

Računanje emisija zrakoplovnih motora na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT

Jurčić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:119:037839>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Marko Jurčić

**Računanje emisija zrakoplovnih motora na području Zračne
luke Frankfurt pomoću programa IMPACT**

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 27. studenoga 2023.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovne emisije**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7390

Pristupnik: **Marko Jurčić (0135255314)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Računanje emisija zrakoplovnih motora na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT**

Opis zadatka:

U radu je potrebno obraditi postupak računanja emisija zrakoplovnih motora na području zračne luke Frankfurt. U uvodnom dijelu rada potrebno je objasniti sastav ispušnih plinova zrakoplovnog mlaznog motora te utjecaj pojedinih plinova na okoliš. U nastavku je potrebno prezentirati zrakoplovne propise, koje se odnose na ispušne plinove mlaznog motora. U glavnom dijelu rada, potrebno je predstaviti poznate načine računanja i praćenja emisija mlaznih motora, s naglaskom na način računanja pomoću računalnog programa IMPACT, koji je razvijen od EUROCONTROL-a. Potrebno je dati primjer izračuna emisija odlaznih i dolaznih letova na Zračnoj luci Frankfurt. U zaključku je potrebno analizirati dobivene rezultate izračuna te dati zaključna razmatranja.

Zadatak uručen pristupniku: 14. studenoga 2023.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**Računanje emisija zrakoplovnih motora na području Zračne
luke Frankfurt pomoću programa IMPACT**

**Calculating aircraft engine emissions using IMPACT software
at Frankfurt airport**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Marko Jurčić

JMBAG: 0135255314

Zagreb, 2023.

Sažetak

Utjecaj emisija zračnog prometa na globalno zatopljenje i zagađenje okoliša već je dugo vremena jedan od bitnijih tema u zračnoj industriji, pošto je zrakoplovstvo jedan od prinosnika globalnom zagađenju. U ovom radu obrađen je proces izgaranja mlaznog goriva te je prezentiran sastav ispušnih plinova. Prezentirane su također propisi, globalni i lokalni, koji služe za regulaciju i ograničenje zrakoplovnih emisija u današnjem svijetu. Predstavljene su poznati načini računanja i praćenja emisija, od kojih posebno program IMPACT, koji je razvijen od EUROCONTROL-a i koji služi za brzo i jednostavno računanje i prikaz emisija. Rad programa IMPACT je detaljno opisan u ovom radu te je primijenjen na računanje emisija odlaznih i dolaznih letova na Zračnoj luci Frankfurt kao jednoj od najvećih luka Europe. Prikazane su emisije odlaznih i dolaznih letova zajedno i pojedinačno, te su analizirane prisutne razlike u dobivenim rezultatima.

KLJUČNE RIJEČI: zrakoplovne emisije, zrakoplovni propisi, računanje emisija, IMPACT program, Zračna luka Frankfurt

Summary

The impact of air traffic emissions on global warming and environmental pollution has been a significant topic in the aviation industry for a long time, as aviation is one of the contributors to global pollution. This paper addresses the combustion process of jet fuel and presents the composition of exhaust gases. The regulations, both global and local, that serve to regulate and limit aviation emissions in today's world are also presented. Well-known methods for calculating and monitoring emissions are discussed, including the IMPACT software, developed by EUROCONTROL, which is used for quick and easy calculation and display of emissions. The functionality of the IMPACT software is described in detail in this paper, and it is applied to calculate the emissions of departing and arriving flights at Frankfurt Airport, one of the largest airports in Europe. Emissions from departing and arriving flights are presented collectively and individually, and any differences in the results are analyzed.

KEYWORDS: aviation emissions, aviation regulations, emission calculation, IMPACT software, Frankfurt Airport

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Zrakoplovne emisije plinova i njihov utjecaj na okoliš | 3 |
| 2.1. Zrakoplovno gorivo | 3 |
| 2.2. Izgaranje goriva i nastajanje ispušnih plinova..... | 4 |
| 2.2.1. Ugljikov dioksid (CO ₂) | 5 |
| 2.2.2. Vodena para (H ₂ O) | 6 |
| 2.2.3. Dušikovi oksidi (NO _x)..... | 6 |
| 2.2.4. Sumporov dioksid | 8 |
| 2.2.5. Ugljikov monoksid (CO)..... | 8 |
| 2.2.6. Ugljikovodici (HC) | 8 |
| 2.2.7. Dim i čađa | 9 |
| 3. Zrakoplovni propisi i ograničenja vezana uz emisije u zrakoplovstvu | 10 |
| 3.1. ICAO Aneks 16 | 10 |
| 3.1.1. ICAO Aneks 16, svezak II..... | 11 |
| 3.1.2. ICAO Aneks 16, svezak III | 12 |
| 3.2. CAEP | 13 |
| 3.3. Zakonski propisi za ispušne plinove u Republici Hrvatskoj | 16 |
| 4. Načini računanja zrakoplovnih emisija | 17 |
| 4.1. Metodologija izračuna emisija ugljikovog dioksida..... | 17 |
| 4.2. Emisije ugljikovog dioksida s obzirom na raspoloživa sjedala..... | 21 |
| 5. Program IMPACT i njegove mogućnosti | 24 |
| 5.1. Program IMPACT..... | 24 |
| 5.2. Princip rada programa IMPACT | 25 |
| 5.3. Mogućnosti programa IMPACT | 26 |
| 6. Izračun emisija na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT | 30 |
| 6.1. Prikupljanje podataka | 30 |
| 6.2. Proračun emisija | 34 |
| 6.3. Analiza rezultata | 38 |
| 7. Zaključak..... | 45 |
| Literatura | 46 |
| Popis slika | 48 |
| Popis tablica..... | 49 |

Popis grafova 50

1. Uvod

Razvojem zrakoplovstva, a paralelno i globalnim zatopljenjem, tematika emisija zrakoplova zauzima sve više prostora, kako u znanstvenoj produkciji, tako i u široj publicistici, te u ostalim javnim raspravama. Postoji nekoliko različitih čimbenika koji zajedno čine utjecaj zrakoplovstva na okoliš, a to su: ispušni plinovi, zrakoplovna buka, zbrinjavanje zrakoplovnog otpada i onečišćenje područja zračnih luka. Od svih navedenih utjecaja najveći utjecaj na atmosferu imaju ispušni plinovi koji su produkti izgaranja fosilnih goriva u zrakoplovnim motorima. Ispušni plinovi zrakoplovnih mlaznih motora sastoje se od skupine plinova od kojih su neki štetni po ljudsko zdravlje i zdravlje drugih živih bića na planeti, a gotovo svi imaju negativan utjecaj na okoliš.

Goriva koja koriste zrakoplovni motori su Jet A1, Jet A, Jet B i TS-1, a plinovi koji nastaju njihovim izgaranjem su: ugljikov dioksid (CO_2), ugljikov monoksid (CO), dušikovi oksidi (NO_x), sumporovi oksidi (SO_x), ugljikovodici (HC), vodena para (H_2O) te čestice dima, čađe i drugih štetnih tvari.

U ovom radu prikazan je novi program za računanje emisija zračnog prometa na primjeru računanja emisija na području Zračne luke Frankfurt.

Rad se sastoji od 7 poglavlja.

1. Uvod
2. Zrakoplovne emisije plinova i njihov utjecaj na okoliš
3. Zrakoplovni propisi i ograničenja vezana uz emisije u zrakoplovstvu
4. Načini računanja zrakoplovnih emisija
5. Program IMPACT i njegove mogućnosti
6. Izračun emisija na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT
7. Zaključak

U drugom poglavlju pod naslovom „*Zrakoplovne emisije plinova i njihov utjecaj na okoliš*“ predstavljeno je zrakoplovno gorivo koje se koristi u današnjem prometu. Objašnjen je proces izgaranja goriva te su predstavljeni i opisani plinovi koji nastaju tim izgaranjem, kao i njihov utjecaj na okoliš.

Treće poglavlje pod naslovom „*Zrakoplovni propisi i ograničenja vezana uz emisije u zrakoplovstvu*“ opisuje danas aktivne propise koje služe za ograničenje i regulaciju emisija zrakoplovnih mlaznih motora.

U četvrtom poglavlju pod naslovom „*Načini računanja zrakoplovnih emisija*“ prikazani su neki od postupaka koji se danas koriste, ili su predloženi za određivanja ili a proračun količine emisija zrakoplova.

Peto poglavlje pod nazivom „*Program IMPACT i njegove mogućnosti*“ predstavlja IMPACT program, koji je ujedno i glavni dio ovog rada. Predstavit će se princip rada i pokazati mogućnosti programa.

Šesto poglavlje pod nazivom „*Izračun emisija na području Zračne luke Frankfurt*“ se bavi korištenjem IMPACT programa te detaljnim opisivanjem postupka računanja emisija koje su emitirane prilikom odlazaka i dolazaka na području Zračne luke Frankfurt.

2. Zrakoplovne emisije plinova i njihov utjecaj na okoliš

Međunarodni zračni prijevoz rastao je visokim stopama od svojih najranijih dana nakon 1945. godine sve do naftne krize 1973. godine. Veliki poticaj tom rastu došao je iz tehničkih inovacija. Uvođenje turbo propelerskih zrakoplova početkom 1950-ih, transatlantskih mlaznih zrakoplova 1958. godine, širokotrupnih zrakoplova, te unaprjeđenje avionike bile su glavne inovacije. One su donijele veće brzine, veće veličine, bolju kontrolu troškova po jedinici, a time i niže stvarne cijene i stope. Uz povećane stvarne prihode i više slobodnog vremena, rezultat je bio značajno povećanje potražnje za zračnim putovanjima [1]. Podaci Međunarodne organizacije civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization*, ICAO) iz 2019. godine pokazuju da je te godine gotovo 4.5 milijardi putnika putovala zrakoplovom, što je ujedno 3.6% više nego godinu prije [2].

Takav zahtjev za prijevozom čini zrakoplovstvo jednim od najvećih proizvođača štetnih emisija. Emisije plinova ovise o nekoliko čimbenika od kojih je najvažniji vrsta i broj operacija zrakoplova, a ostali čimbenici ubrajaju: vrstu zrakoplovnog motora, duljine leta, postavu potiska, vrijeme provedeno u pojedinoj fazi leta. U ovom poglavlju opisan će se plinovi koji čine sastav zrakoplovnih emisija zajedno sa njihovim utjecajem na okoliš.

2.1. Zrakoplovno gorivo

Zrakoplovni motori su doživjeli veliki razvoj kroz svoju povijest. U početku se radilo o klipnim motorima s četverotaktnim Otto ciklusom, dosta sličnima onima koji se koriste na automobilima. Međutim, razvoj zrakoplovne industrije doveo je do novih zahtjeva za zrakoplovne motore poput povećanja dostupne snage, što je ujedno dovelo do razvoja avionskog benzina *Avgas-a* (engl. *Aviation gasoline*). Pojavom Drugog svjetskog rata došlo je do razvoja kerozina za potrebe novijih mlaznih motora. Nakon Drugog svjetskog rata dolazi do naglog razvoja komercijalnog zrakoplovstva čime je kerozin zamijenjen mlaznim turbinskim gorivima koji se koriste i danas, a to su: Jet A1, Jet A, Jet B i TS-1. Jet A1 i Jet A se razlikuju u temperaturama točke smrzavanja koja kod Jet A iznosi -40°C , a kod Jet A1 -47°C .

Zbog niže točke smrzavanja Jet A1 gorivo je prikladnije za duge međunarodne letove. Jet A1 i Jet A goriva su jednostavnija za nabavit od AVGAS goriva tijekom procesa rafiniranja jer se

tijekom procesa rafiniranja prvo dobije mlazno gorivo. Jednostavnost procesa rafiniranja rezultira nižoj cijeni mlaznog goriva od AVGAS goriva [3].

Jet B je najčešća alternativa AVGAS-u i mlaznom gorivu u civilnom zrakoplovstvu. Zbog svoje niske točke smrzavanja od -60°C često se koristi u hladnijim dijelovima poput Kanade i Aljaske. Gorivo TS-1 je glavni tip mlaznog goriva korištenog u Rusiji te je također bolje prilagođeno hladnijim uvjetima sa točkom smrzavanja od -50°C .

Svojstva izgaranja i energetska učinkovitost ključna su svojstva koja se promatraju prilikom analiziranja performansi goriva. Nadalje, važna svojstva koja je također potrebno promotriti su: stabilnost, mazivost, električna vodljivost, čistoća i drugo. Zrakoplovna goriva se sastoje od ugljikovodika (parafini, cikllparafini, aromatski ugljikovodici i olefini) te sadrže aditive koji su određeni specifičnim namjerama korištenja goriva [4].

2.2. Izgaranje goriva i nastajanje ispušnih plinova

Izgaranje goriva u mlaznim motorima se odvija u komori izgaranje gdje se smjesa goriva i zraka pali svjećicom prilikom pokretanja motora, a uslijed paljenja gorivo se dalje kontinuirano ubrizgava u plamen koji je u komori. Shema konvencionalne komore izgaranja prikazana je na Slici 1.



Slika 1 Konvencionalna komora izgaranja [5]

Ispušni plinovi mlaznih motora sastoje se približno od 7% do 8% od CO_2 i H_2O te 0.5 % NO_x , HC, CO, SO_x te od drugih kemijskih elemenata i čestica čađe. Preostali dio (91.5% do 92.5%) sastoji se od O_2 i N_2 . Emisije CO_2 i H_2O produkti su izgaranja goriva te su direktno

povezane s potrošnjom goriva, što je funkcija mase zrakoplova, aerodinamičke konstrukcije i performansi motora zrakoplova. Emisije NO_x-a, čađe, CO, HC i SO_x-a uglavnom su povezane s načinom izgaranja goriva u motoru te donekle s kemijskim reakcijama koje slijede nakon izgaranja. Ove emisije uglavnom su povezane s konstrukcijom motora, pa se mogu smanjiti potpunijim izgaranjem goriva [6]. Na Slici 2. prikazan je sastav produkata izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora pri idealnom i stvarnom izgaranju.



Slika 2 Produkti pri idealnom i stvarnom izgaranju [6]

2.2.1. Ugljikov dioksid (CO₂)

Ugljikov dioksid je plin, gušći od zraka, bez okusa i mirisa, koji u normalnim atmosferskim uvjetima nije zapaljiv. Kemijski je spoj koji se pod standardnim tlakom nalazi u zemljinoj atmosferi te je vodeći staklenički plin koji nastaje kao posljedica ljudskih aktivnosti.

Prirodni izvori ugljikovog dioksida su geiziri, šumski požari, vulkani i otapanje i trošenje karbonatnih stijena. Međutim, uz sve navedene izvore ugljikovog dioksida još uvijek je za čak 25% emitiranog ugljikovog dioksida rezultat je izgaranja fosilnih goriva. CO₂ nastao ljudskim djelovanjem najviše doprinosi globalnom zagrijavanju. Njegova je koncentracija u atmosferi 2020. godine bila 48% viša nego u predindustrijsko vrijeme (prije 1750. godine) [7].

Kroz posljednjih dvadesetak godina, udio emisija CO₂ u Hrvatskoj se povećava, pa je primjerice na najprometnijim prometnim raskrižjima koncentracija bila gotovo 3.5 puta viša od svjetskog standarda [8]. Emitirane emisije ugljikovog dioksida su posljedica potrošnje zrakoplovnog goriva, te ovise o masi zrakoplova, tipu i performansama motora kao i aerodinamičkim

karakteristikama zrakoplova. Koncentracije ugljikova dioksida preko 0.5% smatraju se nezdravim, a preko 5% opasnim po život. Čovjekovo izlaganje koncentracijama ugljikova dioksida od preko 2% uzrokuje vrlo štetne učinke po zdravlje [8].

Ugljikov dioksid je otrovan za čovjeka u većim koncentracijama: 1 % CO₂ će učiniti neke ljude pospanim, a od 7% do 10%, javlja se nesvjestica, glavobolja, slabljenje vida i sluha, dok izlaganje koncentracijama od preko 10% može uzrokovati gubljenje svijesti koje može biti od nekoliko minuta do nekoliko sati [9].

2.2.2 Vodena para (H₂O)

Drugi produkt izgaranja zrakoplovnog goriva je vodena para koja čini čak oko 30% ukupnog ispuha mlaznog motora, što ju čini drugim najbitnijim stakleničkim plinom kad se govori o zrakoplovnim emisijama.

Vodena para nastala kao produkt izgaranja mlaznog motora ima kratak životni vijek trajanja u ciklusu atmosfere te se kroz period od nekoliko tjedana uklanja iz troposfere u obliku oborina. Zbog emitiranja vodene pare na vrlo velikim visinama, može se duže zadržati u atmosferi i pojačati efekt staklenika. Vodena para smrzava se odmah po napuštanju motora te stvara kristaliće leda koji uzrokuju kondenzacijske tragove u atmosferi. Kada je temperatura dovoljno niska, a vlažnost dovoljno visoka, kristali leda se šire, privlačeći vodenu paru iz atmosfere. U obliku kondenzacijskih tragova, ovi kristali se mogu širiti vertikalno i horizontalno, stvarajući umjetne ciruse s vijekom trajanja od samo nekoliko sati (cirrus aviaticus)

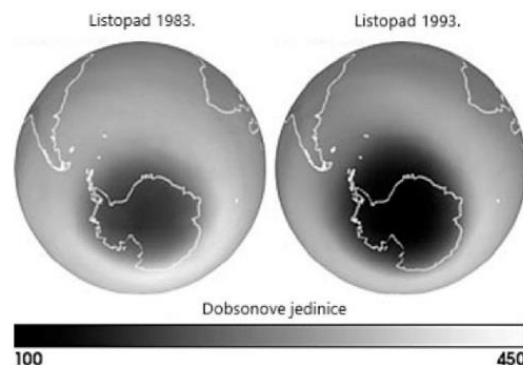
Vodena para apsorbira infracrvene toplinske zrake što ih zrače Zemlja i atmosfera, a oslobađanje topline pri kondenzaciji i njezino vezivanje pri isparivanju također utječu na vremenske procese i klimatske prilike [9].

2.2.3 Dušikovi oksidi (NO_x)

Dušikovi oksidi su niz spojeva dušika i kisika koji nastaju oksidacijom atmosferskoga dušika pri visokim temperaturama izgaranja. Mogu biti prisutni kao bezbojni i crvenkasto-smeđi dušični oksid (NO) te vrlo toksičan i reaktivan dušikov dioksid (NO₂). Spojevi dušikova oksida imaju izuzetno velik utjecaj na efekt staklenika i globalno zagrijavanje te se u atmosferi zadržavaju izuzetno dugo vremena. Također su uključeni u procese stvaranja kiselih kiša i

fotokemijskog smoga, te stvaranje i razgradnja ozonskog sloja u atmosferi. Međutim, dušikovi oksidi su i jako bitni za okoliš jer su bitni u procesu nitrifikacije – procesu kod kojeg dušične bakterije u tlu pretvaraju amonijak u nitrite, a potom u nitrate te se na taj način tlo obogaćuje dušikom kojeg iskorištavaju biljke [9].

Razvojem tehnologije mlaznih motora i smanjenjem potrošnje goriva motora razvijaju se novi materijali koji su omogućili uporabu povećanja tlaka i temperature u komori izgaranja. Posljedica toga je povećanje količina dušikovih oksida u emitiranim produktima izgaranja, na što je ICAO reagirao postupnim uvođenjem ograničenja za njegove emisije. Ozon (O_3), jedan od najjačih oksidansa, nastaje oksidacijom s dušikovim oksidom i dioksidom, ali i oksidacijom s drugim spojevima. Nalazi se u stratosferi na visinama od 10 do 40 kilometara iznad površine Zemlje, te služi kao zaštita od štetnog sunčevog UV (engl. *Ultraviolet*, UV) zračenja. Oštećenjem ozonskog omotača se povećava sklonost brojnim zdravstvenim problemima i povećava se štetni utjecaj sunčevog zračenja po zdravlje. Unatoč dobrobitima ozona u stratosferi, na nižim visinama, ispod stratosfere, ozon predstavlja vrlo štetan i nepoželjan plin koji može biti krajnje opasan, čak i smrtonosan. Što je bliže troposferi, to je i štetniji po zdravlje jer ozon uzrokuje oštećenje tkiva u plućima. Ubrzanim razvojem prometa i industrije količine ozona se zadnjih desetljeća uvelike povećavaju. Na Slici 3. prikazana je povećana prisutnost ozona u nižim slojevima atmosfere (na visinama do 10 kilometara) u Dobsonovim jedinicama – mjerna jedinica za površinsku gustoću atmosferskog ozona (1 DU iznosi debljinu sloja ozona od oko 0.01 mm pri standardnim uvjetima) [10].



Slika 3 Povećanje ozona u nižim slojevima atmosfere [10]

2.2.4 Sumporov dioksid

Sumporov dioksid je otrovan bezbojan plin neugodnog mirisa koji nastaje kao produkt izgaranja fosilnog mlaznog goriva i vulkanskih erupcija – topljenjem sumpornih ruda. Sumporov dioksid se vrlo lako otapa u vodi čime nastaje sulfatna kiselina. Uz dim i maglu glavni je uzročnik nastajanja smoga te je ujedno i vrlo korozivnog djelovanja na metalne konstrukcije i materijale.

Sumporov dioksid u vulkanskom pepelu hladi atmosferu, onemogućuje prolaz sunčevih zraka, te apsorbira toplinu čime smanjuje temperaturu atmosfere. Do slične reakcije dolazi i uslijed emitiranja SO₂ zajedno s vodenom parom prilikom izgaranja mlaznog goriva, te je dio već spomenutih kondenzacijskih tragova na nebu. Unatoč takvog efekta, trenutno nema regulacije za količine sumpora u mlaznom gorivu [11].

2.2.5 Ugljikov monoksid (CO)

Ugljikov monoksid je plin bez boje i mirisa koji nastaje izgaranjem ugljika i organskih spojeva bez dovoljne prisutnosti kisika. U zrakoplovstvu nastaje kao produkt nedovoljnog izgaranja fosilnog goriva. Jako je otrovan jer se puno bolje od kisika veže na hemoglobin u crvenim krvnim zrnima te onemogućuje vezanje kisika, njegovo raznošenje po organizmu i oksigenaciju stanica. Udio ugljikova monoksida u zraku manji od 0.01% uzrokuje glavobolju i vrtoglavicu, a udjel od 0.065 do 0.07% može prouzročiti smrt. No štetni utjecaj ugljikova monoksida na okoliš još nije poznat [9].

2.2.6. Ugljikovodici (HC)

Ugljikovodici su spojevi ugljika i vodika koji sadrže samo ta dva elementa, a izlaze iz komore izgaranja u obliku gorivnih para ili sitnih kapljica goriva proizvedenih termičkom degradacijom goriva. Zbog svojstva ugljikovih atoma da se međusobno spajaju jednostrukim i višestrukim vezama tvoreći ravne i razgranate lance i prstene, postoji na tisuće različitih ugljikovodika, od kojih kao produkata izgaranja goriva valja spomenuti staklenički plin metan (CH₄). Potpunim izgaranjem ugljikovodika nastaju ugljikov dioksid i voda. Ugljikovodici onečišćuju atmosferu, a posebno su štetni aromatski i klorirani ugljikovodici [9].

2.2.7 Dim i čađa

Čestice dima i čađe se isto mogu ubrojiti u emisije zrakoplovnih mlaznih motora jer su to ustvari neizgoreni ugljikovodici nastali zbog nepotpunog izgaranja, čija će koncentracija ovisiti o količini dima koji izlazi iz motora. Do nastajanja dima i čađe u gorivu dolazi uslijed izdvajanja čvrstog ugljika u procesu izgaranja oko kapljica goriva pri uvjetima velikog nedostatka kisika. Nastajanje sitnih čestica dimnosti i čađe ne može se predvidjeti proračunima te se stoga moraju uzeti u obzir utjecaji tlaka, kvaliteta goriva i raspršivanja kako bi se količina dima i čađe svela na minimum.

Za razliku od zrakoplova u prošlosti, moderni mlazni motori prilikom izgaranja uvelike imaju smanjen vidljiv dim i manje čvrstih čestica od starih motora. Pojava dima ovisi o korištenom gorivu. U korelaciji s česticama čađe nalaze se različita svojstva mlaznog goriva poput: udjela vodika, omjera vodika i ugljika, točka dimljenja i drugo. Valja napomenuti kako su u istraživanjima, prilikom analize dobivenih podataka, rezultati odstupali u različitim testovima te stoga precizni podaci utjecaja goriva na pojavu dimnosti nisu dostupni. Veću ulogu na pojavu dimnosti i čađe pokazalo se da imaju dizajn motora te uvjeti u kojima se koristi motor, posebice vlažnost zraka.

3. Zrakoplovni propisi i ograničenja vezana uz emisije u zrakoplovstvu

Razvojem zrakoplovstva sredinom 20. stoljeća došlo je do porasta emisija zrakoplovnih motora. Direktne zrakoplovne emisije, prema podacima iz 2019. godine, iznosile su 3.6% ukupnih emisija stakleničkih plinova u Europi i više od 2% emisija na svjetskoj razini [12]. To čini zračni promet, nakon cestovnog, drugim najvažnijim izvorom stakleničkih plinova u prometnom sektoru. Kako bi se regulirala razina emisija zrakoplovnih motora došlo je do pojave niza propisa vezanih uz emisije zrakoplova, od kojih je ključan ICAO Aneks 16 – „*Environmental Protection*“. U ovom poglavlju će biti predstavljeni Aneks 16 i još neki od propisa koji su vezani za reguliranje razine emisija zrakoplovnih motora.

3.1. ICAO Aneks 16

Poticaj za donošenjem zrakoplovnih propisa vezanih uz smanjenje emisija pokrenut je u SAD-u na lokalnoj i državnoj razini, kada je 1970. godine Američki kongres donio “Zakon o čistom zraku” (*Clean Air Act*) koji služi kao temelj za kontrolu emisija zrakoplovnih motora. Godine 1972. u Stockholmu je održana UN (*United Nations*) konferencija na temu zaštite okoliša, na temelju koje je ustanovljen ICAO – ov akcijski program obzirom na okoliš (*ICAO Action Programme Regarding the Environment*). Također, Kongres je osnovao i institucije koje će donositi i provoditi zrakoplovne propise. Godine 1972. u Stockholmu je održana UN (*United Nations*) konferencija na temu zaštite okoliša, na temelju koje je ustanovljen ICAO – ov akcijski program obzirom na okoliš (*ICAO Action Programme Regarding the Environment*).

Godine 1977. je osnovan Odbor za emisije zrakoplovnih motora (*Committee on Aircraft Engine Emissions, CAEE*) čiji je zadatak razviti posebne standarde za ograničenje sastojaka produkata izgaranja zrakoplovnih motora. Na drugom sastanku Odbora održanog 1980. godine predložen je materijal koji bi se trebao uključivati u dokumente ICAO-a kao Aneks, koji će uključivati sve aspekte utjecaja zrakoplovstva na okoliš. Slijedom toga je 1981. godina izašao konačni dokument: Aneks 16 svezak I koji sadrži odredbe vezane za buku zrakoplova i svezak II koji sadrži odredbe koje se odnose na emisije zrakoplovnih motora [12]. Godine 2017. ICAO je usvojio novi standard za emisije CO₂ što je rezultiralo pojavom sveska III vezan strogo za CO₂

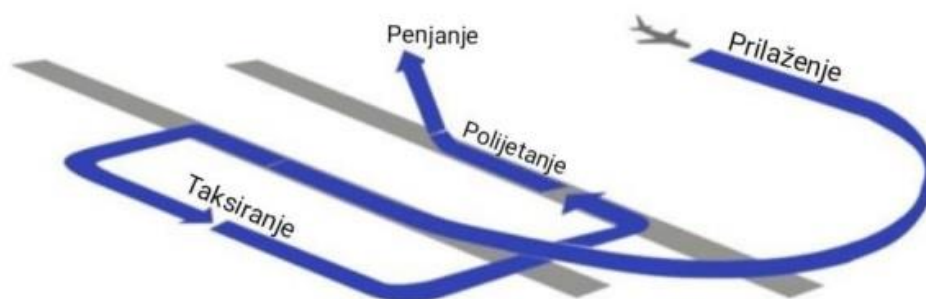
emisije zrakoplova. Sljedeće godine, 2018., ICAO je usvojio svezak IV pod nazivom „*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)*“ vezan za smanjenje ugljičnog otiska za međunarodni zračni promet.

3.1.1. ICAO Aneks 16, svezak II

ICAO Aneks 16 svezak II sadrži standarde koji zabranjuju namjerno ispuštanje sirovih goriva u atmosferu iz mlaznih zrakoplova proizvedenih nakon 18.02.1982. godine. Uključeni su standardi za ograničavanje ugljičnog monoksida (CO), ugljikovodika (HC) i dušikovih oksida (NO_x). Svezak II također sadrži detaljan opis postupaka, instrumenata i statističkih metoda koji se trebaju koristiti u procjeni rezultata ispitivanja.

Svezak II se sastoji od 3 dijela. U prvom dijelu se donose osnovne definicije i opis simbola. Drugi dio se bavi „ispuštenim“ gorivom (*Vented FUEL*), dok se treći dio bavi ograničenjima za emisije mlaznih motora podzvučnih i nadzvučnih zrakoplova. Aneks također sadrži 6 dodataka u kojima su detaljno opisane procedure mjerenja i mjerne opreme, specifikacije goriva koje se koristi za ispitivanje te opis računskih metoda.

Zrakoplovi su dužni ispunjavati zahtjeve certifikacije motora koje je usvojilo vijeće ICAO-a. Spomenuti zahtjevi su dizajnirani u svrhu regulacije kvalitete zraka u blizini zračnih luka u pogledu ograničenja emisija ugljikovog monoksida (CO), neizgorenih ugljikovodika (HC), dušikovih oksida (NO_x) i od 2017. godine ugljikovog dioksida (CO₂) koja su definirana u svesku III. Za računanje emisija koristi se ciklus polijetanja i slijetanja (engl. *Landing and Take-off Cycle*). Ciklus se sastoji od faze taksiranja, faze polijetanja, i faze slijetanja koje su prikazane na Slici 4. [13].



Slika 4 LTO ciklus [13]

Tablica 1. prikazuje postavke motora i vrijeme po određenim fazama ciklusa polijetanja i slijetanja u kojima se koriste referentne emisije za izračun emisija ispušnih plinova zrakoplova.

Tablica 1 Postavke motora i vrijeme po fazama LTO ciklusa [13]

| LTO faza | Postavke potiska | Vrijeme u min |
|-------------|------------------|---------------|
| Polijetanje | 100% | 0.7 |
| Penjanje | 85% | 2.2 |
| Prilaženje | 30% | 4.0 |
| Taksiranje | 7% | 26.0 |

3.1.2. ICAO Aneks 16, svezak III

ICAO Aneks 16, svezak III vezan je isključivo za emisije ugljikovog dioksida. Svezak se sastoji od 2 temeljna poglavlja i 2 Dodatka (*Appendices*). Prvo poglavlje objašnjava definicije i simbole prisutne u dokumentu, dok se drugo poglavlje bavi standardima certifikacije zrakoplovnih emisija ugljikovog dioksida na temelju potrošnje goriva.

U svesku III zrakoplovi kao emiteri ugljikovog dioksida su podijeljeni u dvije skupine prema vrsti pogonskog sustava i najvećoj dopuštenoj masi polijetanja (engl. *Maximum Take-off Mass*, MTOM) [14]:

- Podzvučne mlazne zrakoplove mase iznad 5700 kg
- Propelerske zrakoplove mase iznad 8618 kg.

Procjena emisija ugljikovog dioksida je definirana kao prosjek $1/SAR$ vrijednosti za 3 referentne mase definirane u nastavku i referentnog geometrijskog faktora (RGF) definiranog u Dodatku 2. Procjena emisija se računa prema formuli (1):

$$procjena\ emisija\ CO_2 = \frac{(1/SAR)_{AVG}}{(RGF)^{0.24}} \quad (1)$$

Gdje je:

SAR – specifična zračna udaljenost (engl. *Specific Air Range*), udaljenost koju zrakoplov pređe po jedinici potrošenog goriva

RGF – referentni geometrijski faktor (engl. *Reference geometric factor*)

Tri referentne mase za vrijednost 1/SAR definirane u kilogramima su:

- Visoka ukupna masa – 92% MTOM
- Srednja ukupna masa – aritmetička sredina visoke ukupne mase i niske ukupne mase
- Niska ukupna masa – $(0.45 * MTOM) + (0.63 * (MTOM^{0.924}))$

Certifikacija emisija CO₂ za MTOM također predstavlja certifikaciju emisija za mase ispod MTOM. Međutim, uz obavezno certificiranje CO₂ vrijednosti za MTOM, moguće je i svojevrijedno zatražiti certifikaciju za mase ispod MTOM [14].

3.2. CAEP

Do 1983. godine postojala su dva odbora unutar Vijeća ICAO-a, a to su bili Odbor za buku (CAN) i Odbor za emisije zrakoplovnih motora (CAEE). Međutim, 1983. godine došlo je do ujedinjavanja dva odbora u Odbor za zaštitu okoliša od zrakoplovnih djelovanja (engl. *Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP*). CAEP pomaže vijeću ICAO-a u stvaranju i primjenjivanju novih standarda i preporuka (engl. *Standards and Recommended Practises – SARPs*) vezanih uz emisije zrakoplova i općenito uz utjecaj zrakoplovstva na okoliš [12].

CAEP se sastoji od članova (*Members*) koji čine 31 država prikazanih na tablici 2.

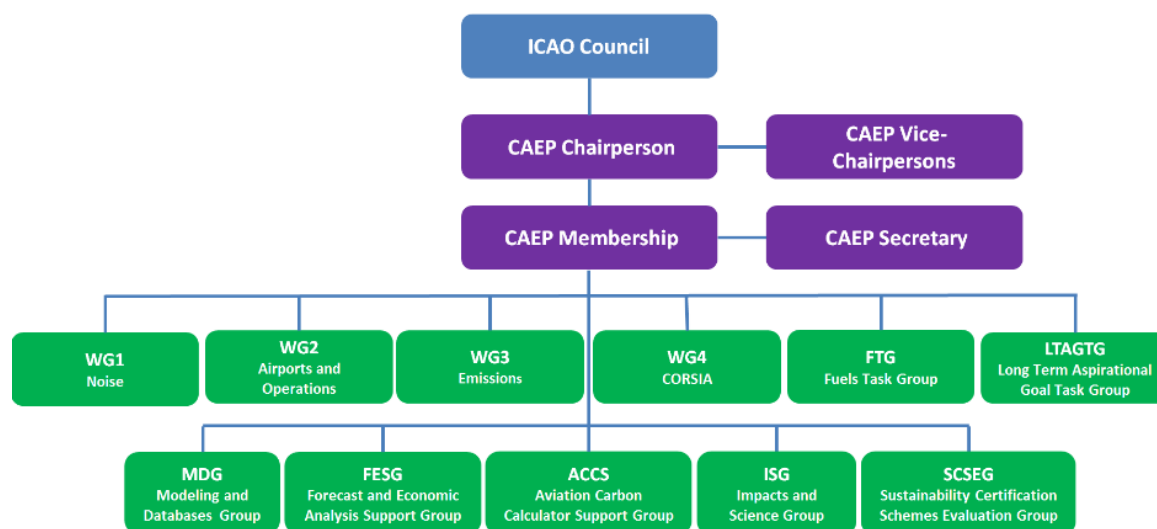
Tablica 2 Članovi CAEP – a [15]

| Članovi (<i>Members</i>) | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Argentina | Australija | Brazil |
| Čile | Kanada | Kina |
| Obala Bjelokosti | Egipat | Francuska |
| Grčka | Njemačka | Indija |
| Indonezija | Italija | Japan |
| Kenija | Nizozemska | Nigerija |
| Poljska | Katar | Saudijska Arabija |
| Rusija | Sjedinjene Američke Države | Singapur |
| Južnoafrička Republika | Španjolska | Švedska |
| Švicarska | Ukrajina | Ujedinjeni Arapski Emirati |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | | |

CAEP provodi određena istraživanja po nalogu Vijeća. Njegov opseg aktivnosti obuhvaća buku, lokalnu kvalitetu zraka (engl. *Local Air Quality*, LAQ) i skup mjera za smanjenje međunarodnih emisija CO₂ u zračnom prometu, uključujući tehnologiju zrakoplova, operativna poboljšanja, održiva goriva za zračni promet i mjere temeljene na tržištu.

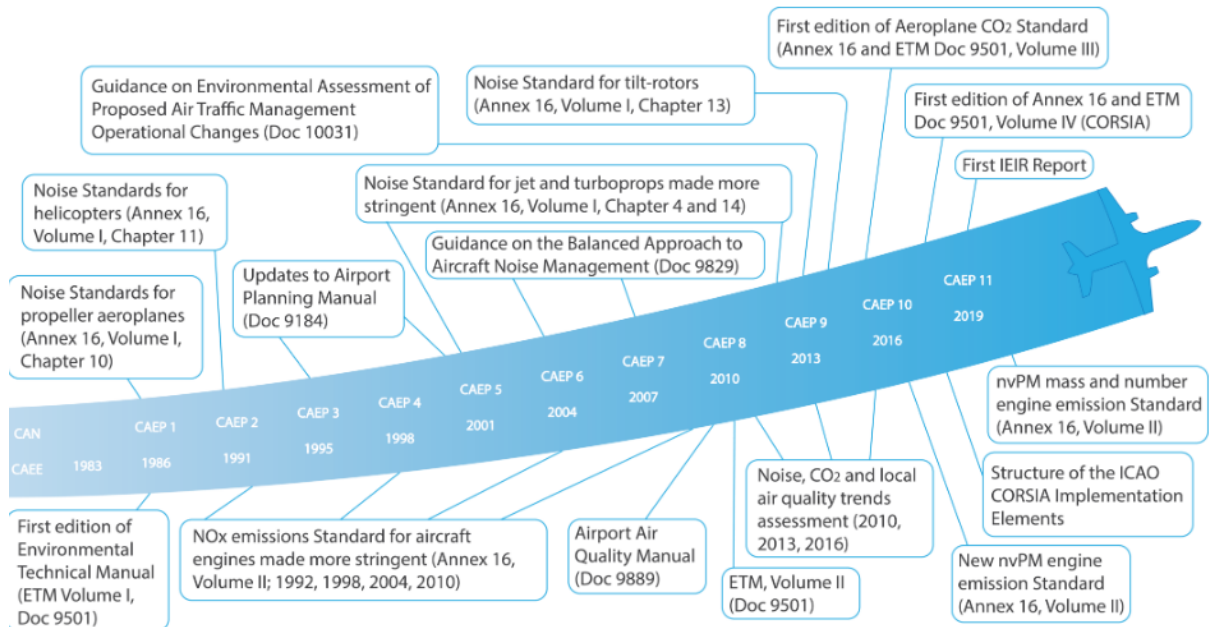
CAEP se sastoji od 31 državnog člana ICAO-a iz svih regija svijeta i 21 promatrača. Odbor djeluje pod vodstvom predsjednika i dva potpredsjednika, koje biraju članovi CAEP-a. Tajnik CAEP-a, imenovan od strane predsjednika Vijeća ICAO-a, pomaže predsjedniku CAEP-a. Kao odbor Vijeća, CAEP vodi svoje razgovore u skladu s ugovorom o povjerljivosti, a rezultati postaju javni tek nakon odobrenja Vijeća ICAO-a [15].

CAEP je strukturiran kroz četiri radne skupine te sedam grupa potpore. Prva radna skupina, WG1, bavi se ažuriranjem internacionalnih zrakoplovnih standarda vezano za buku zrakoplova. Druga radna skupina, WG2, bavi se bukom i emisijama vezanim uz područje aerodroma. Treća radna skupina, WG3, bavi se tehničkim pitanjima performansi zrakoplova i emisija, uključujući i redovno ažuriranje Aneksa 16, Sveska II, ali i razvojem novih CO₂ standarda uključujući i Svezak III Aneksa. Radna skupina WG4 bavi se isključivo CORSIA-om, te ažuriranjem Sveska IV [6]. Struktura CAEP-a prikazana je na Slici 5.



Slika 5 Struktura CAEP-a [15]

CAEP održava redovne sastanke svake tri godine koji rezultiraju izvještajima i posebnim preporukama koje se predlažu vijeću ICAO-a, te je od 1986. do 2022. godine održano 12 sastanaka. Slika 6. prikazuje bitne odluke donesene kroz povijest na CAEP sastancima zaključno sa sastankom CAEP 11 održanog 2019. godine.



Slika 6 CAEP odluke i razvoj [15]

Kao što se vidi na Slici 6., CAEP je kroz godine djelovanja donio veliki broj odluka u cilju poboljšavanja standarda emisija zrakoplova. Također je bitno spomenuti sastanak CAEP 12 održan 2022. godine, koji nije prikazan na Slici 6. CAEP 12 sastanak je rezultirao sa 31 prijedlogom ICAO vijeću, uključujući različite standarde, preporučene postupke, smjernice i tehničke izvještaje koji se odnose na zaštitu okoliša u zračnom prometu. Jedan od zanimljivijih odluka CAEP-a na tom sastanku je nastavak rada na transportnim zrakoplovima nadzvučnih brzina (engl. *Supersonic Transport Aircraft*, SST) i odobrenje rezultata istraživačkog studijskog rada kako bi se bolje razumjeli utjecaj uvođenja nadzvučnih zrakoplova na okoliš. CAEP se složio razviti standarde i preporučene postupke za buku prilikom slijetanja i polijetanja za nadzvučne zrakoplove, kao i ažurirati sve dijelove Aneksa 16, sveska II [16].

3.3 Zakonski propisi za ispušne plinove u Republici Hrvatskoj

Zračni promet u Republici Hrvatskoj uređen je Zakonom o zračnom prometu, Zakonom o obveznim i stvarnopravnim odnosima u zračnom prometu, Zakonom o zračnim lukama, Zakonom o osnutku Hrvatske kontrole zračne plovidbe te različitim podzakonskim propisima i međunarodnim ugovorima, a za reguliranje emisija je bitan Zakon o zračnom prometu [6].

Zakon o zračnom prometu upućuje na Organizaciju međunarodnoga civilnog zrakoplovstva (ICAO). U članku 123. desetoga dijela zakona, pod naslovom „Zaštita okoliša“ i podnaslovom „Buka zrakoplova i ispušni plinovi“, stoji [17].

„Buka zrakoplova i ispušni plinovi koje zrakoplov proizvodi prilikom uzlijetanja i slijetanja moraju biti ispod propisanih maksimalnih razina buke i ispušnih plinova utvrđenih propisom donesenim na temelju ovog Zakona i u skladu s odgovarajućim EU propisima”.

Na osnovu Zakona o zračnome prometu donesen je niz pravilnika poput Pravilnika o certifikaciji zrakoplova te projektnih i proizvodnih organizacija kojim se propisuju tehnički zahtjevi i upravni postupci za certifikaciju proizvoda, dijelova i uređaja s obzirom na plovidbenost i zaštitu okoliša [6].

4. Načini računanja zrakoplovnih emisija

Emisije plinova u zrakoplovstvu regulirane mnogim pravilnicima i zakonima. Europska Unija je također razvila „Sustav trgovanja emisijama” (EU ETS – *European Union Emissions Trading System*) s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova na ekonomski djelotvoran način.

Međutim, kako bi se uspješno provodile sve navedene mjere reguliranja emisija potrebno je pratiti, prikupljati podatke i na kraju izračunati količinu emisija zrakoplova. U ovom poglavlju će se navesti neki od načina računanja zrakoplovnih emisija

4.1. Metodologija izračuna emisija ugljikovog dioksida

Kada se govori o emisijama plinova zrakoplovnih motora, to se uglavnom odnosi na emisiju ugljikovog dioksida (CO₂). Iako su znanstvena istraživanja pokazala da zrakoplovne emisije pridodaju globalnom zatopljenju više nego samo emisijom ugljikovog dioksida [18], ugljikov dioksid i dalje se smatra stakleničkim plinom od najvećeg utjecaja na globalno zatopljenje i promjenu klime pa je metodologija proračuna primarno donesena u cilju praćenja ugljikovog dioksida. Zbog toga se kao metoda izračuna emisija za izvješća, uglavnom koristi izračun emisija ugljikovog dioksida.

Podaci koji su sadržani u izvješćima o emisiji CO₂ su potrošeno gorivo, izraženo u kg i tonama, te emisije CO₂ izražene u kg i tonama, i treba se omogućiti selektiranje ovih podataka na slijedeće načine [19]:

- prema tipu zrakoplova u floti
- po registraciji zrakoplova
- vlastiti ili unajmljeni zrakoplov
- letovi u pojedine zemlje, članice EU
- letovi koji potpadaju pod ETS regulativu i oni koji to nisu
- domaći i međunarodni
- po parovima gradova
- po broju leta
- letovi koji su izuzeti (školski letovi i dr.)
- specifična potrošnja/emisija po registraciji /tipu
- broj letova
- blok vrijeme

Emisije CO₂ se izražavaju u jedinicama ppm (*parts per million*) koje označavaju udio molekule stakleničkog plina u milijun molekula suhog zraka. Često se izražava u ppm e (ekvivalenta CO₂e) što omogućuje usporedbu učinaka odnosno klimatskih utjecaja koncentracija različitih stakleničkih plinova u odnosu na jednu jedinicu CO₂. CO₂e se dobiva množenjem emisija svakog od šest stakleničkih plinova s njegovim 100-godišnjim potencijalom globalnog zagrijavanja (engl. *Global Warming Potential* – GWP) [12].

Metodologija proračuna emisija stakleničkih plinova temelji se na Vodiču 2006 „*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National GHG Inventories, Volume 2, Energy*“, ili skraćeno „*Vodič*“. Prema *Vodiču* sektor zrakoplovstva uključuje emisije iz svih zrakoplova za civilnu komercijalnu uporabu. Opisane metode se također mogu koristiti za procjenu emisija iz vojnog zrakoplovstva, ali se emisije prijavljuju u zasebnoj kategoriji. Za potrebe inventara, posebno se računaju emisije domaćeg, a posebno međunarodnog zračnog prometa [12].

Vodič daje tri razine proračuna emisija CO₂ iz sektora zračnog prometa, sa razinom 1 kao najjednostavnijom, a razinom 3 najkompleksnijom. Odabir metodologije ovisi o vrsti goriva, dostupnim podacima te značaju emisija zrakoplova u cjelokupnom inventaru. Razine 1 i 2 koriste podatke o potrošnji goriva., dok razina 3 koristi podatke o kretanju zrakoplova na pojedinim letovima [12].

Razina 1 se temelji na potrošnji goriva, a emisije CO₂ računaju se formulom (2):

$$Emisije = Potrošeno\ gorivo * Emisijski\ faktor \quad (2)$$

Kao što se vidi u formuli (2), Emisije CO₂ se dobivaju kao umnožak potrošenog goriva i emisijskog faktora. Količina potrošenog goriva se može utvrditi kroz 2 metode: metoda A i metoda B. Kako bi se izbjegli nedostaci ili dvostruko brojanje za izračun se koristi isključivo jedna od dviju metoda za svaki zrakoplov. U Hrvatskoj većina prijevoznika koristi metodu A.

Metoda A koristi formulu(3) koja glasi:

$$F_{N,A} = T_N - T_{N+1} + U_{N+1} \quad (3)$$

Gdje je:

$F_{N,A}$ – gorivo potrošeno za razmatrani let (let N), određeno metodom A

T_N – količina goriva koja se nalazi u spremnicima nakon završetka punjenja zrakoplova gorivom za let N

T_{N+1} – količina goriva koja se nalazi u spremnicima zrakoplova nakon završetka punjenja zrakoplova gorivom za sljedeći let

U_{N+1} – količina goriva kojom se puni zrakoplov za let $N + 1$

Ukoliko se zrakoplov ne puni za sljedeći let, količina goriva koja se nalazi u spremnicima utvrđuje se prilikom prvog idućeg leta koji će taj zrakoplov obaviti. U iznimnim situacijama kao što je održavanje uslijed čega će doći do potpunog pražnjenja spremnika zrakoplova, prijevoznik može zamijeniti T_{N+1} i U_{N+1} s iznosom količine goriva koja je ostala u spremnicima s početkom iduće aktivnosti zrakoplova, a koja se evidentira u tehničkom dnevniku.

Metoda B koristi formulu(4):

$$F_{N,B} = R_{N-1} - R_N - U_N \quad (4)$$

Gdje je:

$F_{N,B}$ – gorivo potrošeno za razmatrani let (let N), određeno metodom B

R_{N-1} – količina goriva koja se nalazi u spremnicima zrakoplova na kraju leta N , tj. Kad se motor ugasi

U_N – količina goriva kojom se puni zrakoplov za let N

Količine goriva nakon promatranog leta utvrđuju se nakon gašenja pogonskog sustava. Ukoliko zrakoplovom nije obavljen let prije promatranog leta na kojemu se mjerila potrošnja goriva, prijevoznik može zamijeniti R_{N-1} s podacima o iznosu količine goriva koja je ostala u spremnicima zrakoplova na kraju prethodne aktivnosti zrakoplova iz tehničkog dnevnika.

Emisijski faktor predstavlja faktor koji opisuje stopu kojom određena aktivnost ispušta stakleničke plinove u atmosferu, a izražava se u t CO₂/TJ. Tablica 2. prikazuje emisijske faktore korištene u proračunu za 2019. godinu [12].

Tablica 3 Emisijski faktori [12]

| Gorivo | | CO ₂ Emisijski faktor (t CO ₂ /TJ) |
|-------------------------|-------------------|--|
| Motorni benzin | Motor Gasoline | 69.30 |
| Aviobenzin | Aviation Gasoline | 70.00 |
| Kerozin (Mlazno gorivo) | Jet Kerosene | 71.50 |

Osim potrošnje goriva, Razina 2 se temelji i na broju polijetanja, odnosno slijetanja. Operacije zrakoplova su podijeljene na dvije faze: LTO fazu i fazu krstarenja, te je zbog toga za Razinu 2 potrebno znati broj LTO ciklusa za domaće i međunarodne letove prema tipu zrakoplova. Emisije LTO ciklusa obuhvaćaju sve operacije koje se obavljaju ispod 914 m (3000 ft), a emisije krstarenja su one iznad 914 m [12].

Za razliku od jedne formule korištene za Razinu 1, Razina 2 koristi 5 formula za izračun emisija [12].

Gorivo potrošeno u LTO fazama se računa prema formuli (5):

$$Gorivo\ LTO = \sum Broj\ LTO\ ciklusa * EF \frac{kg}{LTO} \quad (5)$$

Gdje je:

EF - emisijski faktor

Emisije u LTO fazama se računaju prema formuli (6):

$$LTO_{emisija} = broj\ LTO\ ciklusa * EF\ LTO \quad (6)$$

Gorivo potrošeno u fazi krstarenja računa se prema formuli(7):

$$Gorivo\ Krstarenje = Ukupna\ potrošnja\ goriva - Gorivo\ LTO \quad (7)$$

Emisije u fazi krstarenja se računaju prema formuli(8):

$$Krstarenje_{emisija} = (Ukupna\ p.g. - LTO\ p.g.) * EF\ Krstarenja \quad (8)$$

Gdje je:

Ukupna p.g. – ukupna potrošnja goriva

LTO p.g. – LTO potrošnja goriva

Na kraju, ukupne emisije prema Razini 2 se računaju pomoću formule (9):

$$Ukupna\ emisija = LTO_{emisija} + Krstarenje_{emisija} \quad (9)$$

Koraci za računanje emisija prema Razini 2 koristeći navedene formule su sljedeći:

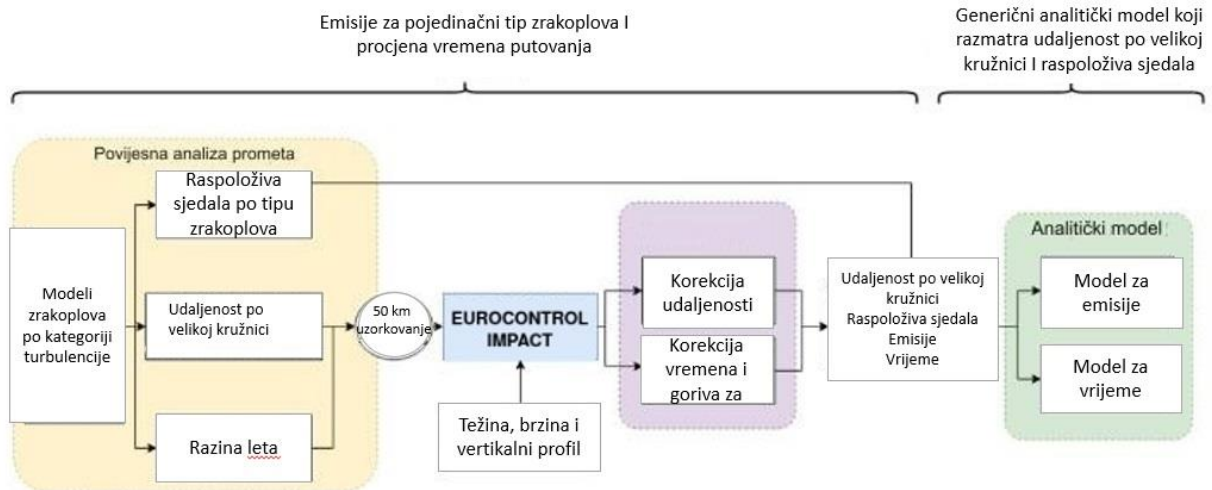
1. Izračun domaće i međunarodne ukupne potrošnje goriva za zrakoplovstvo
2. Izračun goriva LTO ciklusa za domaće i međunarodno zrakoplovstvo prema formuli (5)
3. Izračun goriva za fazu krstarenja za domaće i međunarodno zrakoplovstvo prema formuli (6)
4. Izračun emisija iz LTO ciklusa te krstarenja za domaće i međunarodno zrakoplovstvo prema formulama (7) i (8)
5. Izračun ukupnih emisija prema formuli (9)

Razina 2 je najčešće korištena razina za računanje emisija.

4.2. Emisije ugljikovog dioksida s obzirom na raspoloživa sjedala

Dok je metoda predstavljena poglavlju 4.1. ovog rada standardna metoda za računanje emisija zrakoplova, dostupni su prijedlozi i drugih metoda za drugačiji prikaz emisija plinova. Jedna od njih je model prikaza emisija ugljikovog dioksida koja razmatra i količinu raspoloživih sjedala zrakoplova koji se razmatra.

Prethodno navedene metode su zadovoljavajuće što se tiče regulatornih zahtjeva, međutim neke zračne prijevoznike mogu zanimati podaci o optimalnom broju sjedala za pojedine duljine letova. Današnji načini za procjenu emisija se usredotočuju na jednostavne linearne odnos između udaljenosti ili vremena i emisija, ili se temelje na detaljnim modelima potrošnje goriva, koji zahtijevaju detaljno definirane parametre za svaki let. To ograničava mogućnost provođenja analize na razini mreže, gdje je potreban kompromis između prevezenih putnika i prijedene udaljenosti. Zato se razvijaju noviji modeli poput modela koji prikazuje emisije ugljikovog dioksida u odnosu na raspoložive sjedalo-kilometre (engl. *Available Seat Kilometres*, ASK). Model je prikazan na Slici 7. [20].



Slika 7 Model za računanje emisija ugljikovog dioksida u odnosu na raspoložive sjedalo – kilometre [20]

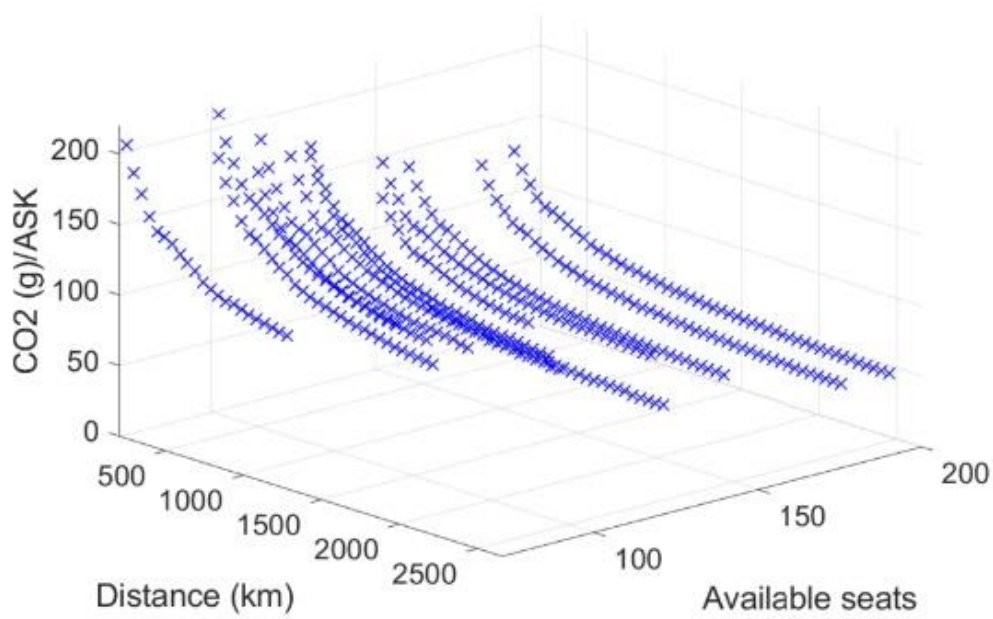
Kao što se vidi na slici 7., ovaj model se sastoji od 3 dijela.

Povijesna analiza prometa (engl. *Historical traffic analysis*) je prvi dio koji obuhvaća ulazne podatke kao što su raspoloživa sjedala po tipu zrakoplova, optimalna duljina leta i razina leta. Ti podaci se dobivaju u nezavisnim odvojenim programima i služe kao ulazni podaci za model [20].

Drugi dio je dio koji se odnosi na EUROCONTROL-ov *IMPACT* program. Taj program će biti opisan detaljnije u sljedećem poglavlju, a ovdje služi kao baza podataka za računanje performansi zrakoplova.

Zadnji dio se odnosi na ispravljanje grešaka programa. Postoje dvije greške koje se ispravljavu. Prva se odnosi na oadaljenost jer *Historical traffic analysis* računa ortodromsku udaljenost i ne uzima u obzir promjene u putanji s obzirom na promet i ostale faktore. Druga greška se odnosi na vrijeme i potrošnju goriva gdje korigira za faktore kao što su vrijeme taxiranja [20].

Izgled završnog rezultata je prikazan na Slici 8.



Slika 8 Prikaz rezultata emisija ugljikovog dioksida po raspoloživim sjedalo - kilometrima [20]

Kao što se vidi na Slici 8., x i y osi prikazuju udaljenost u km i broj raspoloživih sjedala dok za os prikazuje emisiju ugljikovog dioksida po raspoloživim sjedalo-kilometrima prikazanu u $\text{CO}_2(\text{g})/\text{ASK}$.

5. Program IMPACT i njegove mogućnosti

Od 2000. godine EUROCONTROL je razvio nekoliko modela kako bi pomogao svojim državama članicama, a time i cijelom zrakoplovstvu, procijeniti i prikazati utjecaj trenutnog i budućeg zračnog prometa na okoliš. Kako se svijet zrakoplovstva i tehnologije s vremenom sve više razvijao, tako su se i ti modeli s vremenom usavršavali te su današnje verzije značajno bolje od početnih.

Današnji skup alata za zaštitu okoliša EUROCONTROL-a sastoji se od tri glavna modela: *Advanced emission model (AEM)*, *Open-ALQS* i *IMPACT*. Sva tri modela su uspješno prošla testove od ICAO 2008.-2009. godine te su od tad dio odobrenog skupa modela procjene ICAO Odbora za zaštitu okoliša u zračnom prometu (CAEP) [21].

U ovom poglavlju će se predstaviti program IMPACT, te će biti predstavljen način rada i mogućnosti programa.

5.1. Program IMPACT

IMPACT je web-bazirana platforma za modeliranje koja omogućuje analizu emisija plinova i buke mlaznih zrakoplova. IMPACT na temelju opsežnog skladišta referentnih podataka uključuje kalkulator putanje zrakoplova, koji izračunava kompletne putanje zrakoplova od odlazne do dolazne zračne luke, zajedno s informacijama o potisku motora i protoku goriva. Sustav buke IMPACT-a usklađen je s ICAO Doc 9911 i novousvojenim 4. izdanjem ECAC.CEAC Doc29 [22].

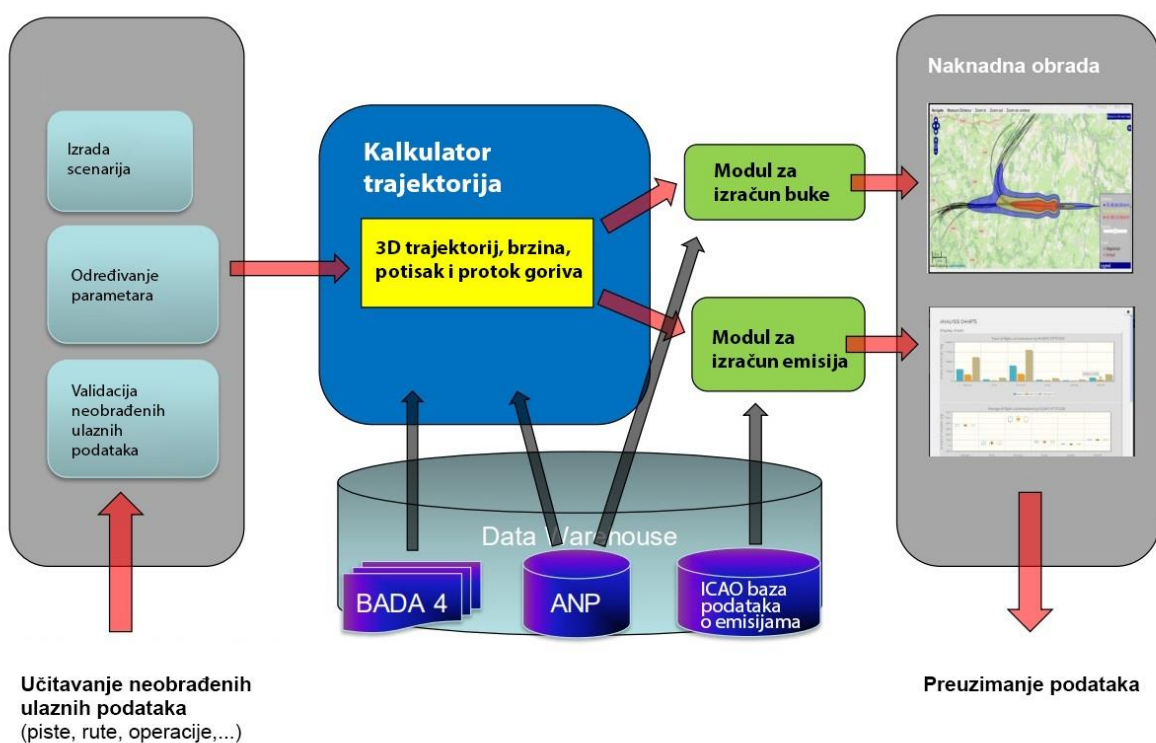
Glavna karakteristika IMPACT-a je da je to web-bazirana platforma za modeliranje kojoj korisnici daljinski pristupaju putem zaštićenog portala. Svi izračuni se izvode na određenim serverima koje kontrolira EUROCONTROL, a takav pristup nosi mnoge prednosti.

Prva prednost je da korisnici ne moraju instalirati nikakav poseban softver na svoje uređaje. Preko web-preglednika se može pristupiti IMPACT web-portalu, gdje se odvijaju sve radnje za analizu i rad, kao što su učitavanje ulaznih podataka, pokretanje izračuna te vizualizacija i preuzimanje rezultata. Nadalje, ovaj pristup također omogućuje jednostavno ažuriranje različitih baza podataka koje koristi IMPACT, bez potrebe za redistribucijom novog softverskog

paketa, te pruža fleksibilnost odabira verzija baze podataka koje će se koristiti u studiji. Na kraju, olakšava sigurnu pohranu osjetljivih referentnih podataka o zrakoplovu kao što su podaci BADA i ostale baze podataka koje se mogu koristiti [22].

5.2. Princip rada programa IMPACT

IMPACT koristi kombinaciju korisničkih ulaznih podataka i već prisutnih baza podataka kako bi pomoću svojeg kalkulatora putanje zrakoplova dobio rezultate o emisijama plinova i buke. Pojednostavljeni princip rada je prikazan na Slici 9.



Slika 9 IMPACT princip rada [23]

IMPACT podržava različite vrste ulaznih podataka koji se mogu dohvatiti iz različitih izvora, kao što su simulacije u stvarnom vremenu i simulacije temeljene na aritmetičkom modelu, te ulazni podaci mogu biti stvarni podaci ili više teorijskih definicija letačkih procedura. Ti se podaci učitavaju u IMPACT preko interneta te se tamo pohranjuju za kasniju uporabu. IMPACT-ov kalkulator performansi procesira ulazne podatke kako bi stvorio kompletne 4D trajektorije svakog leta te ih pohranjuje u strukturu pod nazivom „Common Input Dana“ (CID) koja će se kasnije koristiti u svrhu računanja emisija plinova i buke. Kako bi stvorio CID,

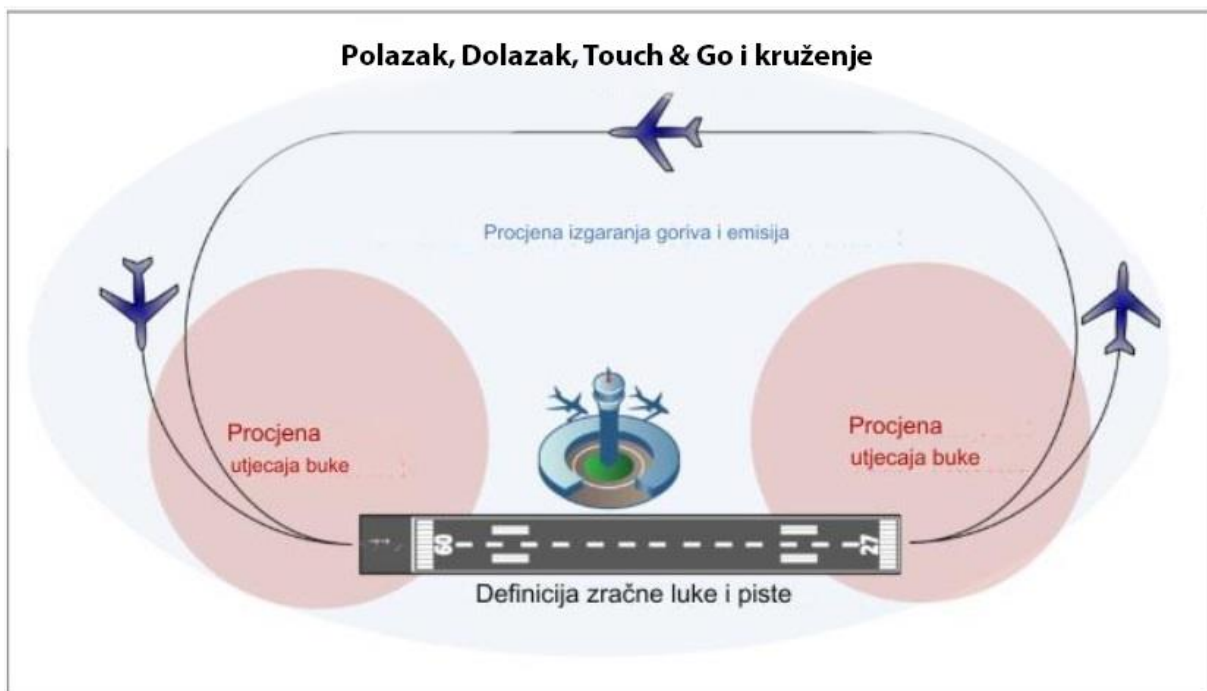
IMPACT koristi baze podataka već prisutne u programu: „*Aircraft Noise and Performance database*“ (ANP), „*Base of Aircraft Data*“ (BADA), i „*ICAO Engine Emissions Database*“. ANP je baza podataka koja prati dokumente ECAC Doc 29 i ICAO Doc 9911 za modeliranje konture buke zrakoplova na prilazima i odlascima i za određivanje razine buke.

BADA je baza podataka performansi zrakoplova koja sadrži sve potrebne parametre za računanje 4D trajektorije zrakoplova koristeći „Totalni energetska model“ (engl. *Total Energy Model*). IMPACT također koristi BADA bazu podataka za računanje protoka goriva na svakoj točki trajektorije zrakoplova.

5.3. Mogućnosti programa IMPACT

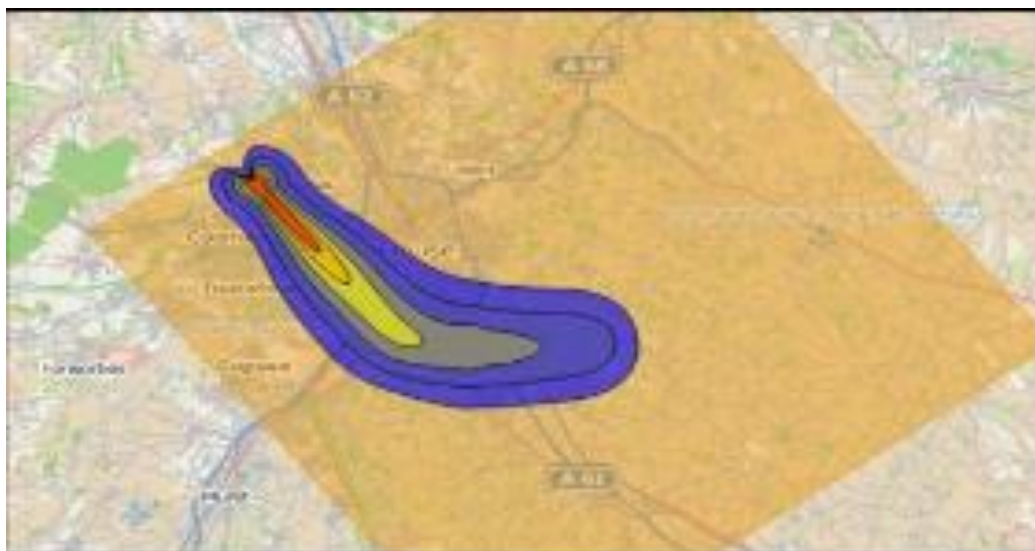
IMPACT ima mogućnost operiranja u 2 moda: „*Airport-Centric*“ i „*Airport-to-airport*“

„*Airport-Centric*“ mod, prikazan na Slici 10., se odnosi na računanje emisija za operacije na području zračne luke. Tu se ubrajaju faze odlazaka, dolazaka, ali i *Touch and Go* faze i sav promet na području zračne luke. Ovaj mod podržava računanje emisija buke i plinova zrakoplova.



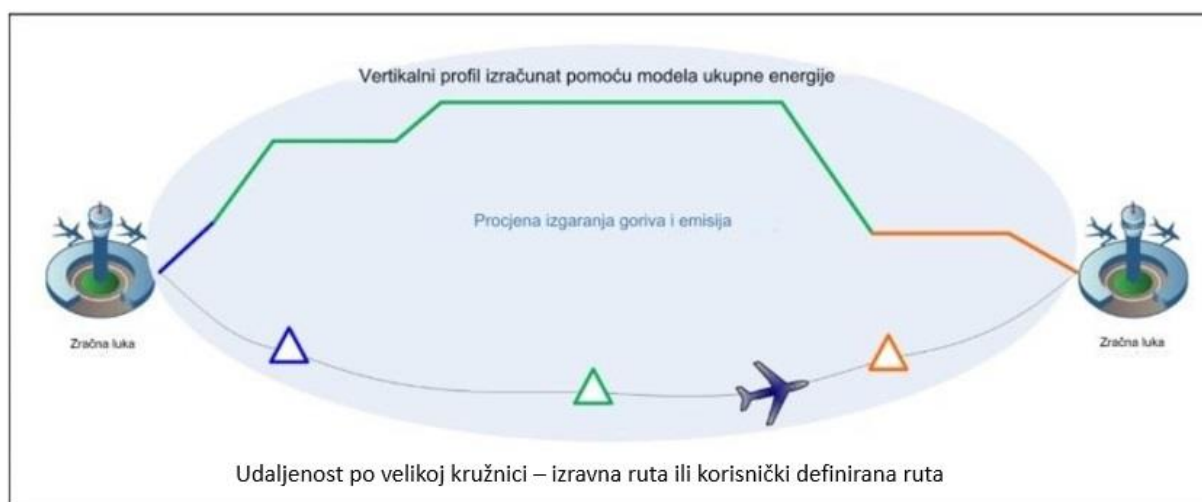
Slika 10 „*Airport-Centric*“ mod [23]

U ovom modu IMPACT može pomoću ANP baze podataka izračunati razinu buke i prikazati mapu buke zrakoplova na području zračne luke, kako je prikazano na Slici 11. [23]



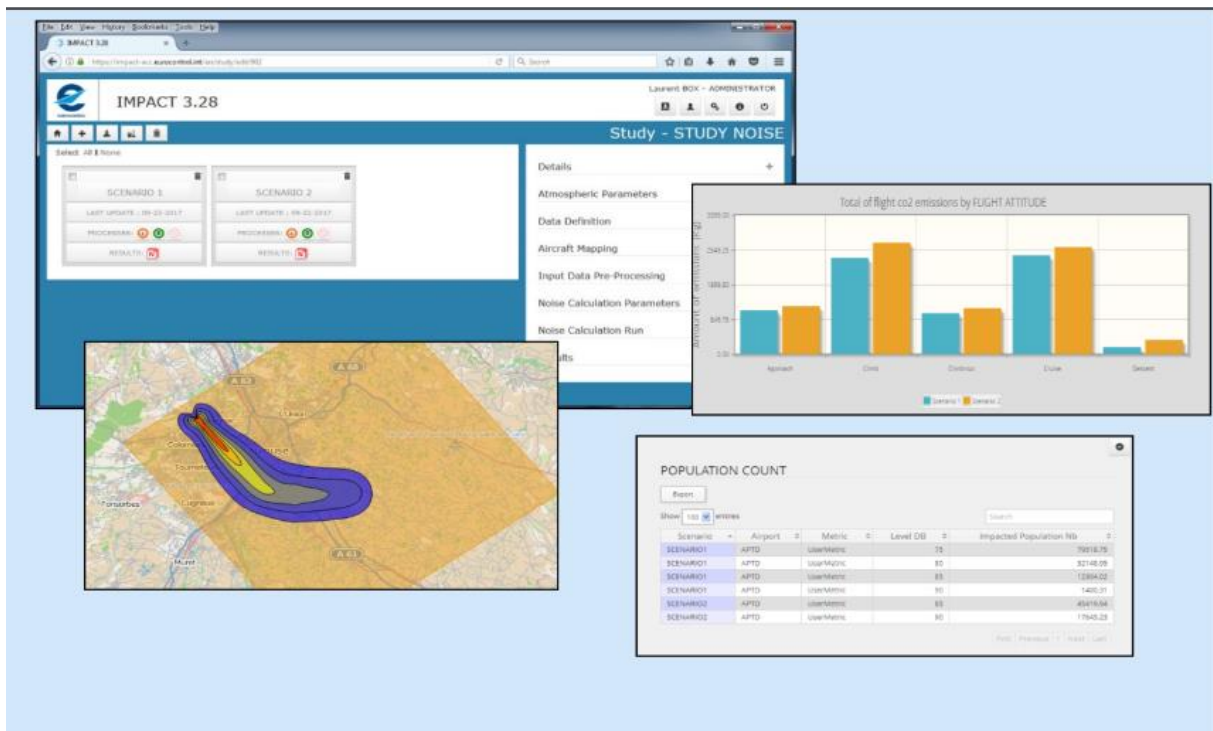
Slika 11 Mapa buke zrakoplova [23]

S druge strane postoji i „*Airport-to-airport*“ mod prikazan na Slici 12. Taj mod se odnosi na kompletne trajektorije letova, od jedne zračne luke do druge. Pošto se buka zrakoplova ne gleda za faze krstarenja, ovaj mod koristi samo BADA bazu podataka kako bi izračunao mase 25 plinova i emitera na svakom segmentu leta [23].



Slika 12 „*Airport-to-airport*“ mod [23]

Kombiniranjem ulaznih podataka sa već prisutnom bazom podataka IMPACT-ov kalkulator trajektorija računa emisije plinova i buke te omogućava trenutni prikaz izlaznih podataka, koji se može vidjeti na Slici 13.



Slika 13 Primjer IMPACT izlaznih podataka [23]

Slika 13. prikazuje primjer izgleda IMPACT izlaznih podataka. Na Slici se jasno mogu vidjeti 4 odvojena prozora.

Prvi prozor (gore - lijevo) prikazuje radnu površinu programa IMPACT. Radna površina se sastoji od 2 dijela. Prvi dio se nalazi na lijevoj strani, te se na njemu nalaze popis scenarija koji se analiziraju. U ovom slučaju su to 2 scenarija, kao što se može vidjeti na Slici 17. Drugi dio se nalazi na desnoj strani, te on služi za definiranje atmosferskih parametara leta, učitavanje ulaznih podataka i odabir korištenih baza podataka za analizu letova.

Drugi prozor (dolje – lijevo) prikazuje izračunatu mapu buke zrakoplova na području zračne luke. Kao što se vidi na Slici, mapa buke zrakoplova je geocentrirana sa položajem zračne luke na geografskoj karti. Mapa buke prikazuje površinu pod utjecajem buke zrakoplova prikazanu u različiti bojama, od kojih svaka prikazuje područje pod određenom razinom buke: crveno područje – 65 decibela (dB), žuto područje – 60 dB, plavo područje – 55 dB.

Treći prozor (dolje – desno) prikazuje broj ljudi izloženih pojedinoj razini buke. Ovaj broj se dobiva kombiniranjem mape buke zrakoplova i referentne mape gustoće populacije.

Četvrti prozor (gore – desno) prikazuje rezultate vezane za emisiju plinova. Na prozoru se vide stupčasti dijagrami različitih boja, od kojih svaka boja predstavlja emisije za pojedini scenarij. Ovaj prikaz rezultata će se dodatno objasniti u sljedećem poglavlju.

6. Izračun emisija na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT

IMPACT je moderni program za proračun zrakoplovnih emisija te će u ovom poglavlju biti prikazan postupak proračuna emisija prilaza i odlazaka na području Zračne luke Frankfurt pomoću IMPACT programa kao i analiza dobivenih rezultata.

6.1. Prikupljanje podataka

Prije korištenja IMPACT programa potrebno je definirati i pridobiti sve potrebne ulazne podatke koje će IMPACT procesirati.

Za analizu se uzimaju letovi na području Zračne luke Frankfurt. Zračna luka Frankfurt je najveća njemačka zračna luka što se tiče broja prevezenih putnika, te je time ujedno šesta najprometnija zračna luka u Europi i trinaesta u svijetu sa prosječno 1400 letova dnevno [24]

Zbog tako velikog broja letova za ovu analizu će se uzeti kratak vremenski interval, te će se analizirati emisije na području zračne luke u intervalu u trajanju od jednog sata. Vrijeme odabrano za analizu je interval od 7 do 8 sati ujutro 11.02.2022. godine u kojem je bilo 47 polijetanja i slijetanja. Promatraju se samo LTO segmenti, odnosno operacije na 3000ft i niže.

Podaci o Zračnoj luci Frankfurt su ujedno i prvi ulazni podaci koji se trebaju definirati. Potrebna su dva file-a koji opisuju zračnu luku: jedan koji opisuje zračnu luku, pod nazivom „*Airports*“, i drugi koji opisuje piste na zračnoj luci, pod nazivom „*Runways*“. Za ispisivanje ulaznih se u ovom slučaju koristio program *Notepad*. Primjer ispisa podataka za Zračnu luku Frankfurt prikazan je na Slici 14.

```
AIRPORTS;;;;;;  
APT_ID;REF_POINT_LAT;REF_POINT_LONG;ELEVATION_FT;RH%;TEMPERATURE_DEG_C;PRESSURE_HPA;H  
EADWIND_KT  
EDDF;50.038611;8.559722;360.9;64;12;1024;0  
|
```

Slika 14 Zračna luka Frankfurt - podaci za zračnu luku

Slika 14. prikazuje podatke o Zračnoj luci Frankfurt ispisane u 3 reda programa *Notepad*. Prvi red mora u svakom file-u koji se učitava obavještavati koju stavku taj file opisuje, na engleskom jeziku, kako bi program mogao prepoznati o kojoj stavci se radi. U ovom slučaju file opisuje karakteristike Zračne luke Frankfurt pa u prvom redu mora stajati „*Airports*“. Drugi i treći red se mogu vizualizirati kao tablica sa 2 reda i nekoliko stupaca. Drugi red se u svakom file-u sastoji od naziva vrijednosti koje trebaju biti opisane u sljedećim redovima. U ovom slučaju je samo još jedan red ispod jer se opisuje samo jedna zračna luka, međutim kada se opisuju cijeli letovi od jedne zračne luke do druge onda mora biti više redova u kojem svaki opisuje određenu zračnu luku. „Stupci“ sa podacima su odvojeni znakom „ ; “ te je bitno da svaki red sadrži isti broj tih znakova jer će inače program izbaciti *error* poruku. Što se tiče karakteristika koje je potrebno opisati u ovom file-u, s lijeva na desno to su:

- APT_ID – identifikacijski kod aerodroma
- REF_POINT_LAT – geografska širina aerodroma
- REF_POINT_LONG – geografska dužina aerodroma
- ELEVATION_FT – nadmorska visina aerodroma u ft
- RH% - relativna vlažnost
- TEMPERATURE_DEG_C – temperatura u °C
- PRESSURE_HPA – tlak u hPa
- HEADWIND_KT – čeonu vjetar u kt

Vidno je da je uz karakteristike zračne luke potrebno opisati i atmosferske uvjete na području zračne luke.

Zajedno sa file-om o zračnoj luci potrebno je učitati i file koji opisuje karakteristike uzletno-sletnih staza prisutnih na zračnoj luci. Primjer ispisa je prikazan na Slici 15.

```

|RUNWAYS;;;;;;
APT_ID;RWY_ID;START_LATITUDE;START_LONGITUDE;START_ELEV_FT;END_LATITUDE;END_LONGITUDE
;END_ELEV_FT;TO_THRESH_FT;LAND_THRESH_FT;CROSS_HEIGHT_FT
EDDF;25C;50.0451;8.5866;363.0;50.0316;8.5333;328.0;0;0;50
EDDF;7C;50.0316;8.5333;328.0;50.0451;8.5866;363.0;0;0;50
EDDF;25L;50.04000;8.5866;361.0;50.0275;8.5338;327.0;0;0;50
EDDF;7R;50.0275;8.5338;327.0;50.04000;8.5866;361.0;0;0;50
EDDF;25R;50.04555;8.5330;351.0;50.0369;8.4966;304.0;0;0;50
EDDF;7L;50.0369;8.4966;304.0;50.04555;8.5330;351.0;0;0;50
EDDF;18;50.0350;8.5261;325.9;49.9986;8.5261;316.0;0;0;50

```

Slika 15 Zračna luka Frankfurt - podaci o pistama

S obzirom da je na Zračnoj luci Frankfurt prisutno više uzletno - sletnih staza, tako je i na file-u prikazanom na Slici 15. prisutno više redova ispod drugog reda, od kojih svaki opisuje karakteristike jedne piste prisutne na zračnoj luci. Karakteristike koje se opisuju u ovom file-u s lijeva na desno su:

- APT_ID – identifikacijski kod aerodroma
- RWY_ID – identifikacija piste
- START_LATITUDE – geografska širina početka piste
- START_LONGITUDE – geografska dužina početka piste
- START_ELEV_FT – nadmorska visina početka piste u ft
- END_LATITUDE – geografska širina kraja piste
- END_LONGITUDE – geografska dužina kraja piste
- END_ELEV_FT – nadmorska visina kraja piste u ft
- TO_THRESH_FT – udaljenost praga za polijetanje od početka piste u ft
- LAND_THRESH_FT – udaljenost praga za slijetanje od početka piste u ft
- CROSS_HEIGHT_FT – visina zrakoplova kada pređe prag za slijetanje

Sljedeći ulazni podaci koje je potrebno prikupiti su podaci o letovima. Za svrhu ovog rada korištene su baze podataka *Traffic* i *OpenSky Network*, u kojima se može pomoću programa *Python* pristupiti podacima o povijesnim letovima. *OpenSky Network* je online baza podataka koja sadrži informacije o povijesnim letovima, ali i o aktivnom prometu, dok je *Traffic* baza podataka za zračni promet koja omogućuje pristup podacima iz *OpenSky Network*-a i korištenje u programu *Python*. Tim putem se može doći do informacija o putanji zrakoplova i visini leta, koji su potrebni za daljnje računanje emisija. Uz sve to još su potrebni podaci o tipu zrakoplova kako bi IMPACT mogao koristiti podatke iz BADA baze podataka i točno izračunati potrošnju goriva i emisije s obzirom na tip motora zrakoplova.

Ovi podaci se isto podijele u dva file-a: „operacije“ i „2D putanja“. File „operacije“ sadrži popis operacija koje se analiziraju zajedno sa tipom zrakoplova za pojedinu operaciju. Jedan red u file-u „operacije“ definira jednu ili više kretnji zrakoplova sa istim karakteristikama. Slika 16. prikazuje podatke za file „operacije“ za let DAL8WY.

```
OPERATIONS;;;;;;  
FLIGHT_ID;OP_TYPE;ACFT_ID;APT_ID;RWY_ID;TRK_ID;SUB_TRK_ID;PROFILE_ID;STAGE_LENGTH  
1;A;E195;EDDF;25L;APP38;0;DEFAULT;1
```

Slika 16 IMPACT file – operacije

Karakteristike koje su opisane u ovom file-u s lijeva na desno su

- FLIGHT_ID – identifikacijska oznaka leta (proizvoljno)
- OP_TYPE – tip operacije koji se provodi, može biti: A – za prilaze, D – za polijetanja, T – za „*Touch and Go*“ operacije i C – za kruženje na području aerodroma
- ACFT_ID – tip zrakoplova
- APT_ID – identifikacijski kod aerodroma
- RWY_ID – identifikacija piste
- TRK_ID – identifikacijska oznaka putanje
- SUB_TRK_ID – identifikacija pod-putanje
- PROFILE_ID – definiranje vertikalnog profila; može biti DEFAULT čime ga definira program IMPACT, ili može biti napravljen od strane korisnika
- STAGE_LENGTH – identifikator težine zrakoplova, ovisno o duljini putovanja

File „2D putanja“ sadrži skup koordinata koje opisuju putanju zrakoplova. Podaci o visini nisu potrebni za program, ali pošto *Python* program ispisuje podatke o cijelim letovima, podaci o visini su potrebni kako bi se mogli filtrirati podaci na 3000ft ili niže. Slika 17. prikazuje dio podataka za file „2D putanja“, također za let DAL8WY.

```
|2D_TRACKS;;;|  
APT_ID;RWY_ID;OP_TYPE;TRK_ID;SUB_TRK_ID;POINT_NUM;LATITUDE;LONGITUDE  
EDDF;25L;A;APP38;0;0;50.10081482;8.84262085  
EDDF;25L;A;APP38;0;1;50.10063171;8.841825786  
EDDF;25L;A;APP38;0;2;50.10040283;8.840802167  
EDDF;25L;A;APP38;0;3;50.10017007;8.839985615  
EDDF;25L;A;APP38;0;4;50.09994507;8.838934647  
EDDF;25L;A;APP38;0;5;50.09967041;8.837778192  
EDDF;25L;A;APP38;0;6;50.0994873;8.83691085  
EDDF;25L;A;APP38;0;7;50.0994873;8.83691085  
EDDF;25L;A;APP38;0;8;50.09895971;8.834863611  
EDDF;25L;A;APP38;0;9;50.09870911;8.833802876  
EDDF;25L;A;APP38;0;10;50.09858729;8.833230508  
EDDF;25L;A;APP38;0;11;50.09825134;8.831851357  
EDDF;25L;A;APP38;0;12;50.09812177;8.831300478  
EDDF;25L;A;APP38;0;13;50.09779358;8.82982756  
EDDF;25L;A;APP38;0;14;50.09756315;8.828925055  
EDDF;25L;A;APP38;0;15;50.09733582;8.827876041
```

Slika 17 IMPACT file - 2D putanja

Karakteristike koje su opisane u ovom file-u s lijeva na desno su:

- APT_ID – identifikacijski kod aerodroma
- RWY_ID – identifikacija piste

- OP_TYPE – tip operacije koji se provodi
- TRK_ID – identifikacijska oznaka putanje
- SUB_TRK_ID – identifikacija pod-putanje
- POINT_NUM - broj pozicije u redoslijedu operacija
- LATITUDE – geografska širina pozicije
- LONGITUDE – geografska dužina pozicije

Postoji još vrsti file-ova koji se mogu učitati u program, ali za svrhu provođenja mjerenja ovog rada navedeni file-ovi će biti dovoljni.

6.2. Proračun emisija

Nakon prikupljanja ulaznih podataka slijedi ubacivanje istih u program. Prije učitavanja prve skupine podataka potrebno je u programu odrediti baze podataka koje će se koristiti za računanje trajektorije. Valja spomenuti da je i tu moguće ubaciti ulazne podatke dobivene iz vanjskih izvora, međutim u ovom slučaju će se koristiti baze podataka IMPACT programa. Nakon što se odaberu baze podataka potrebno je u program učitati *zip-file* koji će u sebi sadržavati dva file-a koji opisuju zračnu luku i piste na zračnoj luci, u ovom slučaju podaci o Zračnoj luci Frankfurt. Nakon navedenih radnji se mogu početi raditi scenariji.

Scenariji su dijelovi programa gdje se obavljaju izračuni trajektorija letova, količina emisija i ostali proračuni u programu. Nakon stvaranja novog scenarija potrebno je odmah u scenarij učitati drugi *zip-file* koji sadržava dva file-a u sebi: „operacije“ i „2D putanja“. Program će prepoznati bilo kakve greške u učitanim file-ovima i dati povratnu informaciju točne pozicije i opis pogreške. Uspješnim učitavanjem ulaznih podataka u scenarij program postaje spreman za početak obrade podataka.

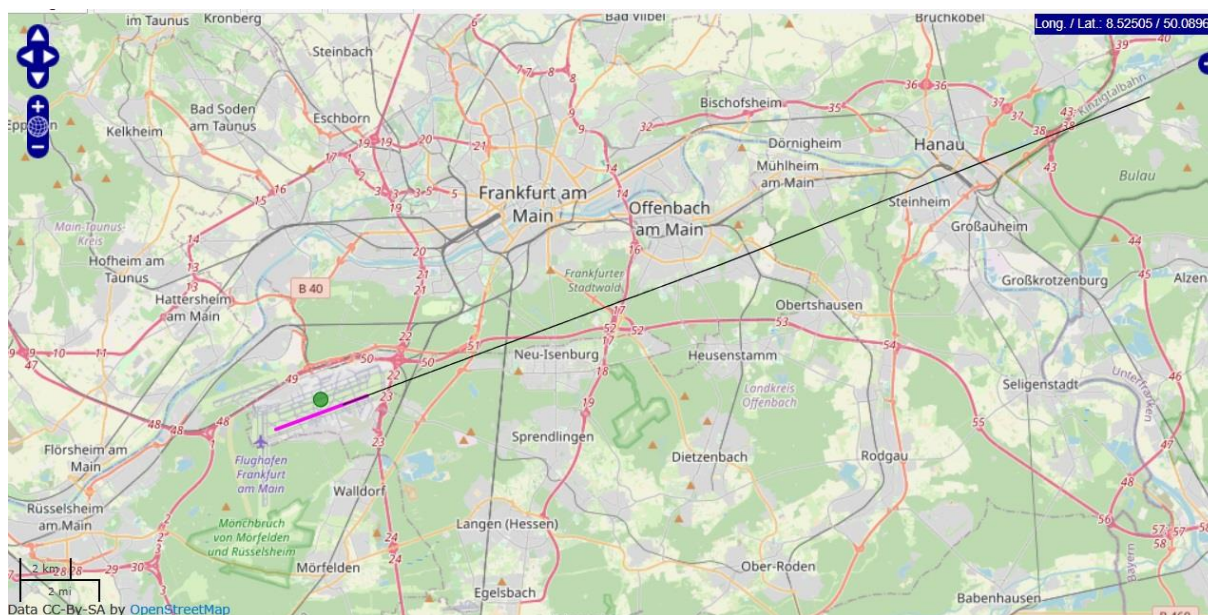
Prvi korak je naredba „*Aircraft mapping*“. Ovom naredbom IMPACT analizira ulazne podatke vezane za tipove zrakoplova kako bi uspješno povezo ulazne podatke sa svojom bazom podataka.

Sljedeći korak je stvaranje „*Common Input Data*“ (CID) naredbom „*Run CID*“. CID je struktura koja sadrži obrađene sve ulazne podatke. CID sadrži informacije o operacijama, zrakoplovima i zračnim lukama scenarija, kao što je prikazano na Slici 18., zajedno sa prikazom putanje svih obrađenih letova na geografskoj karti, što se nalazi pod „*global display*“.



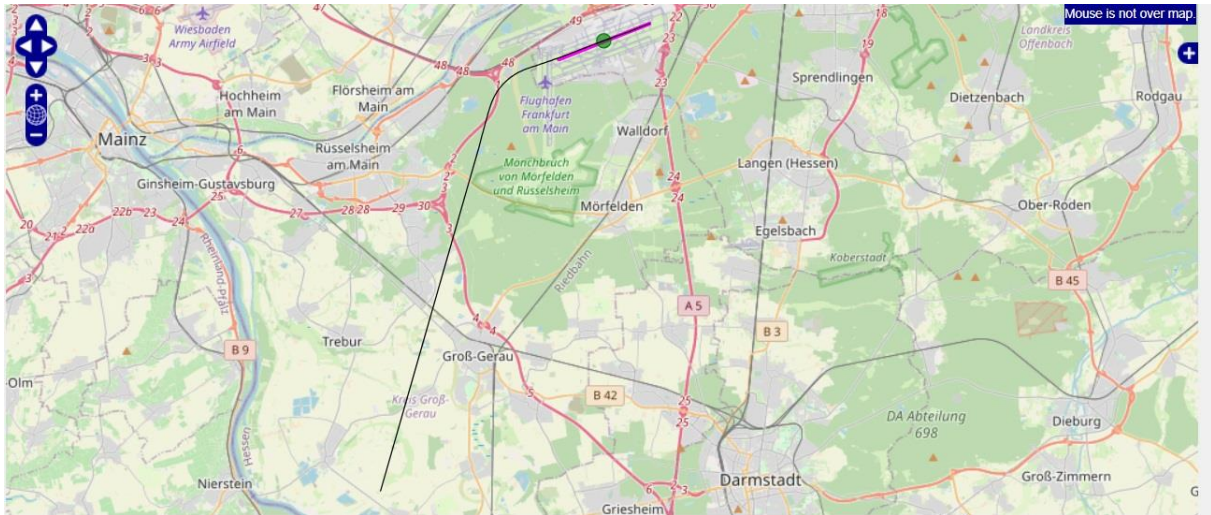
Slika 18 CID

„Global display“ će prikazati putanju leta koju je program IMPACT izračunao koristeći podatke učitane iz file-a „2D putanja“. Na Slici 19. se jasno može vidjeti prikaz putanje već spomenutog leta DAL8WY.



Slika 19 Putanja DAL8WY

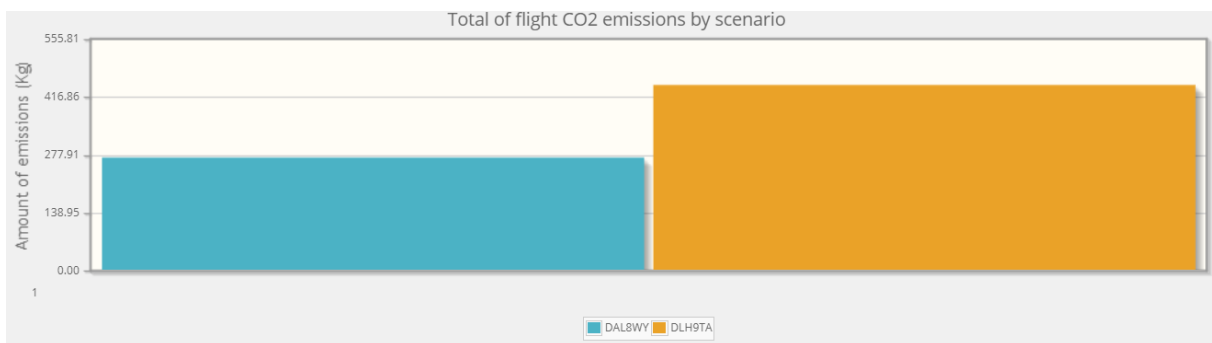
Na Slici 19. se mogu vidjeti svi podaci učitani u program, procesirani i koregistrirani sa geografskom kartom. Zeleni krug označava točku definiranu koordinatama zračne luke u file-u „Airports“, te se može vidjeti da se nalazi na području Zračne luke Frankfurt. Rozom bojom označena je pista opisana u file-u „Runways“, korištena u ovom scenariju za slijetanje zrakoplova. Kao što se vidi na Slici, korištena pista je 25L. Crna linija opisuje putanju zrakoplova od prve točke opisane u file-u „2D putanja“ do slijetanja. Na Slici 20. se vidi prikaz putanje leta DLH9TA, kao primjer prikaza putanja polijetanja zrakoplova.



Slika 20 Putanja DLH9TA

Kao što se vidi na Slici, iste boje prikazuju isti tip podataka, samo što je u ovom slučaju pista u uporabi bila 25C.

Bitno je napomenuti da slike 19. i 20. prikazuju 2 zasebna scenarija. Svaki scenarij se može sastojati od jednog ili više letova, te je moguće u jednom računanju računati više scenarija. Scenariji sadrže skup informacija zajedno učitanih i naknadno procesiranih. Rezultate jednog scenarija je moguće usporediti sa rezultatima drugog scenarija, međutim nije moguće usporediti rezultate pojedinih letova unutar scenarija. Primjer usporedbe rezultata je prikazan na Slici 21., za već spomenute letove DAL8WY i DLH9TA.

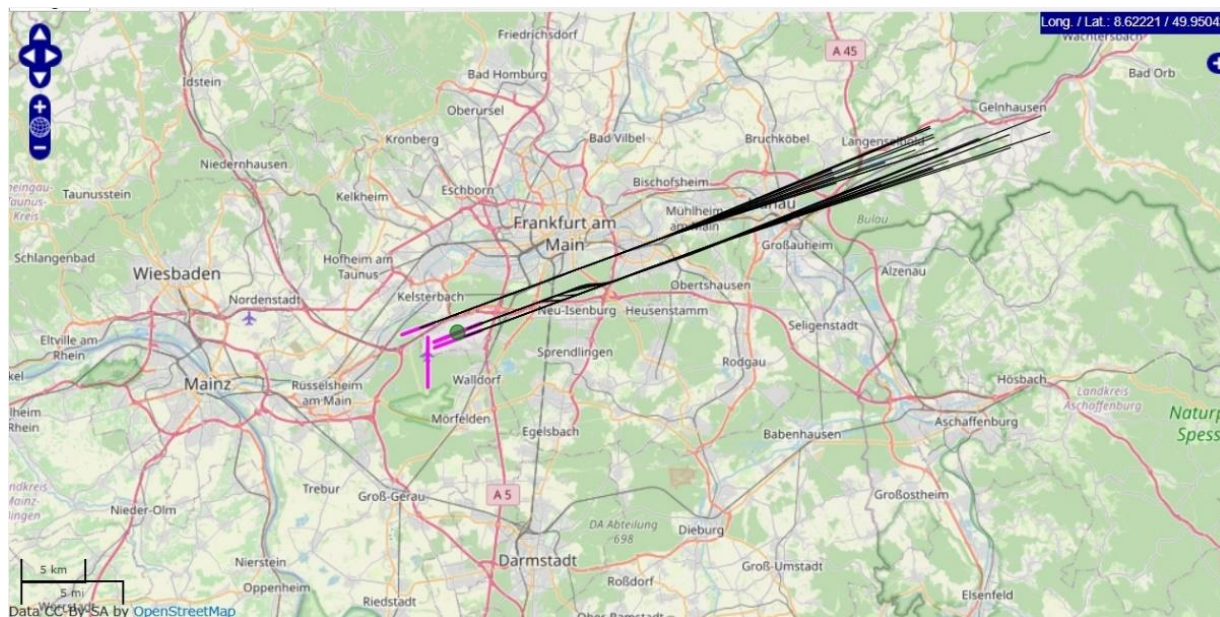


Slika 21 Usporedba rezultata DAL82Y i DLH9TA

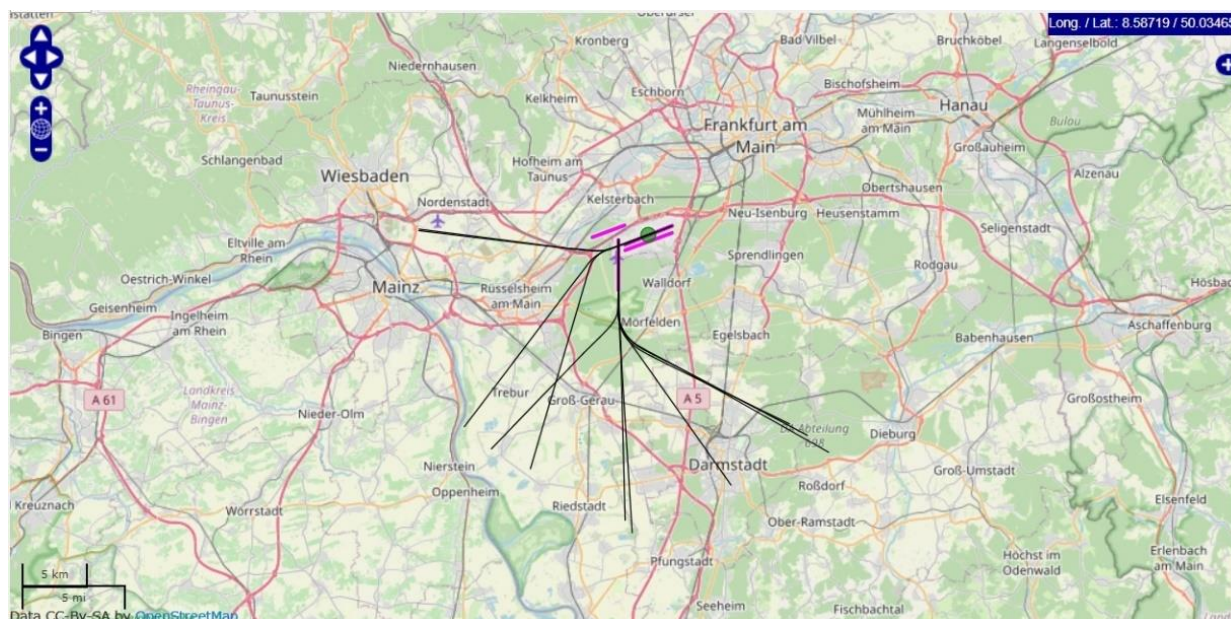
Rezultati prikazani na Slici 21. će biti objašnjeni u nastavku ovog rada.

Korisnik treba po potrebi procijeniti koliko je potrebno scenarija, ovisno o tome kakva mjerenja su u interesu korisnika U ovom radu će se prikazati emisije letova na području Zračne luke Frankfurt, međutim ujedno će se i usporediti pojedinačno emisije odlaznih i emisije dolaznih

letova. Prikaz analiziranih odlaznih letova je prikazan na Slici 22., a prikaz dolaznih na Slici 23.

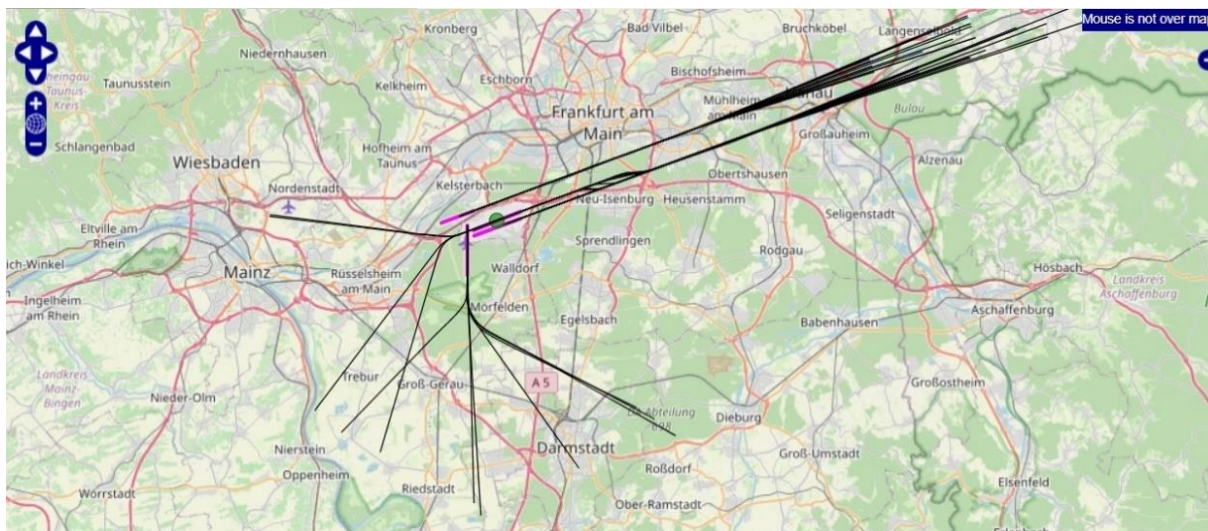


Slika 22 Dolasci na Zračnu luku Frankfurt



Slika 23 Odlasci sa Zračne luke Frankfurt

Zajednički Prikaz svih obrađenih odlaznih i dolaznih letova na Zračnoj luci Frankfurt prikazan na Slici 24.



Slika 24 Prikaz letova na području Zračne luke Frankfurt

Generiranjem CID završen je postupak obrade informacija i ,ako je sve u redu, slijedi računanje emisija.

Računanje emisija obavlja se odabirom željenih scenarija i odabirom naredbe „*Run emission module*“. Time se ulazi u red čekanja za računanje emisija, jer postoji mogućnost računanja emisija na više računala odjednom od kojih samo jedno može računati u isto vrijeme. Postoji mogućnost i modificiranja parametara za računanje emisija kao što su odabiri samo pojedinih pista, međutim u ovom slučaju parametri se nisu modificirali.

6.3. Analiza rezultata

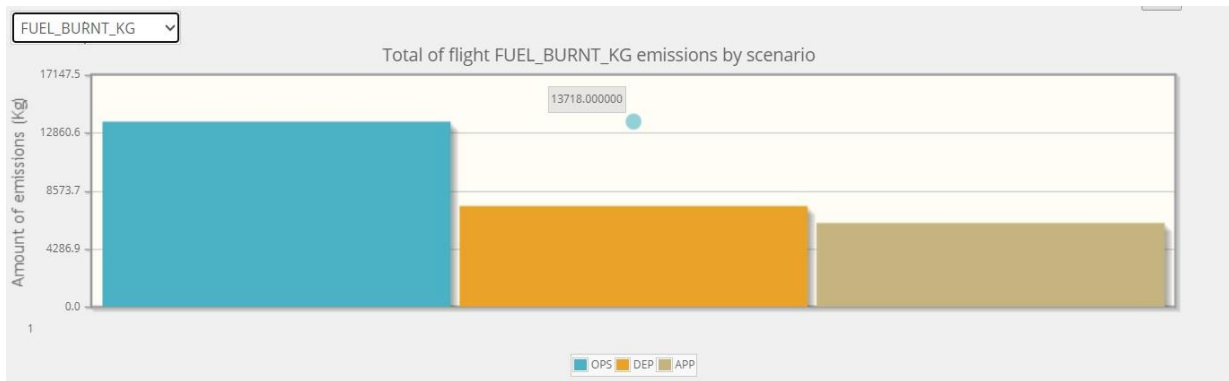
Završetkom računanja emisija u programu IMPACT dobiju se emisije 25 pojedinih plinova, kao što je već spomenuto u poglavlju 5, i potrošnja goriva za svaki scenarij.

Rezultate je moguće prikazati na IMPACT programu u obliku dvodimenzionalnog stupčastog dijagrama, gdje x os prikazuje količinu emitiranih plinova u kilogramima, a y os odabrane scenarije. Postoji mogućnost i preuzimanja rezultata i zapisa o procesu računanja emisija za daljnju analizu u drugim programima, međutim u ovom slučaju za prikaz emisija na zračnoj luci Frankfurt dovoljan je samo prikaz preko dijagrama na programu IMPACT. U nastavku će biti prikazani i opisani rezultati mjerenja emisija na području Zračne luke Frankfurt.

Za računanje emisija analizirano je i obrađeno 47 letova na području Zračne luke Frankfurt. Od 47 analiziranih letova 11 letova je odlazno, a 36 letova dolazno. Svi analizirani letovi su poletili

ili sletili na Zračnu luku Frankfurt 11.02.2022. u periodu od 07:00 do 08:00. Iako IMPACT ima mogućnost prikaza emisija 25 pojedinih plinova, analizirat će se rezultati 6 plinova navedenih u poglavlju broj 1.

Slika 25. prikazuje količinu izgorenog goriva navedenih letova.



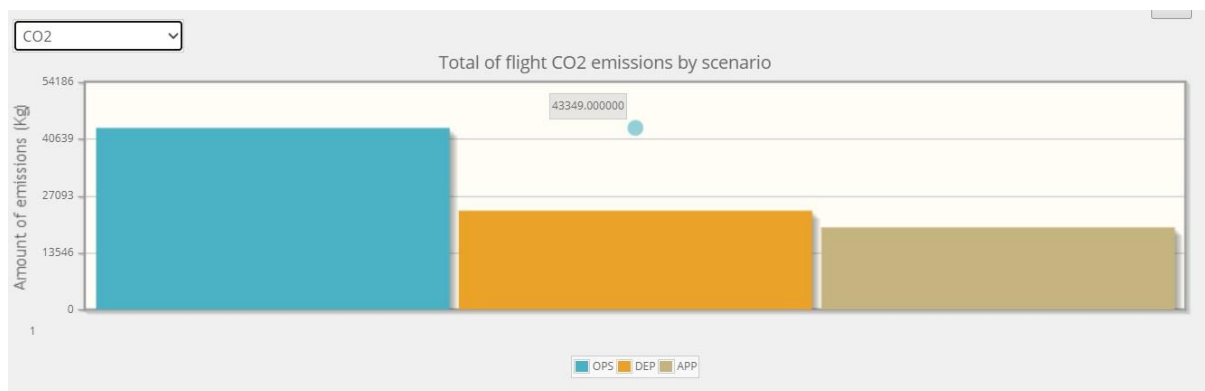
Slika 25 Količina izgorenog goriva

Na Slici 25. se vidi navedeni stupčasti dijagram koji prikazuje količinu izgorenog goriva izraženog u kg. Na Slici su prikazana 3 stupca različitih boja od kojih plavi stupac označava zajedničku količinu izgorenog goriva svih letova, narančasti stupac količinu izgorenog goriva letova u odlasku, a smeđi stupac količinu izgorenog goriva letova u dolasku. Iste boje će se koristiti za označivanje istih parametara u naknadnim prikazima.

Na Slici se vidi da je ukupna količina izgorenog goriva 13718 kg. Količina izgorenog goriva letova u odlasku iznosi 7488.6 kg, a letova u dolasku 6230.1 kg. Odmah se može primijetiti da zbroj količina izgorenog goriva odlaznih i dolaznih letova iznosi 13718.7 kg što je za 0.7 kg veće od prikazane ukupne količine izgorenog goriva. Iako program nije prikazao 100% podudaranost navedenih podataka, podudaranost je još uvijek na prihvatljivoj razini sa 99.99%. Ta razina podudaranosti se može očekivati u svim daljnjim rezultatima.

Također se može primijetiti da iako dolazni letovi zauzimaju 76.6% ukupne količine letova, njihov udio izgorenog goriva iznosi 45.6%. To ukazuje da zrakoplovi u odlasku troše više goriva od zrakoplova u dolasku, što je i očekivano zbog postavki potiska na slijetanju i polijetanju. Dijeljenjem količine izgorenog goriva u odlasku i polasku sa pripadajućim brojem letova dobije se prosječna količina izgorenog goriva po zrakoplovu, koja iznosi 680.78 kg za zrakoplove u odlasku i 173.06 kg po zrakoplovu za zrakoplove u dolasku.

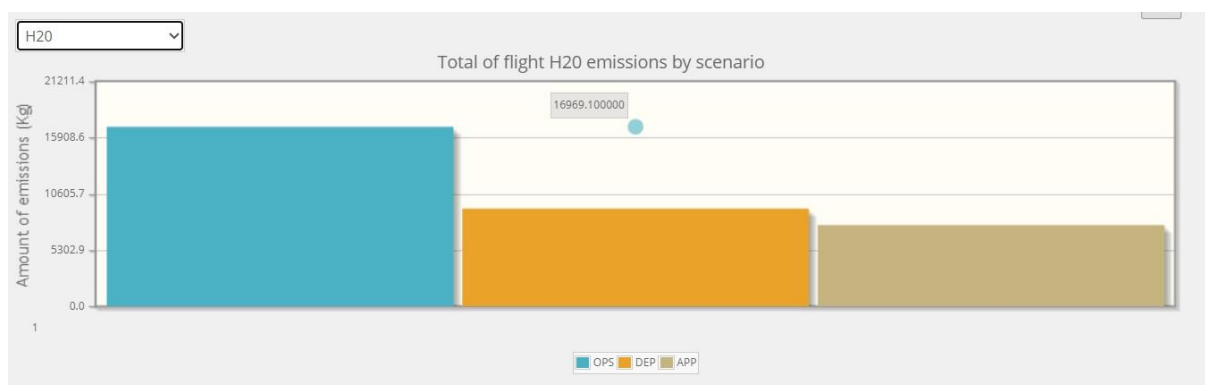
Nakon analize izgorenog goriva slijedi analiza emitiranih plinova. Prvi plin koji će biti analiziran je ugljikov dioksid (CO₂), a rezultati su prikazani na Slici 26.



Slika 26 Emisije ugljikovog dioksida

Kao što se vidi na Slici 26., ukupna količina emitiranog ugljikovog dioksida iznosi 43349 kg. Od toga 23664 kg je emitirano od zrakoplova u odlasku, što čini 54.6% ukupne količine, dok je s druge strane 19687 kg emitirano od zrakoplova u dolasku, što čini 45.4% ukupne količine. Opet se može primijetiti da je količina emitiranog ugljikovog dioksida po zrakoplovu u odlasku (2151.27 kg) veća od količine emitiranog ugljikovog dioksida po zrakoplovu u dolasku (546.86 kg), i to skoro 4 puta. To govori da količina emitiranog ugljikovog dioksida uvelike ovisi o postavkama potiska.

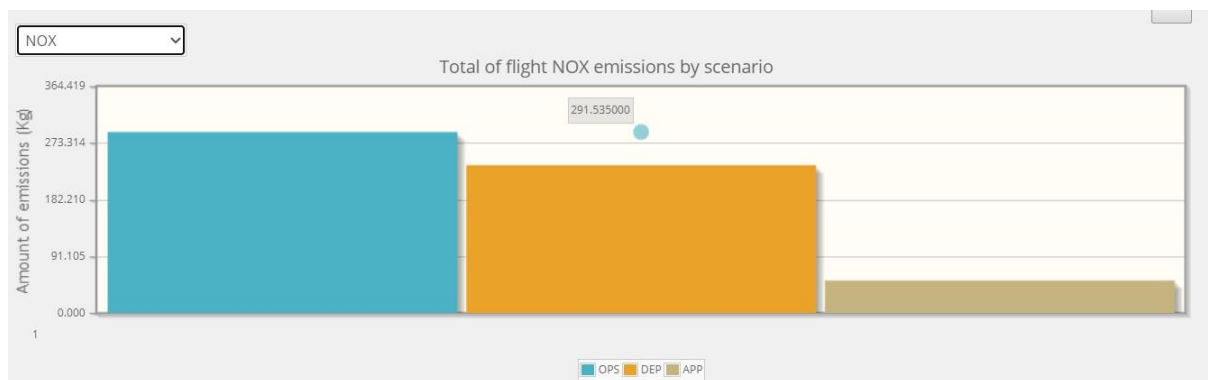
Sljedeći plin koji će se analizirati je vodena para (H₂O), a rezultati su prikazani na Slici 27.



Slika 27 Emisije vodene pare

Kao što se vidi na Slici 27., ukupna količina emitirane vodene pare iznosi 16969.1 kg, što je manje od polovice količine emisija ugljikovog dioksida. Od emitiranih 16969.1 kg, 9263.4 kg je emitirano od zrakoplova u odlasku (54.6%), a 7706.6 kg od zrakoplova u dolasku (45.4%).

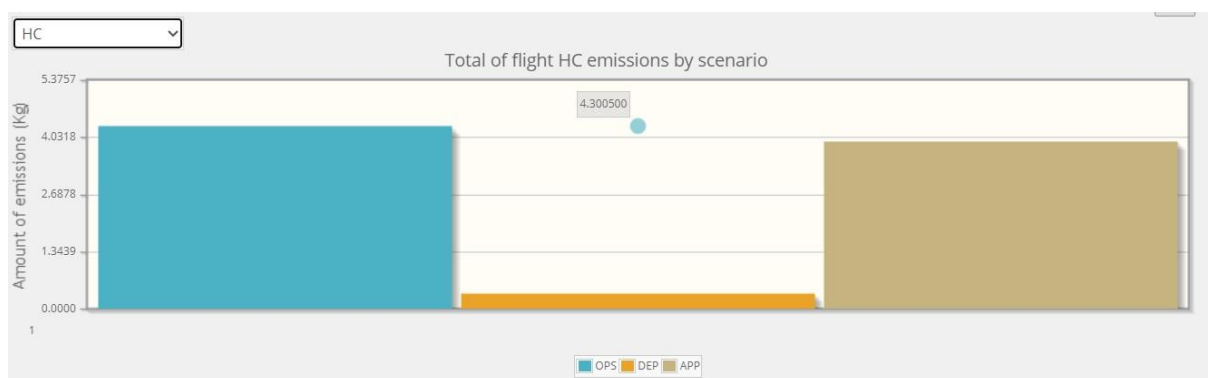
Sljedeći plinovi koji će se analizirati su ugljikovi oksidi (NO_x), a rezultati su prikazani na Slici 28.



Slika 28 Emisije dušikovih oksida

Kao što se vidi na Slici 28., ukupna količina emitiranih dušikovih oksida iznosi 291.535 kg što je puno manje od količine emitiranog ugljikovog dioksida. Količina emitiranih dušikovih oksida od zrakoplova u odlasku iznosi 238.309 kg (81.7%), a od zrakoplova u dolasku 53.099 kg (18.2%). Može se primijetiti da je postotak emitiranih dušikovih oksida odlaznih letova veći od prijašnjih postotaka, što ukazuje da emisije dušikovih oksida još više rastu sa povećanjem potiska.

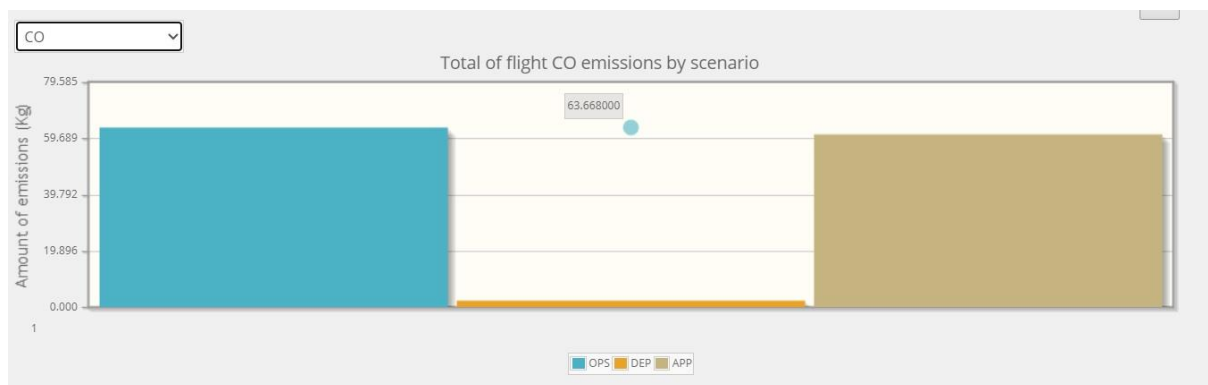
Sljedeći plinovi koji će se analizirati su ugljikovodici (HC), a rezultati su prikazani na Slici 29.



Slika 29 Emisije ugljikovodika

Na Slici 29. se vidi da je ukupna količina emitiranih ugljikovodika svega 4.3005 kg. Od ukupne količine, 0.3685 kg je emitirano od zrakoplova u odlasku (8.6%), a 3.9375 kg od zrakoplova u dolasku (91.4%). Može se primijetiti kako su postoci emitiranih ugljikovodika kod zrakoplova u odlasku manji od ostalih, što ukazuje da emisije ugljikovodika ne ovise o postavkama potiska.

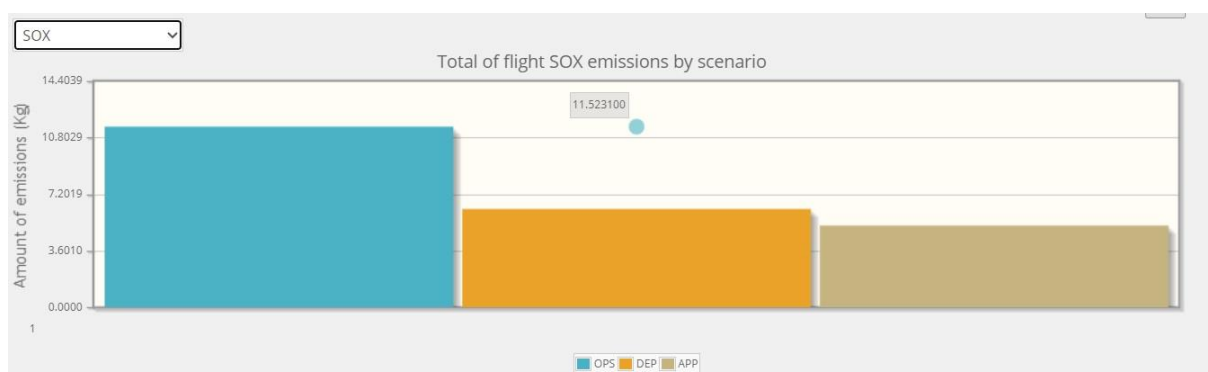
Sljedeći plin koji će se analizirati je ugljikov monoksid (CO), a rezultati su prikazani na Slici 30.



Slika 30 Emisije ugljikovog monoksida

Na Slici 30. se vidi da ukupna količina emitiranog ugljikovog monoksida iznosi 63.668 kg. Od toga samo 2.465 (3.9%) kg je emitirano od zrakoplova u odlasku, dok je od zrakoplova u dolasku emitirano 61.234 kg (96.1%).

Zadnji plinovi koji će se analizirati su sumporovi oksidi (SO_x), a rezultati su prikazani na Slici 31.



Slika 31 Emisije sumporovih oksida

Na Slici 31. se vidi da ukupna količina emitiranih sumporovih oksida iznosi 11.5231 kg. Od toga 6.2904 kg (54.6%) je emitirano od zrakoplova u odlasku, a 5.2333 kg (45.4%) od zrakoplova u dolasku.

Prikazani rezultati su samo dio rezultata koje program IMPACT može prikazati. Nakon prikupljanja i učitavanja potrebnih ulaznih podataka, programu IMPACT je potrebno svega nekoliko minuta da prikaže sve navedene rezultate i još 19 drugih emitera.

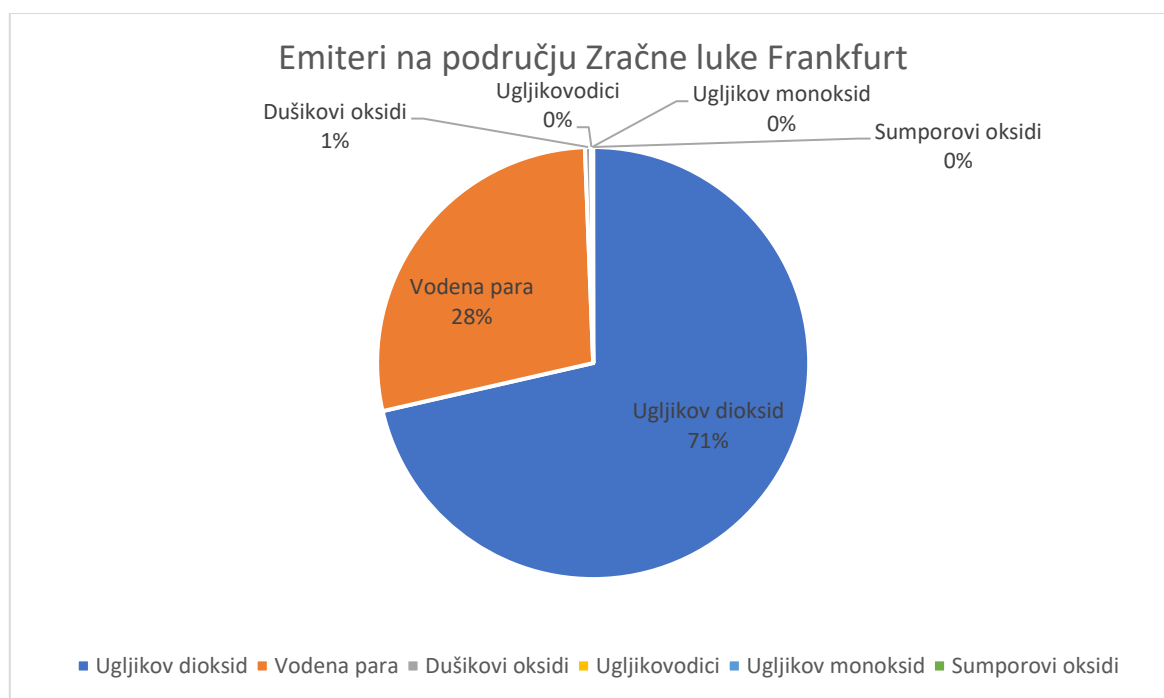
Tablica 4. prikazuje sve navedene rezultate mjerenja emisija u programu IMPACT.

Tablica 4 Rezultati mjerenja emisija na području Zračne luke Frankfurt

| | Ukupno (kg) | Odlasci (kg) | Dolasci (kg) | Odlasci (%) | Dolasci (%) | Po zrakoplovu u odlasku (kg) | Po zrakoplovu u dolasku (kg) |
|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Izgoreno gorivo | 13718 | 7488.6 | 6230.1 | 54.6 | 45.4 | 680.78 | 173.06 |
| CO ₂ | 43349 | 23664 | 19687 | 54.6 | 45.4 | 2151.27 | 546.86 |
| H ₂ O | 16969.1 | 9263.4 | 7706.6 | 54.6 | 45.4 | 842.13 | 214.07 |
| NO _x | 291.535 | 238.309 | 53.099 | 81.7 | 18.2 | 21.66 | 1.47 |
| HC | 4.3005 | 0.3685 | 3.9375 | 8.6 | 91.4 | 0.03 | 0.12 |
| CO | 63.668 | 2.465 | 61.234 | 3.9 | 96.1 | 0.22 | 1.7 |
| SO _x | 11.5231 | 6.2904 | 5.2333 | 54.6 | 45.4 | 0.57 | 0.15 |

U tablici 4. se može jasno vidjeti usporedba rezultata dobivenih mjerenjima u programu IMPACT. Može se primijetiti kako emisije plinova ovise o postavkama potiska. U fazi polijetanja, kada je postavka potiska 100%, puno se više emitiraju plinovi CO₂, H₂O i NO_x, dok je u fazi prilaska, pri postavkama potiska 30%, vidljivo veći postotak ugljikovog monoksida.

Graf 1. prikazuje udio pojedinih emitera u ukupnoj količini emisija.



Graf 1 Udio plinova na području Zračne luke Frankfurt

Na grafu 1. se može vidjeti da su emisije ugljikovog dioksida i vodene pare čine većinu postotka emisija analiziranih zrakoplova, od čega ugljikov dioksid čini 71%, a vodena para 28%, dok ostali plinovi zajedno čine svega 1%. Zbog tako velikog udjela je ugljikovog dioksid najvažniji emiter kada se analiziraju emisije zrakoplova.

7. Zaključak

Ispušni plinovi svih strojeva, pa tako i zrakoplova, su jedan od najvećih ekoloških problema i istraživanja modernog svijeta. Na svjetskoj razini cilj je smanjenje količina štetnih tvari. S obzirom da dolazi do sve većeg razvoja u zrakoplovstvu, tako u isto vrijeme dolazi do sve veće potrebe za reguliranjem emisija štetnih tvari u zrakoplovstvu. Međutim, kako bi se mogla poznavati i pratiti situacija što se tiče emisija plinova potrebni su adekvatni alati koji omogućuju što točniji prikaz emisija štetnih tvari. Tu bi se IMPACT mogao pokazati kao jako koristan alat.

IMPACT je relativno novi program proizveden od EUROCONTROL-a koji bi se mogao u budućnosti pokazati kao jako korisno sredstvo za brzo, jednostavno i točno računanje i praćenje emisija. Kao što je opisano u radu, rukovanje IMPACT programom je dosta jednostavno. Najteži dio zapravo predstavlja nabava adekvatnih ulaznih podataka koje program može kasnije procesirati. Velika prednost IMPACT-a je to što on može procesirati proizvoljne podatke koji ne moraju biti stvarni, odnosno postoji mogućnost stvaranja podataka za letove koji se nisu u stvarnosti dogodili. To ga čini jako dobrim programom za simulaciju utjecaja letova na okoliš. Također je, kao što je opisano u ovom radu, moguće računati emisije samo za određena područja, kao što je u ovom slučaju bila Zračna luka Frankfurt, bez potrebe za računanjem emisija cijelog leta.

Treba napomenuti da je program relativno nov, da nema još uvijek podatke o svim tipovima zrakoplova i da je potrebno još ažuriranja kako bi program bio na sasvim adekvatnoj razini, ali sa nastavkom rada i sve većim poboljšanjima IMPACT bi mogao u budućnosti postati glavni način provođenja izračuna emisija zrakoplova.

Literatura

- [1] IATA, »History - growth and development,« [Mrežno]. Available: <https://www.iata.org/en/about/history/history-growth-and-development/>. [Pokušaj pristupa 26. studeni 2023.].
- [2] ICAO, »The World of Air Transport in 2019,« 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx>. [Pokušaj pristupa 26. studeni 2023.].
- [3] AmSpec, »Do you know the different types of jet fuel?,« [Mrežno]. Available: <https://www.amspecgroup.com/news/types-of-jet-fuel/>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [4] »Jet Fuels JP-4 and JP-7,« [Mrežno]. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp76-c3.pdf>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [5] E. Bazijanac i A. Domitrović, *Zrakoplovni pogonski sustavi II, autorizirana predavanja*.
- [6] E. Bazijanac i A. Domitrović, *Emisije zrakoplovnih motora, autorizirana predavanja, Ver. 3 (2016/2017)*, Fakultet prometnih znanosti, 2017..
- [7] »Uzroci klimatskih promjena,« [Mrežno]. Available: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_hr. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [8] A. Džano-Boban, »Više kretanja - manje emisije CO₂,« [Mrežno]. Available: <https://www.zzjzdnz.hr/zdravlje/okolis-i-zdravlje/362>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [9] »Hrvatska Enciklopedija,« [Mrežno]. Available: <https://enciklopedija.hr/>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [10] »Ozone: What is it and why do we care about it?,« NASA, 30. Srpanj 1999.. [Mrežno]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Ozone/ozone.php>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [11] »Sulfur dioxide: found in volcanic eruptions and contrails,« Root Cause Advocates, [Mrežno]. Available: <https://www.rootcauseadvocates.com/sulfur-dioxide-volcanoes-contrails/>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [12] D. A., *Zrakoplovne emisije, autorizirana predavanja*.
- [13] ICAO, »ICAO Annex 16, Volume II, Aircraft Engine Emissions,« 2017..

- [14] ICAO, »Annex 16, Environmental Protection, Volume III - CO2 Certification Requirement,« 2017..
- [15] ICAO, »Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP),« [Mrežno]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/caep.aspx>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [16] U. Ziegler, R. A. Bionotto Dupont i T. K. Han, »ICAO Committee on Aviation Environmental Protection,« [Mrežno]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art6.pdf. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [17] N. novine, »Zakon o zračnom prometu,« 5. Kolovoz 2014.. [Mrežno]. Available: <https://www.zakon.hr/z/177/Zakon-o-zra%C4%8Dnom-prometu>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [18] »How We Calculate Emissions,« Flyetic, [Mrežno]. Available: <https://flyetic.com/sustainability/carbon-calculator>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [19] I. Petrin, D. Kučić i D. Fakleš, »Implementacija normative trgovanja emisijama stakleničkih plinova u komercijalnom zrakoplovstvu«.
- [20] A. Montlaur, L. Delgado i C. Trapote-Barreira, *Analytical Models for CO2 Emissions and Travel Time for Short-to-Medium-Haul Flights Considering Available Seats*, 2021..
- [21] EUROCONTROL, »Integrated aircraft noise and emissions modelling platform,« EUROCONTROL, [Mrežno]. Available: <https://www.eurocontrol.int/platform/integrated-aircraft-noise-and-emissions-modelling-platform>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [22] EUROCONTROL, »IMPACT - PBN Portal,« [Mrežno]. Available: <https://pbnportal.eu/epbn/main/PBN-Tools/IMPACT.html>. [Pokušaj pristupa 26. Studeni 2023.].
- [23] EUROCONTROL, »IMPACT User Guide,« 2020..
- [24] Fraport, »Frankfurt Airport Air Traffic Statistics 2022,« 2022..

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1 Konvencionalna komora izgaranja [5] | 4 |
| Slika 2 Produkti pri idealnom i stvarnom izgaranju [6] | 5 |
| Slika 3 Povećanje ozona u nižim slojevima atmosfere [10]..... | 7 |
| Slika 4 LTO ciklus [13] | 11 |
| Slika 5 Struktura CAEP-a [15]..... | 14 |
| Slika 6 CAEP odluke i razvoj [15] | 15 |
| Slika 7 Model za računanje emisija ugljikovog dioksida u odnosu na raspoložive sjedalo – kilometre [20]..... | 22 |
| Slika 8 Prikaz rezultata emisija ugljikovog dioksida po raspoloživim sjedalo - kilometrima [20] | 23 |
| Slika 9 IMPACT princip rada [23] | 25 |
| Slika 10 „Airport-Centric“ mod [23] | 26 |
| Slika 11 Mapa buke zrakoplova [23]..... | 27 |
| Slika 12 „Airport-to-airport“ mod [23] | 27 |
| Slika 13 Primjer IMPACT izlaznih podataka [23] | 28 |
| Slika 14 Zračna luka Frankfurt - podaci za zračnu luku | 30 |
| Slika 15 Zračna luka Frankfurt - podaci o pistama | 31 |
| Slika 16 IMPACT file – operacije | 32 |
| Slika 17 IMPACT file - 2D putanja..... | 33 |
| Slika 18 CID..... | 35 |
| Slika 19 Putanja DAL8WY | 35 |
| Slika 20 Putanja DLH9TA | 36 |
| Slika 21 Usporedba rezultata DAL82Y i DLH9TA | 36 |
| Slika 22 Dolasci na Zračnu luku Frankfurt | 37 |
| Slika 23 Odlasci sa Zračne luke Frankfurt | 37 |
| Slika 24 Prikaz letova na području Zračne luke Frankfurt..... | 38 |
| Slika 25 Količina izgorenog goriva..... | 39 |
| Slika 26 Emisije ugljikovog dioksida..... | 40 |
| Slika 27 Emisije vodene pare | 40 |
| Slika 28 Emisije dušikovih oksida | 41 |
| Slika 29 Emisije ugljikovodika | 41 |
| Slika 30 Emisije ugljikovog monoksida..... | 42 |
| Slika 31 Emisije sumporovih oksida..... | 42 |

Popis tablica

| | |
|--|----|
| Tablica 1 Postavke motora i vrijeme po fazama LTO ciklusa [13] | 12 |
| Tablica 2 Članovi CAEP – a [15] | 13 |
| Tablica 3 Emisijski faktori [12]..... | 19 |
| Tablica 4 Rezultati mjerenja emisija na području Zračne luke Frankfurt | 43 |

Popis grafova

Graf 1 Udio plinova na području Zračne luke Frankfurt 43

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 završnog/diplomskog rada pod naslovom _____ **Računanje emisija zrakoplovnih motora na području Zračne luke Frankfurt pomoću programa IMPACT** _____, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, __27. Studeni 2023.__

Marko Jurčić, 
(ime i prezime, _____)