruxelles; 2019.

[20] Europska komisija. *Provedbena odluka Komisije (EU) 2015/348 od 2. ožujka 2015. o usklađenosti određenih ciljeva uključenih u planove na nacionalnoj razini ili na razini funkcionalnog bloka zračnog prostora dostavljenih u skladu s Uredbom (EZ) br. 549/2004 Europskog parlamenta i Vijeća s ciljevima performansi na razini Unije za drugo referentno razdoblje (priopćeno pod brojem dokumenta C(2015) 1293)*. Izdanje: 1. Bruxelles; 2015.

[21] Europska komisija. *SES Performance and charging*. Preuzeto s: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky/ses-performance-and-charging_en [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[22] EUROCONTROL. *Performance Indicator - Horizontal Flight Efficiency*. Preuzeto s: <https://ansperformance.eu/methodology/horizontal-flight-efficiency-pi/> [Pristupljeno 20. lipnja 2024.]

[23] Peeters S, Koelman H, Koelle R, Galaviz-Schomisch R, Gulding J, Meekma M. *Towards a common analysis of vertical flight efficiency*. 2016 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS). Herndon, Virginia, United States of America: IEEE; 2016. <https://doi.org/10.1109/icnsurv.2016.7486368>.

[24] Leones JL, Morales MP, D'Alto L, Escalonilla PS, Herrer DF, Bravo MS, Camara FC, Mateo AM, Mac Namee B, Wang S, Grover A, Plantholt P. *Advanced Flight Efficiency Key Performance Indicators to support Air Traffic Analytics: Assessment of European flight efficiency using ADS-B data* [Internet]. 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE; 2018. Available from: <https://doi.org/10.1109/dasc.2018.8569584>

[25] Leksikografski zavod Miroslav Krleža. *Hrvatska enciklopedija – Ortodroma*. Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/ortodroma> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[26] EUROCONTROL. *Horizontal flight efficiency. Why the great circle is relevant – but not necessarily the most fuel-efficient route*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-07/eurocontrol-data-14-horizontal-flight-efficiency.pdf> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[27] International Civil Aviation Organization. *Operational Measures Horizontal Flight Efficiency*. Preuzeto s: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Operational-Measures_Horizontal-Flight-Efficiency.aspx [Pristupljeno: 21. lipnja 2024.]

[28] Peeters S, Koelman H, Koelle R, Galaviz-Schomisch R, Meekma M, Dalmet S, Guiding J. *Assessing vertical flight profiles during climb and descent in the US and Europe: US/Europe comparison studies*. 2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS). Herndon, Virginia, United States of America: IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/icnsurv.2018.8384945>.

[29] Performance Review Unit. *Vertical Flight Efficiency During Climb and Descent*. Preuzeto s: https://ansperformance.eu/publications/studies/2016_04_05_cco-cdo/ [Pristupljeno: 21. lipnja 2024.]

[30] Performance Review Commission. *An assessment of air traffic management in Europe during the calendar year 2019*. Bruxelles: EUROCONTROL; 2020.

[31] Ryerson MS, Hansen M, Bonn J. Time to burn: Flight delay, terminal efficiency, and fuel consumption in the National Airspace System. *Transportation Research. Part a, Policy and Practice*. 2014;69: 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.024>.

[32] Zanin M. Assessing airport landing efficiency through Large-Scale Flight Data analysis. *IEEE Access*. 2020;8: 170519–170528. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022160>.

[33] Correia P. *Analysis of Vertical Flight Efficiency During Climb and Descent*. Diplomski rad. Instituto Superior Técnico; 2017. Preuzeto s:

<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090415851/Thesis.pdf> [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[34] Polishchuk T, Lemetti A, Saez R. Evaluation of Flight Efficiency for Stockholm Arlanda Airport using OpenSky Network Data. *EPiC Series in Computing*. 2019; <https://doi.org/10.29007/9g31>.

[35] Chatterji GB. Fuel burn estimation using real track data. *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. 2011; <https://doi.org/10.2514/6.2011-6881>.

[36] Prats X, Agüi I, Netjasov F, Pavlović G, Vidosavljević A. *APACHE Final project results report*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona; 2018. Preuzeto s: <https://futur.upc.edu/23568251> [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[37] Prats X, Muxí CB, Netjasov F, Crnogorac D, Pavlovic G, Agüi I, et al. *Enhanced indicators to monitor ATM Performance in Europe. Main findings of the APACHE SESAR Exploratory Research Project*. Proceedings of the Eighth SESAR Innovation Days. Salzburg, Austria; 2018. https://upcommons.upc.edu/bitstream/2117/127699/1/SIDs_2018_paper_90.pdf

[38] IMETE. *SESAR long-term research project IMET specifies trajectory uncertainty due to weather conditions*. Preuzeto s: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/news/IMET_E-News_article_v3.pdf [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[39] PNOWWA. *Probabilistic nowcasting of winter weather for airports, Horizon 2020 SESAR Project*. Preuzeto s: <http://pnowwa.fmi.fi> [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[40] FMP-MET. *Meteorological uncertainty management for flow management positions*. Preuzeto s: <https://fmp-met.com> [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[41] Maslovara A, Mirković B. Impact of tailwind on airport capacity and delay at Zurich Airport. *Transportation Research Procedia*. 2021;59: 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.103>.

- [42] Steiner M, Bateman R, Megenhardt D, Liu Y, Xu M, Pocerlich M, Krozel J. *Translation of ensemble weather forecasts into probabilistic air traffic capacity impact. Air Traffic Control Quarterly*. 2010;18(3): 229–254. <https://doi.org/10.2514/atcq.18.3.229>.
- [43] Song L, Wanke C, Greenbaum D, Callner D. *Predicting sector capacity under severe weather impact for traffic flow management*. 7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int'l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; followed by 2nd TEOS Forum. Belfast, Northern Ireland, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland: Aerospace Research Central; 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-7887>.
- [44] International Civil Aviation Organization. *Continuous Climb Operations (CCO) Manual Doc 9993*. Montreal: 2013.
- [45] IFATCA. *Study continuous climb operations*. Proceedings of the 51st Annual Conference. Kathmandu, Nepal; 2012.
- [46] McConnachie D, Bonnefoy P, Belle A. *Investigating benefits from continuous climb operating concepts in the national airspace system*. In Proceedings of the 11th USA/Europe. 1-11. 2015
- [47] Pérez-Castán JA, Comendador FG, Rodríguez-Sanz A, Montes RB, Valdés RA, Sanz LP. Impact of continuous climb operations on airport capacity. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. 2018;96: 231–250. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.008>.
- [48] Simaiakis I, Balakrishnan H. A queuing model of the airport departure process. *Transportation Science*. 2016;50(1): 94–109. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0603>.
- [49] Jacquillat A, Odoni AR, Webster MD. Dynamic control of runway configurations and of arrival and departure service rates at JFK Airport under stochastic queue conditions. *Transportation Science*. 2017;51(1): 155–176. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0644>.
- [50] Weitz LA, Hurtado JE, Barmore BE, Krishnamurthy K. *An analysis of merging and spacing operations with continuous descent approaches*. 24th Digital Avionics Systems

Conference. Washington DC, United States of America; 2006.
<https://doi.org/10.1109/dasc.2005.1563325>.

[51] Alam S, Nguyen MH, Abbass HA, Lokan C, Ellejmi M, Kirby S. *A dynamic continuous descent approach methodology for low noise and emission*. 29th Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City, Utah, United States of America: IEEE; 2010.
<https://doi.org/10.1109/dasc.2010.5655502>.

[52] Heibly S, Visser H. *Impact of environmentally optimized departures on runway capacity*. 2009 Jun 14; Hilton Head, South Carolina, United States of America. <https://doi.org/10.2514/6.2009-6938>

[53] Pérez-Castán JA. How do Continuous Climb Operations affect the capacity of a Terminal Manoeuvre Area? *Libro De Actas CIT2016. XII Congreso De Ingeniería Del Transporte*. 2016; <https://doi.org/10.4995/cit2016.2016.3525>.

[54] Larsson, P. *CCD Versus CDA*. Stockholm. Scandinavian Airlines System; 2011. Preuzeto s: <https://ansperformance.eu/library/CCDvsCDA.pdf> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[55] Performance Review Unit. *Vertical flight efficiency*. Bruxelles. EUROCONTROL; 2008. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/vertical-flight-efficiency-mar-2008.pdf> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[56] Airbus Customer Services. *Getting to grips with fuel economy*. Blagnac. Airbus; 2004. Preuzeto s: <https://ansperformance.eu/library/airbus-fuel-economy.pdf> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]

[57] International Civil Aviation Organization. *Continuous Descent Operations (CDO) Manual Doc 9931*. Montreal: 2010.

[58] Fricke H, Seiß C, Herrmann R. Fuel and Energy Benchmark Analysis of Continuous descent operations. *Air Traffic Control Quarterly*. 2015;23(1): 83–108.
<https://doi.org/10.2514/atcq.23.1.83>.

[59] Wubben FJM, Busink JJ. *Environmental benefits of continuous descent approaches at Schiphol Airport compared with conventional approach procedures*. Report number: NLR-TP-2000-275, 2000.

[60] Pasutto P, Zeghal K, Hoffman EG. Vertical efficiency in descent: assessing the potential for improvements at the top 30 European airports. *AIAA AVIATION 2020 FORUM*. 2020; <https://doi.org/10.2514/6.2020-2893>.

[61] Toratani D, Wickramasinghe NK, Hirabayashi H. *SIMULATION TECHNIQUES FOR ARRIVAL PROCEDURE DESIGN IN CONTINUOUS DESCENT OPERATION*. 2018 Winter Simulation Conference (WSC). Gothenburg, Sweden; 2018. <https://doi.org/10.1109/wsc.2018.8632350>.

[62] Clarke JP, Brooks J, Nagle G, Scacchioli A, White W, Liu SR. Optimized profile Descent arrivals at Los Angeles International Airport. *Journal of Aircraft*. 2013;50(2): 360–369. <https://doi.org/10.2514/1.c031529>.

[63] Tong KO, Warren A, Brown J. Continuous Descent Approach procedure development for noise abatement tests at Louisville International Airport, KY. *AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum*. 2003; <https://doi.org/10.2514/6.2003-6772>.

[64] Clarke JP, Ho NT, Ren L, Brown JA, Elmer KR, Tong KO, et al. Continuous Descent Approach: design and flight test for Louisville International Airport. *Journal of Aircraft*. 2004;41(5): 1054–1066. <https://doi.org/10.2514/1.5572>.

[65] Borsky S, Unterberger C. Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events. *Economics of Transportation*. 2019;18: 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2019.02.002>.

[66] SESAR. *Business Trajectory/'4D' Trajectory*. Preuzeto s: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/SESAR_Factsheet_4DTrajectory_2_.pdf

[Pristupljeno: 23. lipnja 2024.]

- [67] EUROCONTROL. *Base of aircraft data*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/model/bada> [Pristupljeno: 21. lipnja 2024.]
- [68] Rao MN, Sultana R, Kota SH. *Solid and Hazardous Waste Management*. London: Butterworth-Heinemann; 2017.
- [69] International Civil Aviation Organization. *Convention on International Civil Aviation: Doc 8168*. Montreal: 2007.
- [70] Airbus Customer Services. *Getting to grips with cost index*. Blagnac: Airbus; 1998.
- [71] International Air Transport Association. *Jet Fuel Price Monitor*. Preuzeto s: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor> [Pristupljeno: 14. lipnja 2024.]
- [72] EUROCONTROL. *EUROCONTROL Standard Inputs for Economic Analyses*. Bruxelles; 2020.
- [73] RTCA DO-242A. *Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B)*. Washington: RTCA Inc.; 2002.
- [74] Joint Planning and Development Office. *Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System, Version 2.0*. Preuzeto s: <https://trid.trb.org/View/898283> [Pristupljeno: 15. lipnja 2024.]
- [75] Tyagi AK, Abraham A. *Data Science for Genomics*. London: Academic Press; 2022.
- [76] WRAP. *IATA Cabin Waste Handbook*. Banbury: International Air Transport Association; 2017.
- [77] CAPA. *Aviation Industry Glossary*. Preuzeto s: <https://centreforaviation.com/about/glossary> [Pristupljeno: 24. lipnja 2024.]

[78] Klophaus R, Yu C. Short-haul airline services in Europe and North America - A cross-business model and cross-continental analysis. *Journal of Air Transport Management*. 2023;109: 102400. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102400>.

[79] Skybrary. *Bombardier Dash-8 Q400*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/aircraft/dh8d> [Pristupljeno: 12. lipnja 2024.]

[80] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. Zbornik zrakoplovnih informacija. Preuzeto s: <https://www.crocontrol.hr/UserDocsImages/AIS%20produkti/eAIP/start.html> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[81] International Civil Aviation Organization. *Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations Volume III – Aircraft Operating Procedures (Doc 8168)*. 1st ed. Montreal, Canada; 2018.

[82] Performance Review Unit. *Vertical Flight Efficiency*. Preuzeto s: <https://ansperformance.eu/efficiency/vfe/> [Pristupljeno: 28. lipnja 2024.]

[83] EUROCONTROL. *EUROCONTROL Forecast 2024-2030*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-2024-2030> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[84] EUROCONTROL – CCO/CDO Task Force. *CCO/CDO Action Plan*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-cco-cdo-action-plan> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[85] EUROCONTROL – CCO/CDO Task Force. *CCO/CDO Action Plan – Appendix F: Airspace/Procedure Design*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-cco-cdo-action-plan> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[86] EUROCONTROL – CCO/CDO Task Force. *CCO/CDO Action Plan – Appendix H: CCO/CDO Facilitation*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-cco-cdo-action-plan> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[87] HungaroControl. Aeronautical Information Publication. Preuzeto s: <https://ais-en.hungarocontrol.hu/aip/> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2024.]

[88] EUROCONTROL. Collaborative environmental management. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/initiative/collaborative-environmental-management> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2024.]

[89] EUROCONTROL – CCO/CDO Task Force. *CCO/CDO Action Plan – Appendix N: Collaboration*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-cco-cdo-action-plan> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

[90] EUROCONTROL – CCO/CDO Task Force. *CCO/CDO Action Plan – Appendix K: Flight Crew Training*. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-cco-cdo-action-plan> [Pristupljeno: 11. kolovoza 2024.]

POPIS KRATICA

AGL	(Above ground level) Iznad površine tla
ASMA	(Arrival Sequencing and Metering Area) Područja sekvenciranja i mjerenja dolaska
ATM	(Air Traffic Management) Upravljanje zračnim prometom
BADA	(Base of Aircraft Data) Baza podataka o zrakoplovima
CAEP	(Committee on Aviation Environmental Protection) Odbor za zaštitu okoliša u zračnom prometu
CBA	(Cost-Benefit Analysis) Analiza troškova i koristi
CCO	(Continuous Climb Operations) Operacije kontinuiranog penjanja
CDO	(Continuous Descent Operations) Operacije kontinuiranog poniranja
CEM	(Collaborative environmental management) Suradničko upravljanje okolišem
CNS	(Communication, Navigation, Surveillance) Usluga komunikacija, navigacije i nadzora
ERNIP	(European Route Network Improvement Plan) Plan za poboljšanje Europske mreže ruta
FAB	(Functional Airspace Block) Funkcionalni blok zračnog prostora
FMS	(Flight Management System) Sustav za upravljanje letom
FPM	(Feet per minute) Stopa po minuti
GANP	(Global Air Navigation Plan) Globalni plan zračne navigacije
HFE	(Horizontal Flight Efficiency) Horizontalna učinkovitost leta
IATA	(International Air Transport Association) Međunarodno udruženje zračnih prijevoznika
ICAO	(International Civil Aviation Organization) Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo
ILS	(Instrument Landing System) Sustav za instrumentalno slijetanje
KPA	(Key Performance Area) Ključno područje uspješnosti
KPI	(Key performance indicator) Ključni pokazatelj uspješnosti
LS	(Level segment) segment "na istoj visini"
NADP	(Noise Abatement Procedure) Procedure uzlijetanja sa smanjenom bukom
NM	(Nautical Mile) Nautička milja
OPD	(Optimized Profile Descent) Optimizirani profil poniranja

PRC	(Performance Review Comission) Komisija za nadzor učinkovitosti
PRU	(Performance Review Unit) Jedinica za nadzor učinkovitosti
SES	(Single European Sky) Jedinstveno europsko nebo
SESAR	(Single European Sky ATM Research) Inicijativa istraživanja o upravljanju zračnim prometom Jedinstvenog europskog neba
TMA	(Terminal Maneuvering Area) Završna kontrolna oblast
VFE	(Vertical Flight Efficiency) Vertikalna učinkovitost leta

POPIS SLIKA

Slika 1. Prostorni prikaz funkcionalnih blokova zračnog prostora.....	9
Slika 2. Koncept horizontalne učinkovitosti leta	10
Slika 3. Primjer horizontalne neučinkovitosti leta.....	12
Slika 4. Prikaz stepenastog vertikalnog profila leta.....	14
Slika 5. Koncept operacija kontinuiranog penjanja	17
Slika 6. Koncept operacija kontinuiranog poniranja.....	20
Slika 7. Konceptualni okvir generičkog modela.....	26
Slika 8. Primjer horizontalne nedosljednosti u putanji leta	37
Slika 9. Podaci o performansama zrakoplova De Havilland Canada DHC-8-400	40
Slika 10. Horizontalno (gornji prikaz) i vertikalno prostiranje (donji prikaz) završnih kontroliranih oblasti Zračnih luka Zurich i Zagreb.....	42
Slika 11. Prikaz horizontalnog profila uzorkovanih letova.....	44
Slika 12. Vizualizacija rezultata neučinkovitosti	56
Slika 13. Procjena omjera goriva, troškova i utjecaja na okoliš povezanih s neučinkovitostima tijekom penjanja i poniranja.....	59
Slika 14. Primjer tzv. T-Bar procedure na Zračnoj luci Liszt Ferenc u Budimpešti	73
Slika 15. Prikaz alata MergeStrip	74

POPIS GRAFIKONA

Graf 1. Prikaz vertikalnog profila uzorkovanih letova	45
---	----

POPIS TABLICA

Tablica 1. Standardizirane vrijednosti za troškovnu i ekološku evaluaciju	33
Tablica 2. Nomenklatura	47
Tablica 3. Rezultati detekcije profila letova.....	48
Tablica 4. Rezultati sveobuhvatne potrošnje goriva i emisija letova.....	49
Tablica 5. Rezultati neučinkovitosti u sklopu faze penjanja.....	52
Tablica 6. Rezultati neučinkovitosti u sklopu faze poniranja	55
Tablica 7. Omjer faze penjanja i poniranja	57

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ diplomski rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom Generički model za procjenu vertikalne učinkovitosti leta zrakoplova u prilazu i penjanju, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 25.6.2024.

Matej Solob Jocić
(ime i prezime, potpis)