Izračun emisije ugljičnog dioksida mlaznog motora po fazama leta

Barun, Simona

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:119:946616

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Simona Barun

IZRAČUN EMISIJE UGLJIČNOG DIOKSIDA MLAZNOGA MOTORA PO FAZAMA LETA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 25. svibnja 2021.

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

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6494

Pristupnik: **Simona Barun (0135237029)**
Studij: Aeronautika

Zadatak: **Izračun emisije ugljičnog dioksida mlaznog motora po fazama leta**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati utjecaj emisije ugljičnoga dioksida na atmosferu, te opisati kako zrakoplovne kompanije trguju emisijama.
Na temelju bilanse masa tijekom izgaranja goriva, izračunati emisiju ugljičnoga dioksida po fazama leta za izabrani zrakoplov s mlaznim motorom. Rezultate izračuna usporediti s izabranim dostupnim modelom koji se koristi u postupcima praćenja emisije ugljičnoga dioksida u zrakoplovnim kompanijama.
Na kraju je potrebno dati pregled mjera za smanjenje emisija ugljičnoga dioksida.

Mentor:

prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

IZRAČUN EMISIJE UGLJIČNOG DIOKSIDA MLAZNOGA MOTORA PO FAZAMA LETA

CALCULATION OF JET ENGINE CARBON DIOXIDE EMISSION BY FLIGHT STAGES

Mentor: prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Studentica: Simona Barun

JMBAG: 0135237029

Zagreb, 2021.

IZRAČUN EMISIJE UGLJIČNOG DIOKSIDA MLAZNOGA MOTORA PO FAZAMA LETA

SAŽETAK

Utjecaj štetnih plinova koji nastaju kao produkt izgaranja motora postaju sve veći problem za okoliš. Nastoji se spriječiti globalno zatopljenje, odnosno povećavanje temperature Zemlje od 2˚C u odnosu na predindustrijsku razinu. S povećanom ekološkom svjesnosti, uvode se razni sustavi na europskoj i globalnoj razini za smanjenje emisija štetnih plinova, a među njima i emisije ugljičnog dioksida. Izračunom emisije ugljičnog dioksida za svaku fazu leta koji je uzet za primjer nastoji se ukazati na potrošnju goriva po svakoj fazi leta te mogućim uštedama. Također su ukazane razlike između stvarnog i planiranog plana leta u potrošnji goriva i emisijama ugljičnog dioksida te razilke u ukupnim emisijama.

KLJUČNE RIJEČI: globalno zatopljenje, ugljični dioksid, faze leta, potrošnja goriva, stvarni i planirani plan leta

CALCULATION OF JET ENGINE CARBON DIOXIDE EMISSION BY FLIGHT STAGES

SUMMARY

The impact of harmful gases generated as a product of engine combustion create an increasing problem for the environment. The goal is to prevent global warming, that is, an increase in the Earth's temperature of 2˚C according to to the pre-industrial level. With increased environmental awareness, various systems are being introduced at European and global level to reduce harmful gas emissions, including carbon dioxide emissions. The calculation of carbon dioxide emissions for each phase of flight, taken as an example, seeks to indicate fuel consumption at each phase of flight and possible savings. Differences between the actual and initial flight plan in fuel consumption and carbon dioxide emissions are indicated, as well as differences in total emissions.

KEY WORDS: global warming, carbon dioxide, phases of flight, fuel consumption, actual and initial flight plan

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Utjecaj emisija ugljičnog dioksida i ostalih štetnih plinova na atmosferu 3
2.1. Ugljični (IV) dioksid (CO_2) 3
2.2. Ugljični (II) monoksid (CO) 4
2.3. Ugljikovodici (CH) 5
2.4. Dušikovi oksidi (NO_x) 6
2.5. Sumpor (IV) oksid 6
2.6. Spojevi s olovom 7
2.7. Čađa i dim 7
3. Trgovanje emisijama 9
3.1. Europski sustav trgovanja emisijama (EU ETS) 9
3.1.1. EU ETS Faza I 10
3.1.2. EU ETS Faza II 10
3.1.3. EU ETS Faza III 10
3.1.4. EU ETS Faza IV 11
3.1.5. Način djelovanja EU ETS 11
3.2. Međunarodni sustavi za trgovanje emisijama 12
3.2.1. Protokol iz Kyota 13
3.2.2. Pariški sporazum 14
3.3. ICAO CORSIA 15
4. Osnove izgaranja 18
4.1. Masena bilanca izgaranja 18
4.2. Goriva za mlazne motore 21
5. Izračun emisije ugljičnog dioksida po fazama leta 24
5.1. Taksiranje 24
5.2. Polijetanje i penjanje 27
5.2.1. Optimalno provođenje polijetanja i penjanja 27
5.2.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida u fazi polijetanja i penjanja zrakoplova 28

5.2.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva u polijetanju i penjanju zrakoplova 31
5.2.4. Usporedba stvarne i količine emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva za fazu polijetanja i penjanja 32
5.3. Krstarenje 33
5.3.1. Optimalno provođenje faze krstarenja 33
5.3.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida u fazi krstarenja zrakoplova 34
5.3.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva faze krstarenja 36
5.3.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u krstarenju 38
5.4. Snižavanje 38
5.4.1. Optimalno provođenje snižavanja 39
5.4.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida za fazu snižavanja 39
5.4.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja 42
5.4.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja 43
5.5. Prilaz i sijetanje 44
5.5.1. Optimalno provođenje faze prilaza i slijetanja 45
5.5.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida za faze prilaza i slijetanja 46
5.5.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja 48
5.5.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja 50
5.6. Izračun ukupnih emisija ugljičnog dioksida za let 50
6. Mjere za smanjenje emisija ugljičnog dioksida 58
6.1. Prilaz s kontinuiranim snižavanjem (Continuous Descent Approach) 58
6.2. Taksiranje pomoću jednog motora 59
6.3. Smanjena masa zrakoplova 60
6.3.1. Smanjenje mase praznog zrakoplova 60

6.3.2. Korištenje optimalnih rezervi goriva 62
6.4. Optimalna pozicija težišta zrakoplova 63
6.5. Korištenje manjih stupnjeva zakrilaca 64
6.6. Let na optimalnim visinama i s optmalnim brzinama 64
6.7. Propisno održavanje zrakoplova 65
6.7.1. Održavanje zrakoplovnih vrata 66
6.7.2. Održavanje upravljačkih površina 66
6.7.3. Nepravilnosti i oštećenja površine zrakoplova 66
6.7.4. Točnost zrakoplovnih instrumenata 66
7. Zaključak 67
Popis literature 70

1. Uvod

Rad se sastoji od 7 sljedećih poglavlja:

1. Uvod
2. Utjecaj emisija ugljičnog dioksida i ostalih štetnih plinova na atmosferu
3. Trgovanje emisijama
4. Osnove izgaranja
5. Izračun emisija ugljičnog dioksida po fazama leta
6. Mjere za smanjenje emisija ugljičnog dioksida
7. Zaključak

Kroz navedena poglavlja će biti objašnjena važnost stakleničkih plinova i uloga zrakoplovstva u emitiranju istih, kako zrakoplovstvo rješava problem emisija te nakon izračuna emisija ugljičnog dioksida za određeni let će biti navedeno par mjera u letu koje se mogu primjeniti za što manje emitiranja štetnih plinova u atmosferu po letu. Ukratko i detaljnije napisano o poglavljima slijedi.

Globalno zatopljenje je problem koji sve više raste unazad posljednjih stotinjak godina, a za što je velikom većinom zaslužan ljudski faktor. Radi efekta staklenika, odnosno selektivnim propuštanjem Sunčevog zračenja, prosječna temperatura Zemljine površine i donjih slojeva atmosfere postaje sve veća. Atmosfera propušta velik postotak vidljive Sunčeve svjetlosti koja zagrijava Zemlju, a dio te energije odbija natrag u atmosferu. Najznačajniji stakleнički plinovi su vodena para (H_2O), ugljični dioksid (CO_2), ugljikovodici (CH_x) i dušikovi oksidi (NO_x). Ostali poznati spojevi uz već navedene su: sumporovi oksidi (SO_x), čađa, ugljikov monoksid (CO), a svi se javljaju kao produkti izgaranja fosilnih goriva (značajno za ovaj rad zrakoplovnih goriva mlaznih motora), industrijskih procesa i uništavanja šuma. Prema podacima Europske agencije za okoliš, udio zrakoplovne industrije za količinu emisija stakleničkih plinova unutar EU iznosi oko 3%, a na svjetskoj razini iznosi oko 2%.

Kako je uočeno štetno djelovanje ugljičnog dioksida u atmosferi te je predviđen njegov daljnji negativan utjecaj na okoliš u budućnosti, razvili su se razni planovi i sustavi za smanjenje emisija CO_2 na Europskoj i međunarodnoj razini. Europski Parlament i Europsko Vijeće su 2003. godine uspostavili sustav dozvola emisija stakleničkih plinova i trgovanje emisijama unutar EU. Kroz četiri faze su proizveli sustav koji

funkcionira na način da unutar dozvoljene količine emisija kompanije mogu kupovati i prodavati svoje dozvole za emitiranje stakleničkih plinova prema vlastitoj potrebi, a svaka dozvola omogućuje pravo na emitiranje 1 tone CO_2. Kyotskim protokolom se na međunarodnoj razini omogućilo da se strogo prate, pregledavaju i provjeraju provedene trgovine emisija stranaka protokola. Pariški sporazum, koji vrijedi od 2020. godine, glavni je cilj zadržavanje porasta prosječne temperature na globalnoj razini koja je niža od 2˚C u odnosu na razine predindustrijskog doba.

U ovom radu su izračunate emsije CO_2 za svaku fazu leta koji je letio 7.8.2021. godine, a letio je rutom Zagreb-Dubrovnik. Uz dobiveni plan leta na kojem su izračuni za planiranu potrošnju goriva te vremena dolaska na točke rute itd., dobiveni su i pilotski izračuni za stvarne potrošnje goriva i dolasci na točke i ostalo. Kako to obično biva, planirani i stvarni plan leta se u mnogim stvarima razlikuju pa je napravljena zanimljiva usporedba. Prema određenim fazama leta su podijeljene potrošnje goriva prema kojima su izračunate emisije ugljičnog dioksida za svaku od tih faza, a na kraju je izračunata i ukupna količina emisija CO_2 za cijeli let koji je uspoređen s podacima dobivenim iz programa NEST, sve za planiranu i stvarnu potrošnju goriva za isti let. U zaključku rada će se obaviti krajnja usporedba emisija ugljičnog dioksida za sve faze (planirane i stvarne potrošnje goriva) te će se analizirati mogući razlozi razilka u izračunima. Na kraju rada su dane moguće mjere i procedure za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

2. Utjecaj emisija ugljičnog dioksida i ostalih štetnih plinova na atmosferu

Zrak je mješavina u kojoj se nalazi udio od 78% dušika (N_2), 21% kisika (O_2) te preostalih 1% čine ugljični dioksid (CO_2) i ugljični oksid (CO), plemeniti plinovi, dušikovi oksidi (NO_x), vodik (H_2) i ugljikovodici (CH) te čađa, dimne čestice i vodena para. Početkom industrijalizacije, uporabom fosilnih goriva u prometu i ostalim ljudskim utjecajima koncetracija spomenutog udijela ugljičnog dioksida se povećava (kao i udio ostalih štetnih plinova) te tako narušava kemijski sastav atmosfere, odnosno dolazi do onečišćenja zraka. Na temelju Zakona kojeg je donijela Vlada Republike Hrvatske 1996. godine o zaštiti zraka (NN 48/95) kao i Uredbu o preporučenim i graničnim vrijednostima kakvoće zraka, određuju se ograničene količine štetnih tvari za atmosferski zrak.

2.1. Ugljični (IV) dioksid (CO_2)

Ugljični dioksid ili ugljikov (IV) oksid je plin koji se u maloj koncentraciji nalazi u Zemljinoj atmosferi, a nastaje kao produkt staničnog disanja i prilikom izgaranja prem reakciji:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

Većina proizvedenog CO_2 ostaje u atmosferi, a jedan dio se otapa u vodi i taloži u vegetaciji. Tijekom dugih geoloških razdoblja se CO_2 iz atmosfere nastanjivao u ljušture morskih organizama i stijene kao magnezijev (Mg_2CO_3) te kalcijev karbonat ($CaCO_3$). Fotosintetski organizmi su za stvaranje organskih tvari i kisika uveliko doprinjeli smanjenju CO_2 iz atmosfere.

Današnja količina CO_2 u atmosferi je oko 0,036 % volumnog udjela (360 ppm) te konstantno raste. Ne poduzimajući ništa, onečišćavanje ugljičnim dioksidom bi ubrzo moglo porasti na 660 ppm što bi prouzročilo povišenje prosječne globalne temperature za oko 2 ˚C. Na polarnim područjima bi se otapao led i došlo bi do porasta razine mora, a mnoga obalna područja bi bila potopljena [1].

Izračunato je da se procesima izgaranja fosilnih goriva u atmosferu godišnje ispusti oko 10 milijardi tona CO_2. Prema navedenome, ugljični dioksid je bez sumnje jedan od važnijih stakleničkih plinova te njegovim povećanim udjelom u atmosferi dolazi do stakleničkog efekta. Posljedice veće koncentracije ugljičnog dioksida u sastavu atmosferskog zraka su:

- povećanje prosječne temperature na Zemljinoj površini
- povećanje temperatura oceana i povećanje razina soli u njima, uslijed čega se mijenjaju uvjeti života u oceanima
- širenje površina pustinja, a smanjenje površine šuma
- otapanje glečera
- potencijalnu opasnost porasta površine mora u sljedećih 50 godina
- smanjenje snježnog pokrivača u sjevernim dijelovima (u 40 godina u prosjeku za 10 cm godišnje)
- povećanu učestalost padalina
- povećanu učestalost prirodnih nepogoda (uragani, tajfuni, suše, poplave i dr.)

Ugljični dioksid nije otrovan, ali može izazvati određene simptome poput pospanosti i gavobolje ukoliko mu se izlaže u većim količinama, a smanjena je količina okolnog kisika [2].

2.2. Ugljični (II) monoksid (CO)

Ugljični oksid je izrazito otrovan plin bez boje i mirisa. Jače se veže za hemoglobin u krvi od samog kisika čime otežava njegovo vezanje na to isto mjesto, a već male koncentracije CO u krvi izazivaju teže disanje, glavobolje i trovanje te naposlijetku gubitak svijesti i smrt. Njegov utjecaj na okoliš također nije zanemariv budući da njegovom reakcijom s kisikom iz atmosfere nastaje CO_2 i doprinosi prethodno navedenim problemima. Nastaje kao produkt nepotpunog izgaranja ugljika zbog nedovoljne količine kisika koja je potrebna za njegovo izgaranje. Takav proces se odvija najčešće pri izgaranju bogate smjese te umjesto ugljičnog dioksida nastaje ugljični oksid:

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

Međutim, velika količina (oko 83%) od ukupno oslobođenog CO je prirodnog podrijetla. Nastaje oksidacijom metana oslobođenog razgradnjom uginulih organizama. Globalno se količina CO ne povećava jer se većinom različitim postupcima pretvara u CO_2 [1].

2.3. Ugljikovodici (CH)

Ugljikovodici su, kao što im ime govori, spojevi ugljika i vodika. Ovisno o njihovoj građi, postoje zasićeni (alkani) i nezasićeni ugljikovodici (alkeni, alkini i aromatski ugljikovodici). Za okoliš posebno značenje imaju zasićeni CH: metan (CH_4), etan (C_2H_6), propan (C_3H_8) i butan (C_4H_{10}).

Metan je plin bez boje, okusa i mirisa, a jedan je od 5 najrasprostranjenijih plinova u atmosferi. Oko 85% se nalazi u prirodi kao plin, a ostatak nastaje razgradnjom organskih tvari. Lako je zapaljiv, a eksplozivan u smjesi sa zrakom kao i ostali alkani. Glavni izvor onečišćenja metanom jesu rafinerije, prerada nafte te izgaranje fosilnih goriva u domaćinstvima i prometu. Trenutačna koncentracija metana je oko 2 ppm s tendencijom porasta od 1% godišnje te doprinosi učinku staklenika.

Nezasićeni CH imaju dvostruku ili trostruku nezasićenu vezu. Etilen (C_2H_4) ili eten se dobiva rafiniranjem nafte, može se prevesti u etilenglikol (antifriz) i sredstvo za dozrijevanje voća i povrća. Etilen štetno djeluje na listove biljaka, a etilenglikol je smrtonosan za čovjeka za veće koncentracije. Acetilen (C_2H_2) je bezbojan i vrlo eksplozivan plin pri čemu se raspada na elemente, a otapa se u acetonu.

Aromatski ugljikovodici su dobili taj naziv zbog karakteističnih mirisa spojeva iz te skupine. Benzen (C_6H_6) je najpoznatiji aromatski ugljikovodik. Mogu biti spojeni s 2 ili više prstenova. Sdva prstenova su naftaleni, s 3 antraceni te fenantreni. Benzen se najčešće koristi u kemijskoj industriji kao sirovina. Može se apsorbirati u tijelo kao benzenska para kroz pluća u krvotok [1].

Ugljikovodici su također produkt nepotpunog izgaranja. Sastavni su dio svakog goriva te bi u teoriji trebali u potpunosti izgorjeti, međutim, to se u stvarnosti nikada ne dogodi. Rezultat je određena količina ugljikovodika u ispušnom plinu motornih vozila. Najmanja koncentracija CH se postiže u siromašnoj smjesi goriva, a što je smjesa bogatija to je i veća koncentracija CH. Pare ugljikovodika djeluju na središnji živčani sustav poput narkotika, a ako pri izgaranju ne oksidiraju, nastaju razni aromatski spojevi koji su toksični (npr. benzen). Također može uzrokovati razne tumore kao i rak krvi i kostiju.

2.4. Dušikovi oksidi (NO_x)

Dušik (N_2) je plin bez okusa i mirisa, njegov udio u zraku iznosi 78,1% te je bitan kao biogeni element u smislu što je sastavni dio građe aminokiselina koje se dalje ugrađuju u bjelančevine, DNK i RNK te građu klorofila. Elementarni dušik je vrlo inertan i može oksidirati pri visokim temperaturama.

Dušikovi oksidi, najpoznatiji dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO_2), nastaju izgaranjem pri visokim temperaturama kao sporedni produkti te su značajni aeroonečišćivači. Također mogu nastati izgaranjem ugljena, drva, loživog ulja itd. u domaćinstvima te pri proizvodnji nitratne kiseline, boja, mineralnih gnojiva kao i izgaranjem duhana pušača. Još je vrijedno spomenuti ostale spojeve s dušikom koji nisu toliko zastupljeni u atmosferi, ali su pojedinačno prilično reaktivni: dušikov suboksid (N_2O), dušikov trioksid (N_2O_3), dušikov tetraoksid (N_2O_4) te dušikov pentoksid (N_2O_5) [1].

Najveća koncentracija NO_x je u području blago siromašne smjese goriva, dok u području bogate ili siromašne smjese koncentracija opada. Prvi u procesu izgaranja nastaje NO, a zatim njegovom oksidacijom nastaje NO_2. On brzo prodire u pluća gdje se veže na molekulu hemoglobin, izaziva plavilo kože te otežava funkcije dišnog sustava i smanjuje otpornost na infekcije. Dušikovi oksidi su jako opasni zato što i u smrtonosnim dozama ne izazivaju jake simptome (jedine naznake bi mogle biti suzenje očiju i nosa te kašalj).

Tendencija porasta koncentracije dušikovih oksida je zabrinjavajuća jer je u zadnjem desetljeću prosječna kocentracija NO porasla s otprilike 0,001 ppm na 1 do 2,5 ppm u gradskim i industrijskim središtima, dok je koncentracija NO_2 porasla s otprilike 0,002 na 1,5-2,5 ppm. Dušikovi oksidi su uz sumporne okside odgovorni za kisele kiše jer u reakciji s vodom stvaraju jake kiseline. U sljedećim jednadžbama je prikazan nastanak nitratne (HNO_3) i nitritne (HNO_2) kiseline reakcijom NO_2 i vode iz okoline:

$$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO$$

$$NO + NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_2$$

2.5. Sumpor (IV) oksid

Sumpor (S_8) u prirodi dolazi u elementarnom stanju i u obliku spojeva, prisutan je u svim živim organizmima. Sumpor (IV) oksid ili sumporov dioksid (SO_2) nastaje izgaranjem sumpora u fosilnim gorivma te

se nalazi u deset puta većoj koncentraciji kod dizelskih motora u odnosu na benzinske motore zbog povećane koncentracije sumpora u dizelskom gorivu. Nastanak sumporovog dioksida se odvija na sljedeći način:

$$S_8 + 8O_2 \rightarrow 8SO_2$$

Prirodni izvori sumporovog dioksida čine četvrtinu sveukupnog njegovog onečišćenja atmosfere, a nalaze se u tlu, moru i oceanima gdje se SO_2 stvara anaerobno respiracijom bakterija te erupcijom vulkana. SO_2 značajno onečišćuje atmosferu, a dolazi u povećanim koncentracijama kao sastojak zraka u gradskim i industrijskim središtima. Nataloženi sulfati u obliku sitnih čestica su vrlo štetni za čovjeka jer njihovim udisanjem ulaze u pluća i ne mogu se iskašljati. Najveća opasnost sumporovog (IV) oksida je ipak njegova oksidacija u atmosferi, koja u kontaktu s vodom prelazi u sumporastu (H_2SO_3) kiselinu, a sumporov (VI) oksid u rekaciji s vodom prelazi u sumpornu (H_2SO_4) kiselinu.

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

2.6. Spojevi s olovom

Olovo i razni spojevi s olovom se dodaju u benzinsko gorivo kako bi se poboljšala otpornost na detonacije. Radom motora se oslobađaju oksidi olova koji onečišćuju okoliš jer se zadržavaju u prizemnim slojevima zraka. Olovo i njegovi spojevi je jako toksično, a najviše su osjetljivi na njega mala djeca i anemične osobe. Da bi se umanjila koncentracija olova i njegovih spojeva uvode se bezolovni benzini i alternativna goriva.

2.7. Čađa i dim

Čađa i dimne čestice nastaju kao produkt izgaranja dizelskih motora. Čađa je filtrat ispušnih plinova koji se sastoji od čestica ugljika, a nastaje uz nedostatak kisika i visoku temperaturu zbog nepotpunog miješanja goriva i zraka. Ugljikovi spojevi sami po sebi nisu štetni, ali se na njih vežu razne toksične tvari. Dimne čestice (koksne čestice) nastaju kao posljedica izdvajanja čvrstog ugljika u procesu izgaranja u uvjetima jako

nedostatka kisika (kada je $\lambda<0,33$). Kod mlaznih motora oko kapljice goriva se nalaze zone s malim koeficijentom viška zraka koje su izložene visokim temperaturama što pogoduje dehidrogenezaciji molekula ugljikovodika i izdvajanje koksnih čestica [3]. Zaključno, nastanak čađe problem je miješanja goriva i zraka. Kao rješenje su došle nove generacije motora, odnosno nove komore za izgaranje koje koriste već pomiješanu i isparenu smjesu goriva i zraka (eng. LPP - *Lean, Premixed, Prevaporized*).

3. Trgovanje emisijama

Atmosferska koncentracija ugljičnog dioksida se drastično povećala s industrijalizacijom što govori činjenica povećane vrijednosti CO_2 s 280 na 379 ppm (*parts per million*) od 1750.-ih godina do 2005. godine. Pokretom industrije do današnjih modernih vremena porast koncentracije ugljičnog dioksida iznosi čak 100 ppm dok je količina CO_2 u atmosferi 8000 godina prije industrijalizacije porasla samo za 20 ppm putem prirodnih procesa. Ukupna koncentracija svih stakleničkih plinova je dosegla 457 ppm u 2018. godini prema zadnjim podacima Europske agencije za okoliš (*European Environment Agency*- EEA) [4].

U prošlom stoljeću je uočeno štetno djelovanje viška koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi te uz predviđanja daljnjih negativnih scenarija njegovog utjecaja na okoliš, prepoznata je potreba za smanjenjem emisija CO_2 na međunarodnoj razini.

3.1. Europski sustav trgovanja emisijama (EU ETS)

Europska Unija je prepoznala problem utjecaja povećane količine ugljičnog dioksida na okoliš te je 13. listopada 2003. godine uspostavila sustav dozvola emisija stakleničkih plinova i trgovanje emisijama unutar EU. Sustav trgovanja emisijama (*European Emission Trading System*- EU ETS) su uspostavili Europski Parlament i Europsko Vijeće kroz direktivu 2003/87/EC. Cilj direktive je smanjiti emisije stakleničkih plinova na razine koje znanost smatra potrebnima kako bi se izbjegla klimatska promjena. EU ETS pokriva otprilike 11000 elektrana i proizvodnih pogona u 28 članica Europske Unije uključujući i Island, Lihtenštajn i Norvešku te zrakoplovne aktivnosti u tim državama. U konačnici, EU ETS regulira oko 45% ukupnih emisija stakleničkih plinova u Europskoj Uniji. Razvoj EU ETS-a se odvija u 4 faze, a trenutačno se nalazimo u 4. fazi koja traje do 2030. godine [5].

3.1.1. EU ETS Faza I

Faza I se odvija od 2005. do 2007. godine s prilagodbama i upoznavanjem novonastalog sustava. Budući da sustav još nije bio dobro razvijen, ponuda dozvola emisija je bila veća nego njihova potražanja što je rezultiralo viškom dozvola. Kao posljedica viška dozvola, njhova je vrijednost pala na nulu u 2007. godini. Izuzev toga, EU ETS je tada bio najveći sustav za trgovanje ugljikom na svijetu.

3.1.2. EU ETS Faza II

Faza II je trajala od 2008. do 2012. godine. Island, Lihtenštajn i Norveška se priključuju sustavu trgovanja emisijama 1.1.2008. Prepoznata je potreba uključivanja zračnog prijevoza u sustav trgovanja emisijama, tako da je direktiva nadopunjena 19. studenog 2008., a avijacija je napokon ušla u sustav 1.1.2012. godine. Broj dozvola je smanjen za 6.5% u tom razdoblju, ali budući da svijet zadesila gospodarska kriza, potražnja je ponovno smanjena i dozvola ima viška.

3.1.3. EU ETS Faza III

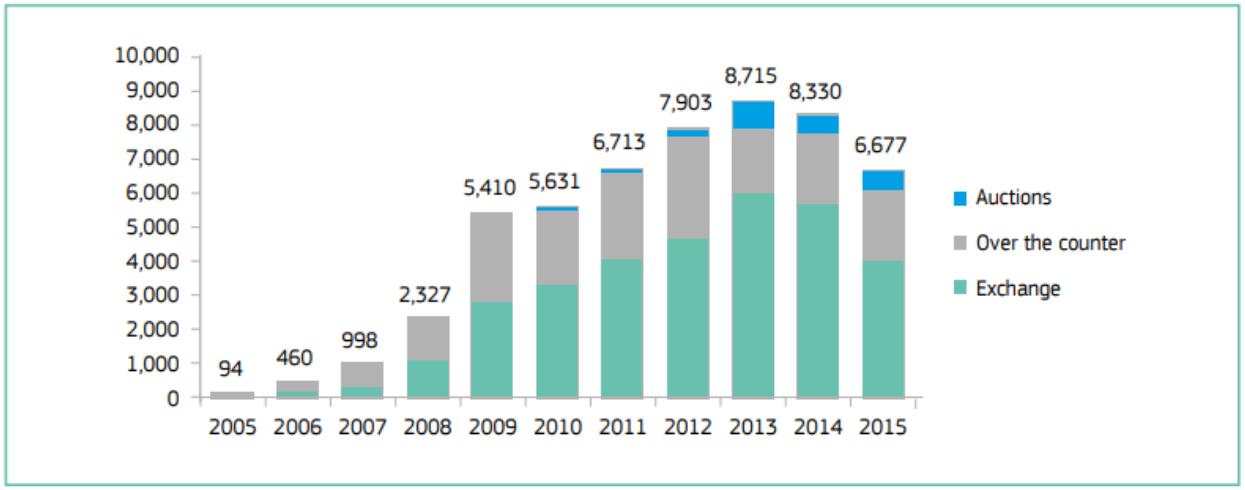
Faza III je faza velikih reformi, a trajala je od 2013. do 2020. godine. Najveće promjene su bile uvođenje ograničenja emisija za cijelu Europsku Uniju (smanjenje za 1.74% svake godine) te početak aukcija dozvola umjesto besplatno dodjeljivanje istih. Također, Hrvatska se pridružuje sustavu trgovanja 1.1.2013.

3.1.4. EU ETS Faza IV

Faza IV je faza koja je trenutno u tijeku, s početkom 2021. pa sve do 2030. godine. U srpnju 2015. godine je Europska Komisija predložila reviziju EU ETS za IV Fazu, s ciljem da smanji emsije za 43% u donosu na 2005. godinu.

3.1.5. Način djelovanja EU ETS

Sustav trgovanja emisijama funkcionira na način stavljanja ograničenja količine emisija koje se sve više smanjuje svake godine. Unutar dozvoljene količine emisija, kompanije mogu kupovati i prodavati (engl. *cap-and-trade*) svoje dozvole za emitiranje stakleničkih plinova prema vlastitoj potrebi, odnosno kompanijama je na fleksibilan način omogućeno smanjenje svojih emisija na njima najisplativiji način. Svaka dozvola omogućuje pravo na emitiranje 1 tone CO_2 (kao najbitinijeg stakleničkog plina) ili jednaku količinu sljedeća dva najštetnija staklenička plina: dušikov oksid (N_2O) i perfluorokarbona (PFC) te se smije iskoristiti samo jednom, odnosno za svaku tonu CO_2 trebaju imati novu dozvolu. Kompanije mogu dobiti dozvole besplatno od države, a osim toga mogu kupiti dodatne dozvole ili iskoristiti „stare" dozvole koje su ostale od prošlih godina. Sve dozvole se moraju pratiti i prijaviti do 30. travnja tekuće godine za sljedeću godinu te se te dozvole više ne mogu iskoristiti. Ukoliko kompanija prekorači količinu emisija za koje ima dozvolu, prisiljena je kupiti dozvole koje joj nedostaju, platiti novčanu kaznu za svaku tonu CO_2 koja je višak te je se javno proziva [5]. Na slici 1 (preuzetoj sa stranice Europske Komisije) je prikazan graf trgovanja emisijama u milijunima tonama u EU pomoću aukcija, kupovinom i mijenjanjem dozvola emisija.



Slika 1 Prikaz obujma trgovanja emisijama u EU (u milijunima tonama)

3.2. Međunarodni sustavi za trgovanje emisijama

Na globalnoj razini se pitanje klimatskih promjena rješava Okvirnom Konvencijom Ujedinjenih Naroda o Promjeni Klime (eng. *The United Nation Framework Convention on Climate Change*- UNFCCC) te se smatra glavnim međunarodnim sporazumom koji se bavi problematikom klimatskih promjena. Konvencija je usvojena u New Yorku (sjedištu UN-a) 9. svibnja 1992. godine, potpisana je u Rio de Janeiru u lipnju iste godine, a stupila je na snagu gotovo dvije godine kasnije 21. ožujka 1994. godine. Do danas ju je usvojilo 197 stranaka (196 država i 1 regionalna organizacija za gospodarsku integraciju), a Republika Hrvatska je postala strankom 1996. godine. Cilj konvencije je udružiti zajedničke snage u borbi protiv klimatskih promjena i globalnih povećanja temperatura.

3.2.1. Protokol iz Kyota

UNFCCC je postavio temelje za sustav koji bi se borio protiv klimatskih promjena, međutim, vrlo rano je primjećeno kako su potrebne strože mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Uveden je dodatak međunarodnom sporazumu koji je prihvaćen u gradu „Kyoto" 11. prosinca 1997. godine, a stupa na snagu tek 16. veljače 2005. godine. Europsko Vijeće je u ime Europske Unije prihvatilo protokol odlukom 2002/358/EZ 25. travnja 2002. godine. Većina zemalja s visokim udjelom emisija nisu potpisale Kyotski protokol tako da je on zastupao samo oko 18% svjetskih emisija. Prvi period primjene protokola je trajao od 2008. do 2012. godine, a zemlje potpisnice su se obvezale smanjiti emisije za prosječno 5% u odnosu na 1990.-e godine. Dopunom na Kyotski protokol u Dohi, 8. prosinca 2012., je usvojen drugi period primjene koji je trajao od 2013. do 2020. godine te je sdržavao sljedeće promjene:

- revizirana lista stakleničkih plinova koje stranke moraju pratiti i prijaviti
- zemlje potpisnice su dužne smanjiti emisije plinova za najmanje 18% u odnosu na razine u 1990.-ima

Kyotski protokol je uveo tri mehanizma za podršku inicijativama pokrenutim na državnoj razini:

1. Združena implementacija (eng. *Joint Implementation*)-
   omogućuje razvijenim zemljama da surađuju s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova
2. Mehanizam čistog razvoja (eng*. Clean Development Mechanism*)-
   omogućuje industrijski razvijenim zemljama ulaganje u projekte za smanjenje emisija u zemljama u razvoju, a zauzvrat dobivaju pravo na korištenje „kredite" ovjerenih smanjenja emisija (eng. *Certified Emission Reduction* credits- CER credits)
3. Trgovanje emisijama (eng*. International Emission Trading*)-
   omogućuje industrijski razvijenim zemljama da otkupe i prodaju dozvole za emisije štetnih plinova

Kyotskim protokolom je uspostavljen strog sustav praćenja, pregleda i provjere, kao i sustav usklađenosti kako bi se osigurala transparentnost i pozvale stranke na odgovornost. Prema Protokolu, stvarne emisije stranaka se moraju pratiti te se vodi precizna evidencija obavljenih trgovina. S druge strane, glavni nedostatak Kyotskog protokola je što samo razvijene zemlje imaju obvezu smanjenja emisija štetnih plinova. SAD nikada nisu potpisale protokol, Kanada se povukla prije isteka prvog obvezujućeg razdoblja, a Japan,

Rusija i Novi Zeland ne sudjeluju u drugom obvezujućem razdoblju tako da se Kyotski protokol sada odnosi samo na nekih 14% emisija u svijetu [6].

3.2.2. Pariški sporazum

Zasjedanje Konferencije stranaka Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC) započelo je u Parizu 30. listopada 2015., a sporazum je stupio na snagu 4. studenog 2016. godine nakon što ga je 5. listopada ratificirala Europska Unija. Sudjelovalo je ukupno 195 država. Pariški sporazum podrazumijeva razdoblje od 2020. godine pa nadalje te se smatra trenutno pravno obvezujućim i glavnim globalnim sporazumom o klimatskim promjenama.

Glavni cilj ovog sporazuma je zadržavanje porasta prosječne temperature na globalnoj razini koja je niža od 2˚C u odnosu na razine predindustrijskog doba. Na konferenciji je dogovorena strategija koja će poboljšati učinkovitost društva prema nastalim klimatskim promjenama kao i neprekidna i bolja međunarodna pomoć zemljama u razvoju pri izvršavanju određenih stavka sporazuma. Također, odlučeno je povećanje doprinosa EU-a u financijskom smislu (u 2015. godini ukupni doprinosi EU-a i njegovih država članica su iznosili 17,6 milijardi eura što je znatno povećanje u odnosu na 2014., a u 2016. godini su iznosili 20,2 milijarde eura).

U skladu s obvezom provedbe sporazuma, zemlje EU-a dogovorile su se raditi na cilju da Europska Unija do 2050. postane prvo klimatski neutralno gospodarstvo i društvo. Također, u prosincu 2020. godine, čelnici EU-a su potvrdili novi obvezujući cilj EU-a za smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % do 2030. u odnosu na 1990., što predstavlja znatno povećanje u odnosu na prethodni cilj EU-a da se emisije do 2030. smanje za 40 %. U travnju 2021. Europsko Vijeće i Parlament postigli su privremeni dogovor o europskom propisu o klimi kojim se nastoji pružiti pravna osnova za cilj smanjenja emisija do 2030. Veleposlanici i veleposlanice pri EU-u odobrili su taj dogovor u svibnju 2021. godine [7]. SAD je 2021. godine najavio ponovno priključivanje Pariškom sporazumu kao jedna od vodećih zemalja u svijetu.

3.3. ICAO CORSIA

ICAO CORSIA (eng. *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) je međunarodni plan i pristup smanjenja emisija unutar zrakoplovne industrije koji je donijela Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (ICAO- *International Civil Aviation Organization*), a prihvaćena je u listopadu 2016. godine.

Odlučeno je da se uzima prosječna razina emisija CO_2 za međunarodni zračni promet u razdoblju 2019.-2020. koji će služiti kao osnova za uspoređivanje s emsijama narednih godina. Od 2021. godine pa nadalje, ako neka od narednih godina prijeđe taj osnovni prosjek, razlika koja je prijeđena predstavlja potrebno nadoknađivanje sektora za tu godinu. CORSIA se implementira u sljedećim fazama:

- Pilot faza (2021.-2023.)
- Prva faza (2024.-2026.)
- Druga faza (2027.-2035.)

U pilotskoj i prvoj fazi sudjeluju samo zemlje koje su se dobrovoljno javile da žele biti dio CORSI-e, a do siječnja 2018. godine broj tih zemalja doseže čak 70 (podrazumijeva se da su odgovorne za više od 85% međunarodnih zrakoplovnih aktivnosti). Razliku između pilotske i prve faze čini odluka u pilotskoj fazi za određivanje godine koja će biti osnova za uspoređivanje emisija, tako da zrakoplovni operatori imaju opciju uzimanja 2020. godine ili bilo koje godine u razdoblju 2021.-2023., dok u prvoj fazi ta odluka čini samo godine u razdoblju 2024.-2026. U drugoj fazi su uključene sve zemlje čiji je udio zrakoplovnih međunarodnih aktivnosti bio veći od 0,5% u 2018. godini ili čiji je kumulativni udio dostigao 90% ukupnih aktivnosti. Slabije razvijene zemlje, zemlje u razvoju bez izaza na more i manji otoci su izuzeti iz obaveznog uključivanja osim ako to oni sami dobrovoljno ne odluče (ukoliko se odluče sudjelovati moraju obavijestiti ICAO o svojoj odluci do 30. lipnja one godine koja prethodi godini u kojoj se uključuju) [8].

ICAO CORSIA se temelji na neutraliziranju ugljika, odnosno smanjenju emisija ugljičnog dioksida ili drugih stakleničkih plinova kako bi nadomjestila stvaranje emisija iz drugih sektora. Operatori zrakoplova država članica ICAO CORSIA-e računaju svoje zahtjeve za nadomještanjem emisija CO_2 prema formuli prikazanoj na slici 2:



Slika 2 Formula za izračun kompenzacije emsija CO_2 zrakoplovnih operatera

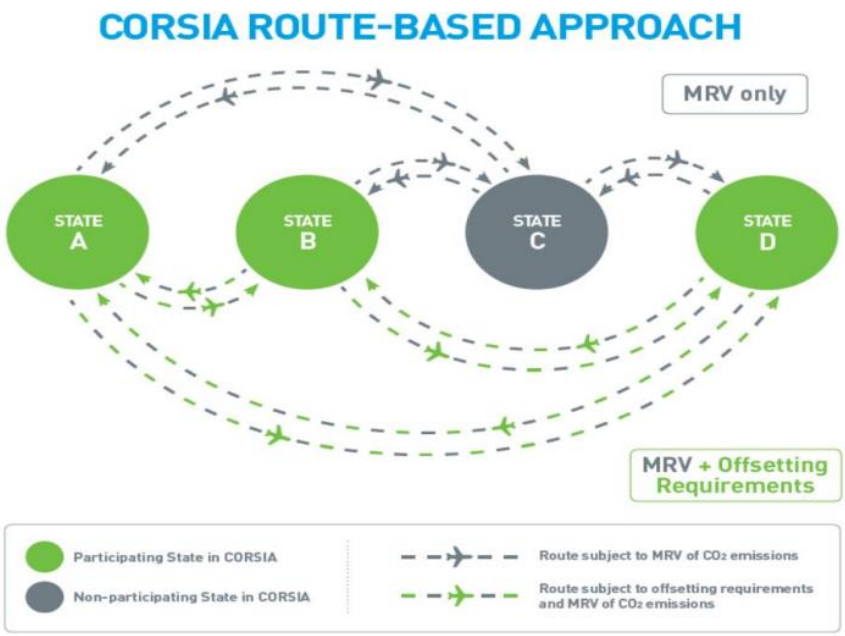
Operator's annual emissions predstavljaju godišnje emisije operatora, *growth factor* je postotak povećanja količine emisija od određene osnovne količine te je izračunat za narednu godinu od strane ICAO-a. Operator također izvještava o upotrebi održivih zrakoplovnih goriva za razdoblje usklađenosti, odbija beneficije od upotrebe održivih zrakoplovnih goriva i obavještava o konačnim zahtjevima za nadoknadom operatora za trogodišnje razdoblje usklađenosti. Operator kupuje i otkazuje prihvatljive jedinice emisije ekvivalentne njegovim konačnim zahtjevima za nadoknadu za razdoblje usklađenosti. Na kraju, operater je primoran dati državi valjano izvješće o otkazivanju jedinica za emisije, koja provjerava izvješće i obavještava o tome ICAO.

ICAO teži postizanju sljedeća dva ambiciozna cilja unutar internacionalnog sektora avijacije:

1. 2% godišnjeg poboljšanja za učnkovitije trošenje goriva do 2050. godine
2. Prestanak rasta emisija od 2020. godine (neutralni rast ugljika)

Sve zemlje članice ICAO-a sa zračnim prijevoznicima koji sudjeluju u međunarodnom zračnom prometu su obavezne pratiti, izvijestiti i potvrditi (eng. MRV- *Monitor, Report, Verify*) emisije CO_2 tih letova za svaku godinu počevši od 2019. godine, neovisno o sudjelovanju u CORSIA projektu.

Alat koji zrakoplovni operatori koriste za procjenu i izvještavanje emisija se naziva CERT (*ICAO CORSIA CO_2 Estimation and Reporting Tool*). Slika 3 prikazuje koji letovi i na koji način sudjeluju u CORSIA projektu. Letovi koji polijeću iz države članice (označene zelenom bojom) i slijeću u državu članicu CORSIA sustava će biti podložne MRV i zahtjevima za nadomještanjem emisija. Ako zrakoplov polijeće iz zemlje članice, a slijeće u državu koja ne sudjeluje u CORSIA projektu (označene sivom bojom) ili obrnuto, taj let će biti podložan samo MRV za emisije ugljičnog dioksida [9].



Slika 3 Obaveze država koje sudjeluju i ne sudjeluju u CORSIA projektu

4. Osnove izgaranja

Izgaranje je kemijski proces pri kojem dolazi do oksidacije gorivih elementa pri čemu se oslobađaju određene količine toplinske energije unutar motora što rezultira željenim pokretanjem. Nažalost, uz produkte izgaranja gorivih elemenata, oslobađaju se i otrovni plinovi koji štete ljudima i okolišu. Svim vrstama fosilnih goriva su zajednički gorivi elementi ugljik (C), vodik (H) i sumpor (S). Uz gorive elemente se javljaju i negorivi elementi poput dušika, vode i pepela.

4.1. Masena bilanca izgaranja

Kao što je već prije spomenuto, izgaranje podrazumijeva vezanje gorivih elemenata s oksidatorom, odnosno oksidaciju gorive tvari. U zrakoplovnim gorivima su gorive tvari ugljik i vodik te se za njihovo izgaranje, tj. 1 kg goriva, može odrediti potrebna količina zraka. Prema pojednostavljenoj kemijskoj reakciji, izgaranje gorivih elemenata se odvija na sljedeći način:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Potrebno je napomenuti da se ovdje radi o potpunom izgaranju. U slučaju nepotpunog izgaranja, kada bi se atomu ugljika dovelo pola molekule kisika (tj. 1 atom) dobio bi se ugljični monoksid:

$$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$$

Za prikaz jednadžbe izgaranja je bolje koristiti jedinicu „mol”, odnosno kmol kako bi se bolje definirao određeni broj molekula plina. Kmol se definira kao ona količina tvari koja ima toliku masu u kilogramima koliko brojčano iznosi njegova molekularna masa.

Kako se kmolovi pojedinih plinova maseno odnose kao njihove relativne molekularne mase, to znači da 1 kmol bilo kojeg plina ima uvijek isti broj molekula. To znači da 1 kmol ugljika ima masu od 12 kg, 1 kmol kisika 32 kg, 1 kmol sumpora isto tako 32 kg, a 1 kmol vodika 2 kg. Tako se prethodne jednadžbe mogu zapisati na sljedeći način:

$$1\ \text{kmol C} + 1\ \text{kmol } O_2 \rightarrow 1\ \text{kmol } CO_2$$

$$2\ \text{kmol } H_2 + 1\ \text{kmol } O_2 \rightarrow 2\ \text{kmol } H_2O$$

$$1\ \text{kmol S} + 1\ \text{kmol } O_2 \rightarrow 1\ \text{kmol } SO_2$$

$$1\ \text{kmol C} + \frac{1}{2}\ \text{kmol } O_2 \rightarrow 1\ \text{kmol CO}$$

Uzimajući u obzir spomenute molne mase plinova u izgaranju, rekacije će izgledati ovako:

$$12\ \text{kg C} + 32\ \text{kg } O_2 \rightarrow 44\ \text{kg } CO_2$$

$$4\ \text{kg } H_2 + 32\ \text{kg } O_2 \rightarrow 36\ \text{kg } H_2O$$

$$32\ \text{kg S} + 32\ \text{kg } O_2 \rightarrow 64\ \text{kg } SO_2$$

$$12\ \text{kg C} + 16\ \text{kg } O_2 \rightarrow 28\ \text{kg CO}$$

Dobivene jednadžbe se dijele s 12, odnosno s 4 i 32, kako bismo dobili potrebnu količinu kisika za izgaranje 1 kg ugljika, vodika i sumpora u gorivu:

$$1\ \text{kg C} + \frac{8}{3}\ \text{kg } O_2 \rightarrow \frac{11}{3}\ \text{kg } CO_2$$

$$1\ \text{kg } H_2 + 8\ \text{kg } O_2 \rightarrow 9\ \text{kg } H_2O$$

$$1\ \text{kg S} + 1\ \text{kg } O_2 \rightarrow 2\ \text{kg } SO_2$$

$$1\ \text{kg C} + \frac{4}{3}\ \text{kg } O_2 \rightarrow \frac{7}{3}\ \text{kg CO}$$

Prema dobivenim jednadžbama, za izgaranje 1 kg ugljika biti će potrebno dovesti $\frac{8}{3}$ kg kisika, za 1 kg vodika će biti potrebno 8 kg kisika, a za izgaranje 1 kg sumpora je potrebno dovesti 1 kg kisika. S desne strane reakcije su dobivene količine ugljičnog dioksida, vode, sumporovog (IV) oksida i ugljičnog monoksida s izgaranjem. Ako gorivo već sadrži kisik, toliko je kisika manje potrebno dovesti za izgaranje.

$$O_o = c^* \frac{8}{3} + h^*8 - o, \qquad [(\text{kg}_{\text{kisika}})/(\text{kg}_{\text{goriva}})]$$

Koristeći se prethodnim jednadžbama za bilancu izgaranja, može se izračunati koliko će biti portebno kg zraka za izgaranje 1 kg goriva ako gorivo sadrži c kg ugljika po kg goriva, h kg vodika po kg goriva i o kg kisika po kg goriva. Također, na osnovu gornjih jednadžbi za bilancu izgaranja se može izračunati koliko će se emitirati CO_2 kada motor potroši 1 kg goriva koji u sebi sadrži c kg ugljika po kg goriva. Kao podsjetnik, ugljični dioksid nastaje samo izgaranjem ugljika:

$$1 \text{ kmol C} + 1 \text{ kmol } O_2 \rightarrow 1 \text{ kmol } CO_2$$

$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg } O_2 \rightarrow 44 \text{ kg } CO_2$$

Iz napisanih jednadžbi gore slijedi:

$$M_{CO2} = \frac{c}{12} \text{ [kmol } CO_2\text{/ kg goriva]}$$

$$g_{CO2} = \frac{44}{12} c \text{ [kg } CO_2\text{/ kg goriva]}$$

Zaključak je da izgaranjem 1 kg goriva koje u sebi sadrži c kg ugljika emitirati $\frac{44}{12} *$c kg ugljičnog dioksida.

Budući da kisik ne nalazimo u elementarnom stanju u prirodi, nego se za izgaranje dovodi zrak (maseni udio kisika je 0,23), možemo prikazati potrebnu količinu zraka za izgaranje 1 kg goriva:

$$A_o = \frac{1}{0{,}23} * (c * \frac{8}{3} + h * 8 - o), \quad [(\text{kg}_{\text{zraka}})/(\text{kg}_{\text{goriva}})]$$

Za avionski i motorni benzin, A_o približno iznosi 15, što znači da ako na kilogram goriva dovedemo 15 kg zraka, smjesa je stehiometrijskog sastava, a faktor bogatstva smjese iznosi 1 (λ=1). Faktor bogatstva smjese se objašnjava odnosom stvarne količine zraka dovedene za izgaranje 1 kg goriva (A) i stehiometrijske količine zraka dovedene za izgaranje 1 kg goriva (A_o):

$$\lambda = \frac{A}{Ao}$$

Ovisno o stvarnoj količini dovedenog zraka, smjesa može biti bogata, siromašna ili stehiometrijska kao što je već prije spomenuto. Ako je dovedeno manje zraka od 15 kg po 1 kg goriva ta smjesa se smatra bogatom smjesom, a faktor bogatstva se izražava kao $\lambda<1$. Suprotno tome, ako se dovede više od 15 kg zraka na 1 kg goriva dobiva se siromašna smjesa ($\lambda>1$). Dovod zraka je izuzetno bitan, npr. u slučaju prevelike količine zraka dolazi do hlađenja plamena i slabijeg energetskog iskorištenja goriva. Također, o količini zraka ovisi i nastanak NO_x spojeva. Sastav smjese se još mogu opisati pomoću masenih odnosa goriva i zraka (eng. *Fuel-to-Air Ratio*, $\frac{F}{A}$) ili zraka i goriva (eng. *Air-To-Fuel Ratio,* $\frac{A}{F}$) [10].

Produkti izgaranja, odnosno ispušni plinovi će se razlikovati ovisno o prisutnoj količini zraka pri izgaranju različitih smjesa:

1. Stehiometrijska smjesa- produkti su CO_2 i H_2O te dušik (N_2) iz zraka koji je ušao u komoru izgaranja, ali nije sudjelovao u kemijskim reakcijama
2. Bogata smjesa- produkti su CO_2 i H_2O, N_2 te zbog izgaranja s nedovoljnom količinom kisika dolazi do stvaranja ugljičnog monoksida (CO) i još se ispušta višak H_2
3. Siromašna smjesa- produkti su CO_2, H_2O, N_2 i slobodni O_2 kao višak

Osim spomenutih produkata izgaranja, naći će se i štetni produkti poput dušičnih oksida (NO_x), olova i njegovih spojeva, nesagorjelih ugljikovodika i dimnih čestica.

4.2. Goriva za mlazne motore

Mlazni motori, kao što im govori ime, imaju mlaznik kroz koju izlaze ispušni plinovi. Kemijska energija goriva prilikom izgaranja se pretvara u kinetičku energiju mlaza plinova koje struje velikom brzinom unatrag kroz mlaznik. Na taj način se stvara reakcijska sila suprotnog smjera akcijskoj sili, odnosno stvara se potisak. Postoje više vrsta mlaznih motora: turbo-mlazni motori (eng. *Turbojet*), turbo-propelerski motori (eng. *Turboprop*), turbo-osovinski motori (eng. *Turboshaft*), ali najčešće se koristi turbo-ventilatorski motori (eng. *Turbofan*).

Mlazna goriva su složeni spojevi tekućih ugljikovodika naftnog porijekla i ostalih tvari koje se dodaju u gorivo. Mlazna goriva se ne označavaju posebnim bojama nego se kreće u nijansama od blijedo žute do bez boje. Postoji više vrsta standardiziranih vrsta mlaznih goriva:

- JET A1 (*AVTUR- Aviation Turbine Fuel*)- najčešće je gorivo u upotrebi, petrolejskog je tipa, točka zapaljivosti mu je na 38 ˚C, a točka zamrzavanja na -47 ˚C
- JET A- gorivo koje se uglavnom koristi u SAD-u, slično je gorivu JET A1 osim što mu je točka zamrzavanja na -40 ˚C i ne sadrži aditive za smanjenje statičkih naboja
- JET B (*AVTAG- Aviation Turbine Gasoline*)- gorivo je smjese 30% kerozina i 70% benzina, radi svoje niske točke zapaljivosti je opasno i rijetko se koristi, ali točka zamrzavanja mu je na -60 ˚C
- TS-1- gorivo koje se koristi u Rusiji, točka zapaljivosti mu je na najmanje 28 ˚C, a točka zamrzavanja na -50 ˚C

U mlazna goriva se dodaju razni aditivi kako bi se poboljšala učinkovitost goriva:

- Inhibitor zamrzavanja goriva (*FSII- Fuel System Icing Inhibitor*)- radi određene količine vode koja se uvijek nalazi u gorivu se pri niskim temperaturama mogu formirati kristali leda koji stvaraju probleme sustavu za napajanje gorivom. Osim toga, voda pogoduje razvoju gljivica koje su korozivne i štetne za cijeli sustav. Dodavanjem inhibitora zamrzavanja goriva se uklanjaju spomenuti problemi s vodom u gorivu.
- Poboljšivači mazivosti (*HITEC- Lubricity Agent*)- služi za smanjenje trošenja pomičnih elemenata u sustavu napajanja gorivom
- Antistatik (*Static Dissipater*)- pomoću antistatika se uklanja opasnost od statičkog elektriciteta do kojeg dolazi proticanjem goriva
- Deaktivatori kovina (*Metal Deactivator*)- umanjuju katalitičko djelovanje pojedinih kovina (npr. bakra) na oksidaciju goriva
- Inhibitor korozivnosti (*Corrosion Inhibitor*)- smanjuju koroziju cijevi i elemenata sustava
- Antioksidansi- smanjuju oksidaciju goriva, odnosno reakciju goriva s kisikom [10]

Osnovni gorivi elementi u gorivu za mlazne motore su ugljik, vodik i kisik. Približni sastav elemenata se nalazi na slici:

$$ugljika: \quad c \approx 0.89 \frac{kg_{ugljika}}{kg_{goriva}}$$

$$vodika: \quad h \approx 0.09 \frac{kg_{vodika}}{kg_{goriva}}$$

$$kisika: \quad o \approx 0.02 \frac{kg_{kisika}}{kg_{goriva}}$$

Slika 4 Sastav gorivih elemenata goriva za mlazne motore

5. Izračun emisije ugljičnog dioksida po fazama leta

U ovom poglavlju će se opisati faze leta: taksiranje, polijetanje i penjanje, krstarenje, spuštanje te prilaz i slijetanje. Razlozi spajanja polijetanja i penjanja te njihovo tretiranje kao jedne faze leta su sljedeći:

- sam čin polijetanja traje vremenski jako kratko (do maksimalno jedne minute)
- ne postoji razlučiva granica kada prestaje polijetanje, a počinje penjanje zrakoplova, može se pretpostaviti da polijetanje prestaje kada zrakoplov prijeđe barem 1500 ft (~ 450 m), za što je opet vremenski jako kratko potrebno
- piloti ne bilježe prestanak polijetanja, odnosno početak penjanja

Slijetanje i prilaz su također spojeni u jednu fazu jer samo slijetanje traje vremenski prekratko te piloti ne ponovno ne postoji jasna granica koja određuje prijelaz iz prilaza u slijetanje.

Za primjer izračuna ugljičnog dioksida po fazama leta je uzet let neimenovane aviokompanije iz Zagreba za Dubrovnik koji se odvio 7. kolovoza 2021. godine, zrakoplovom A319. Neki opći podaci o letu su prikazani na sljedećoj tablici:

Tablica 1. Prikaz podataka iz plana leta

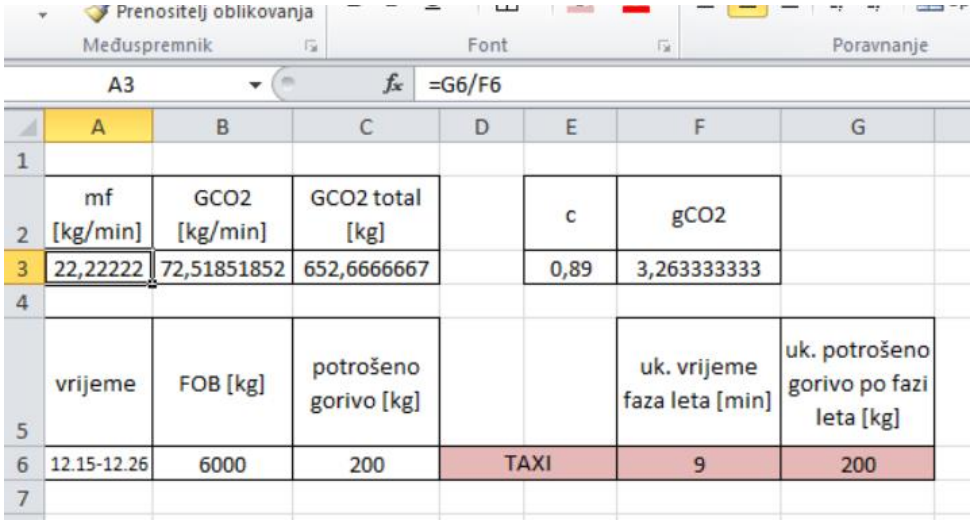
Vrijeme polijetanja (ZAG)	Vrijeme slijetanja (DBV)	Ukupno trajanje leta [min]	RFL	Odobreni FL	BLOCK fuel [kg]	TOF [kg]	REM fuel (DBV) [kg]	PAX
12:26	13:08	42	270	280	6200	6000	4120	118

5.1. Taksiranje

Standardno vrijeme za taksiranje na Zračnoj luci Franjo Tuđman iznosi 10 minuta. To je okvirno vrijeme unutar kojeg zrakoplov pali motor, povlači kočnice, dobiva *push-back* te obavlja taksiranje sa stajanke do

Uzletno-sletne staze i čeka polijetanje na *Holding Point-u.* Prema planiranome na planu leta, micanje kočnica, sve ostale radnje te polijetanje su se trebale odvijati u vremenu 12.20-12.30 h. U stvarnoj situaciji se micanje kočnica dogodilo u 12.15, a polijetanje u 12.26 h što znači da bilo potrebno manje od 10 minuta da se sve radnje obave. Poznat je podatak prema planu leta da je natočeno u zrakoplov 6200 kg goriva (*Block Fuel*), a pri polijetanju je zrakoplov imao 6000 kg. Prije polijetanja je već potrošeno 200 kg goriva što je poprilično dosta. Rješenja za manju potrošnju goriva pri taksiranju je korištenje najkraće moguće rute, najmanji potisak te kočiti što je manje moguće.

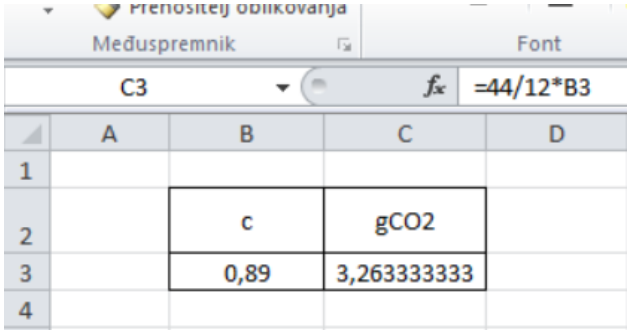
Kako bi se izračunale emisije ugljičnog dioksida za vrijeme taksiranja, potrebno je prvo izračunati koliki je maseni protok goriva. Na slici 5 je prikazan izračun za maseni protok goriva za fazu taksiranja. Potrošeno gorivo za vrijeme trajanja taksiranja iznosi 22,222 kg/min.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]		c	gCO2	
3	22,22222	72,51851852	652,6666667		0,89	3,263333333	
4							
5	vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6	12.15-12.26	6000	200	TAXI		9	200
7							

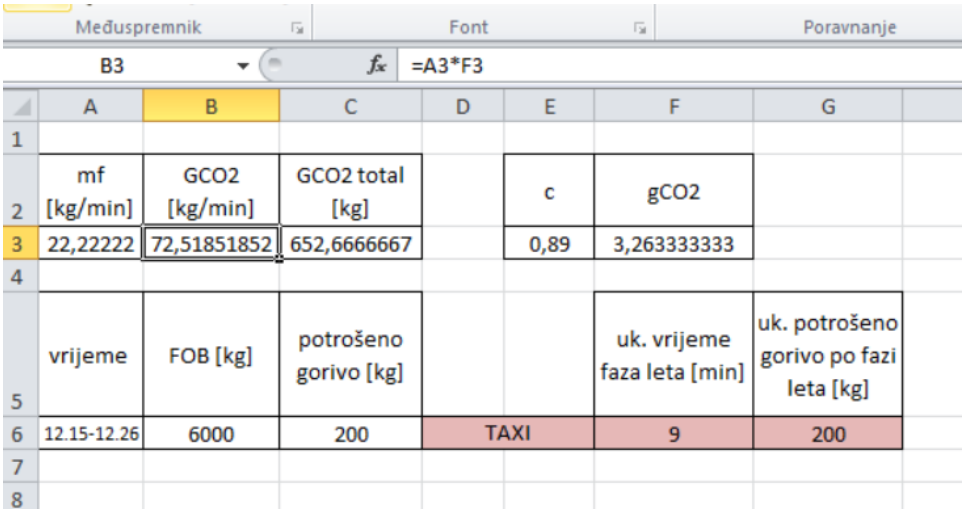
Slika 5 Prikaz izračuna masenog protoka za fazu taksiranja

Iz prethodnog poglavlja je zaključeno da količina CO_2 po jednom kilogramu potrošenog goriva iznosi $g_{CO2}=\frac{44}{12}$ c [kg CO_2/ kg goriva]. Sastav goriva JET A1 za mlazne motore je relativno sličan za svoje varijacije te prisutna količina ugljika iznosi približno 0,89 kg po kilogramu goriva. Uvrštavanjem ugljika u formulu za količinu CO_2 po jednom kilogramu potrošenog goriva dobiva se 3,263 (Slika 6).



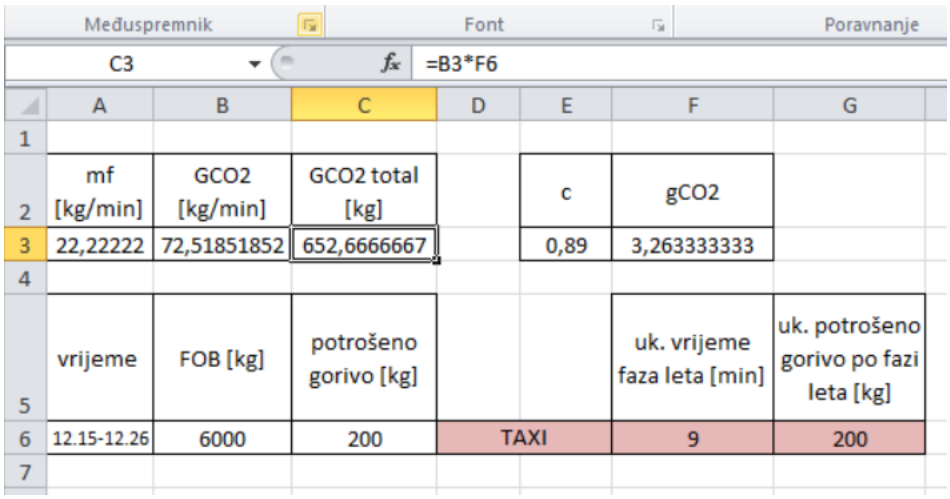
Slika 6 Prikaz izračuna količine CO_2 po kilogramu goriva

Uz izračunatih podataka o količini ugljičnog dioksida po jednom kilogramu goriva te masenom protoku goriva u fazi taksiranja je moguće izračunati koliko je proizvedeno ugljičnog dioksida u jednoj minuti za vrijeme taksiranja što je prikazano na slici 7.



Slika 7 Prikaz izračuna proizvedenog CO_2 u jednoj minuti taksiranja

Za emisije ugljičnog dioksida za cijelo vrijeme trajanja taksiranja je bilo potrebno još samo pomnožiti dobiveni CO_2 za jednu minutu s 9 minuta trajanja taksiranja te se dobilo 652,667 kg ugljičnog dioksida (slika 8).



Međuspremnik | Font | Poravnanje

C3 | =B3*F6

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]		c	gCO2	
3	22,22222	72,51851852	652,6666667		0,89	3,263333333	
4							
5	vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6	12.15-12.26	6000	200	TAXI		9	200
7							

Slika 8 Prikaz izračuna emisija CO_2 za vrijeme taksiranja

Dobivene brojke su zabrinjavajuće jer je to količina emisija ugljičnog dioksida prije nego je zrakoplov uopće poletio. Nažalost nema podataka za planiranu potrošnju goriva u planu leta za taksiranje.

5.2. Polijetanje i penjanje

Polijetanje i penjanje zahtjeva korištenje najveće postavke snage, a time je potrošnja goriva, ispuštanje štetnih plinova i proizvodnja buke najveća. Promjene u polijetanju i penjanju tako mogu imati veliki utjecaj na emisije stakleničkih plinova i proizvodnju buke ukoliko je moguća primjena učinkovitijih ruta i procedura.

5.2.1. Optimalno provođenje polijetanja i penjanja

Potisak polijetanja direktno utječe na performanse zrakoplova te se ne može staviti prioritet na postizanje boljih okolišnih ishoda bez mogućih posljedica na sigurnost zrakoplova. Prilično je česta uporaba smanjenog potiska za uzlijetanje i penjanje jer je usmjerena na smanjenje troškova održavanja. Taj operativni postupak sadrži mnoge koristi poput produživanja životnog vijeka motora i smanjenih emisija NOx.

U fazi penjanja je moguće ostvariti optmalni vertikalni profil leta koji postiže ciljeve učinkovite potrošnje goriva. Potrošnja goriva i emisije stakleničkih plinova se mogu umanjiti primjenom operacija

kontinuiranih penjanja (optimizirani profil penjanja sve do razine krstarenja), međutim, potrebna je uska suradnja zračne luke te toranjskih, prilaznih i oblasnih kontrolora.

Još jedan od načina za postizanje učinkovite potrošnje goriva je penjanje zrakoplova s optimalnom brzinom. Razlike u brzini za +/- 30 kt mogu nadodati potrošnju goriva do 130 kg za određene zrakoplove u penjanju do FL 350. Mogućnost letenja optimalnom brzinom ovisi o zagušenosti zračnog prostora te potrebnom vremenu penjanja.

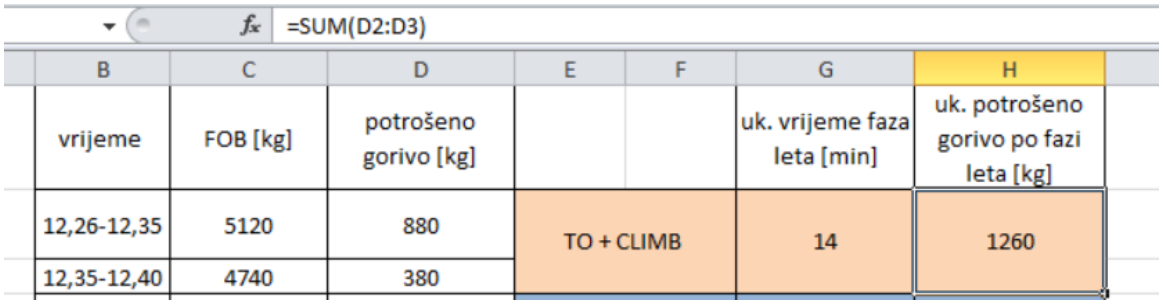
Gdje god je primjenjivo (prema propisima i procedurama za smanjenje buke oko aerodroma) koristi se Standardni instrumentalni odlazak (eng. *Standard Instrument Departure- SID*). Zrakoplovi moraju imati odgovarajuću opremu za korištenje SID-a, a njegovom uporabom se omogućuju bolje navigacijske i operativne performanse što može umanjiti izgaranje goriva i emisije štetnih plinova te uz to poboljšati kapacitet zračnog prostora.

5.2.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida u fazi polijetanja i penjanja zrakoplova

Prema podacima iz plana leta dobivenih od avikompanije čiji let se koristi kao primjer u ovom radu, polijetanje i penjanje je sveukupno trajalo 14 minuta te je u tom periodu potrošeno 1260 kg goriva. Potrošnja goriva po fazama leta je izračunata na temelju zapisa pilota na planu leta. Piloti zapisuju, osim početnog natočenog goriva i količine goriva s kojom su poletjeli, gorivo tijekom leta (eng. *Fuel On Board- FOB*) te potrošnju goriva koju vide preko sustava za upravljanje letom (eng. *Flight Management System- FMS*) koje potom zbrajaju kako bi provjerili odgovara li taj zbroj količini goriva s kojim su poletjeli. Zbroj može varirati za nekoliko desetaka ili stotina kg ovisno o zauzetosti pilota u trenutcima zapisivanja (npr. usred zapisivanja je pilot morao odgovoriti na frekvenciju te je u međuvremenu izgorilo još goriva), ali bi otprilike trebao odgovarati količini goriva s kojom je zrakoplov poletio. Praćenje količine goriva se odvija kako se ne bi dogodilo neprimjetno curenje goriva. Piloti također nisu dužni toliko često zapisivati potrošnju goriva (pogotovo na ovako katkom letu), obično je zapisuju s dolaskom na točku u ruti te dosezanjem vrha penjanja (eng. *Top Of Climb- TOC*) i vrha snižavanja (eng. *Top Of Descent- TOD*).

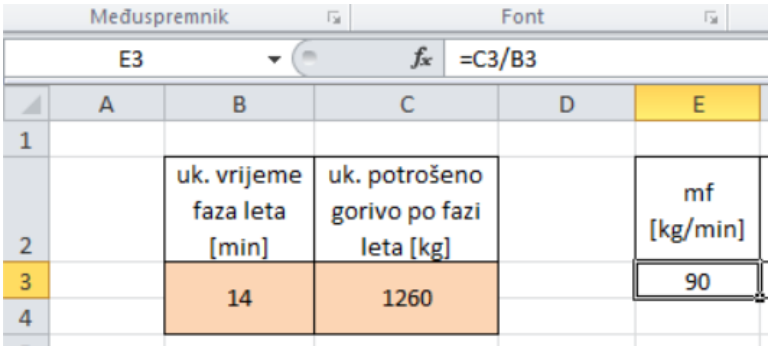
U ovome primjeru je zrakoplov poletio u 12.26h s 6000 kg goriva, na točku TEBLI je došao u 12.35h s 5120 kg i potrošenih 990 kg u tom trenutku zapisivanja. Kao što je prije navedeno, zbroj varira od količine goriva s kojom je zrakoplov poletio i u prihvatljivim je granicama, ali je umjesto zapisanih 990 kg za izračun uzeto 880 kg koji je dobiven oduzimanjem početnih 6000 kg i 5120 kg. Do TOC je došao u 12.40h te je u tom trenutku imao 4740 kg goriva, a potrošio još 380 kg (kumulativna potrošnja je 1380 kg kako su piloti zapisali).

Potrošnja od 380 kg je dobivena oduzimajući FOB na točki TEBLI od 5120 kg i FOB pri dosizanju TOC koji iznosi 4740 kg jer je tako točnija potrošnja goriva. Ukupna potrošnja goriva od 1260 kg je dobivena zbrajanjem 880 kg i 380 kg kao što je prikazano na slici 9.



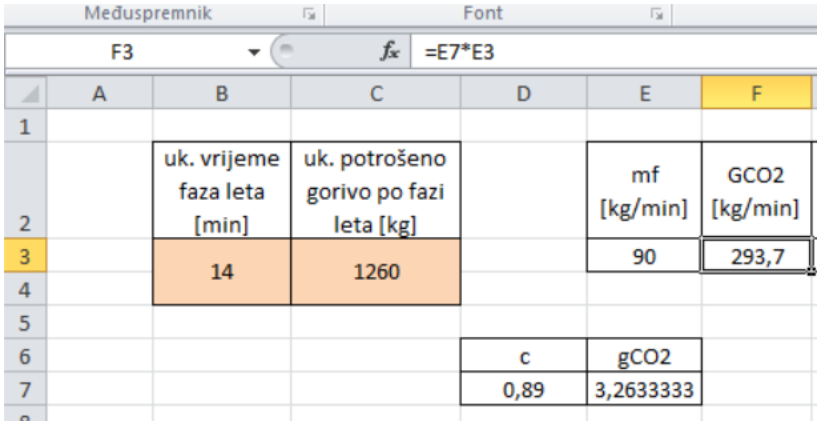
Slika 9 Prikaz izračuna ukupno potrošenog goriva za polijetanje i penjanje

Sljedeći korak je bio izračunati protok goriva (maseni protok goriva) u tom razdoblju. Na slici 10 je prikazan izračun masenog protoka goriva. Protok goriva je dobiven kao odnos ukupnog potrošenog goriva i vremena u kojem je potrošena ta količina goriva.



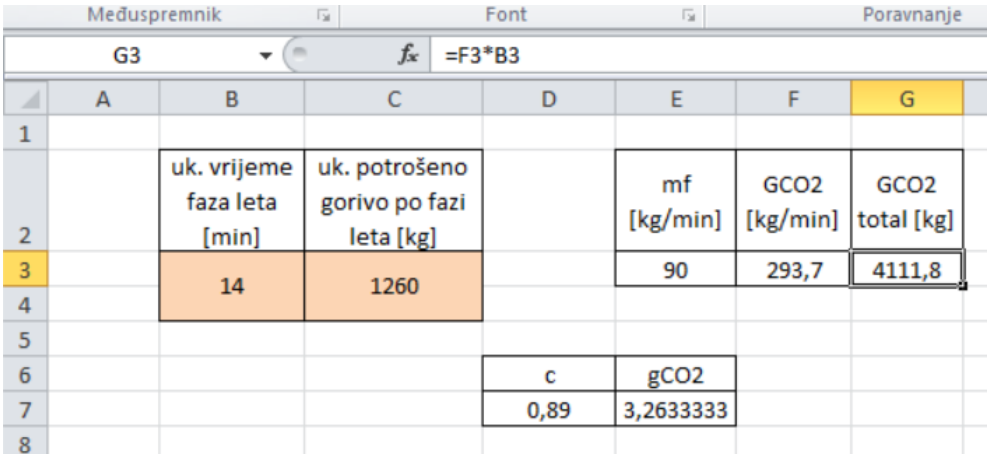
Slika 10 Izračun masenog protoka goriva

Izračunom masenog protoka goriva se napokon može izračunati količina CO_2 za polijetanje i penjanje u jednoj minuti što je prikazano na slici 11. Količina CO_2 koja je proizvedena u jednoj minuti za vrijeme polijetanja i penjanja se dobiva kao umnožak količine CO_2 po kilogramu goriva i masenog protoka goriva za razdoblje penjanje i polijetanja.



Slika 11 Izračun CO_2 u jednoj minuti za primjerni let

Na kraju je bilo potrebno pomnožiti dobiveni CO_2 s ukupnih 14 minuta trajanja faze polijetanja i penjanja te je dobiveno da je u tom razdoblju proizvedeno 4111,8 kg CO_2 (Slika 12).

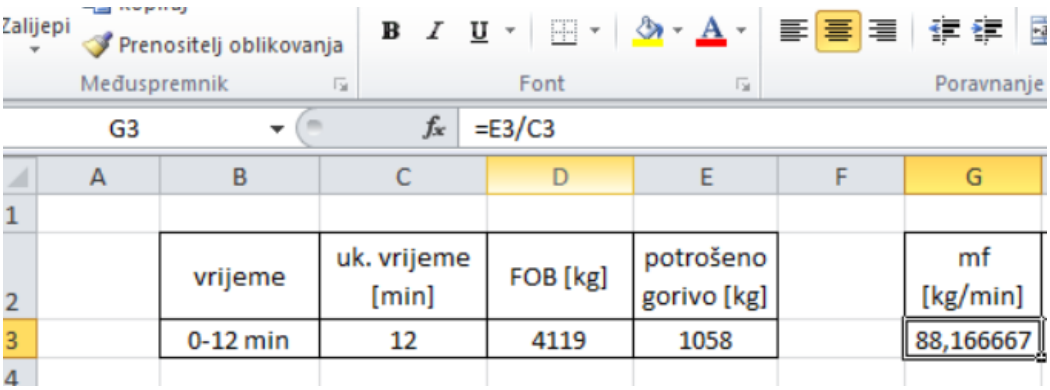


Slika 12 Izračun ukupnog CO_2 za fazu polijetanja i penjanja

5.2.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva u polijetanju i penjanju zrakoplova

Na planu leta je također unaprijed zapisana (isprintana) planirana količina i potrošnja goriva, vrijeme potrebno za dolazak na točke te dosezanje TOC i TOD, brzina leta itd. Planirano vrijeme za dolazak na točku TEBLI iznosi 9 minuta te je količina goriva u zrakoplovu u tom trenutku 4304 kg s planiranom potrošnjom 873 kg. Zbrajanjem FOB i potrošnje se dobiva količina goriva u trenutku polijetanja koja iznosi 5177 kg. U 12. minuti je planirano dosezanje TOC-a koji označava kraj penjanja i prelazak u fazu krstarenja. FOB tada iznosi 4119 kg, a potrošeno je sveukupno 1058 kg do 12. minute leta.

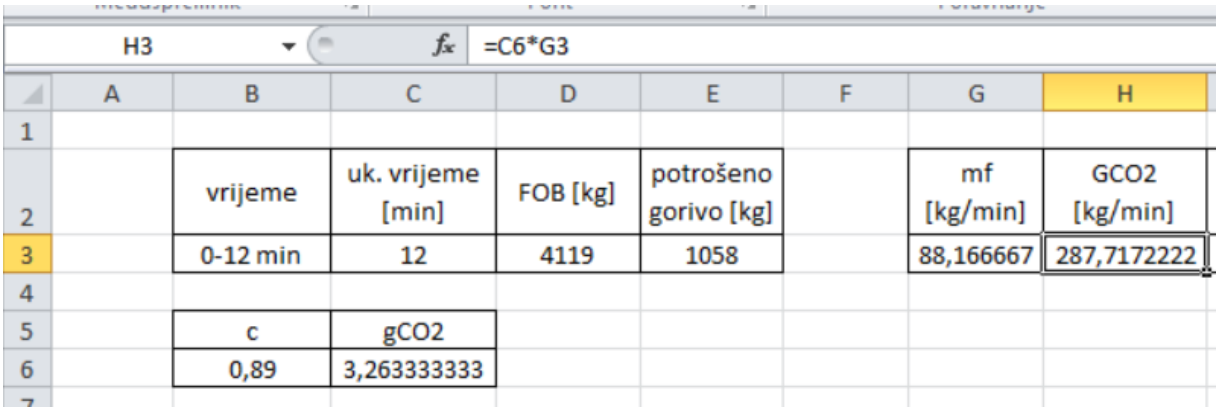
Maseni protok goriva je dobiven dijeljenjem količinom potrošenog goriva s vremenom u kojem je gorivo potrošeno kao što se vidi na slici 13.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		mf [kg/min]
3		0-12 min	12	4119	1058		88,166667
4							

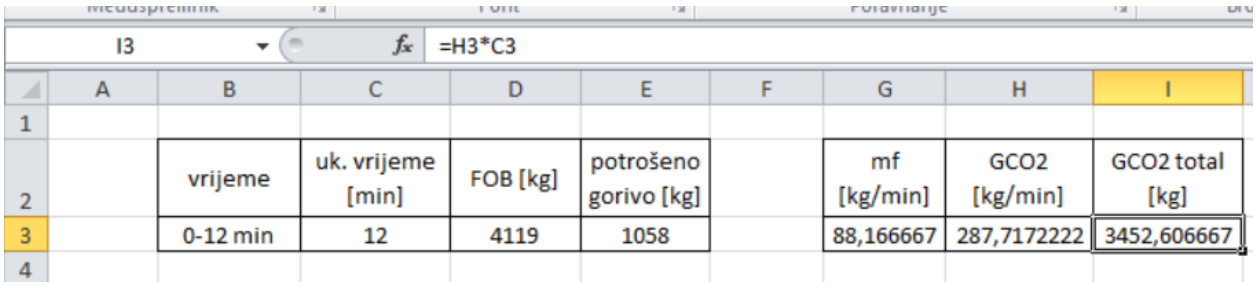
Slika 13 Izračun protoka goriva za planiranu potrošnju goriva u polijetanju i penjanju

Maseni protok se zatim uvrštava u formulu za izračun kilograma CO_2 za jednu minutu polijetanja i penjanja (slika 14).



Slika 14 Izračun kilograma CO_2 po jednoj minuti za planiranu potrošnju polijetanja i penjanja

Naposlijetku je izračunata ukupna količina CO_2 za planirano polijetanje i penjanje koje bi trajalo 12 minuta, tako da je navedeno ukupno vrijeme faze pomnoženo s proizvedenim CO_2 kg/min za istu fazu te je u konačnici dobiveno da je bi emisije CO_2 za planiranu potrošnju goriva iznosile 3452,607 kg kao što je vidljivo na slici 15.



Slika 15 Izračun ukupne količine CO_2 za planiranu potrošnju u polietanju i penjanju

5.2.4. Usporedba stvarne i količine emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva za fazu polijetanja i penjanja

Usporedbom izračunate stvarne količine emisija CO_2 koja iznosi 4111,8 kg te emisija za planiranu potrošnju u polijetanju i penjanju koja iznosi 3452,607 kg se može vidjeti da je stvarna količina emisija CO_2 malo veća od one za planiranu potrošnju goriva. Razlog tome je naravno veća količina goriva unesenog u zrakoplov čime je odmah i potrošnja goriva veća radi veće mase zrakoplova te mnogih drugih faktora poput

utjecaja snažnog bočnog vjetra koji je bio prisutan taj dan, odstupanja od planirane rute radi kontrolorskih zahtjeva, dulje vrijeme penjanja itd.

5.3. Krstarenje

Krstarenje je faza leta koja se odvija nakon penjanja na zatraženu razinu leta (eng. *Requested Flight Level- RFL*) ili razinu leta koja je dana od kontrole leta koja je konačna za njihovo područje letnih informacija (eng. *Flight Information Region- FIR*). Zamišljena točka u kojoj završava penjanje, a počinje krstarenje se naziva vrh penjanja (eng. *Top Of Climb- TOC*) te traje sve do točke vrha snižavanja (eng. *Top Of Descent- TOD*), odnosno sve dok zrakoplov ne krene u snižavanje. Općenito se smatra najmanje kompleksnom te najdužom fazom leta, ali prema primjeru leta na kojem je rađen izračun se vidi kako je to bila najkraća faza leta koja je trajala svega 3 minute.

5.3.1. Optimalno provođenje faze krstarenja

Krstarenje bi se trebalo provoditi s ciljem optimiziranja njegove putanje leta tako da je uključeno i smanjeno izgaranje goriva i proizvodnja emisija štetnih plinova. Većina odluka koje se donose za poboljšanje faze krstarenja se primjenjuju prije polijetanja zrakoplova, poput planiranja leta i ruta te optimizacija položaja težišta zrakoplova. Kako bi se postigla učinkovita potrošnja goriva za vrijeme krstarenja potrebno je težiti sljedećem:

1. letjeti što je više moguće s brzinom i na visini koje imaju učinkovite potrošnje goriva za masu zrakoplova kojim se leti
2. letjeti najkraćom zračnom udaljenosti (npr. rute optimizirane za vjetar i temperaturu)
3. upravljati zrakoplovnim sustavima na način da se reducira potrošnja goriva te omogući optimalna putanja leta za uštedu goriva u skladu s meteorološkim uvjetima

Gdje zahtjevi zračnog prostora i razdvajanja dopuštaju, korisna tehnika očuvanja goriva je upotreba penjanja ili spuštanja u krstarenju koja dozvoljava zrakoplovu da se kreće prema gore ili dolje u skladu s njegovom smanjenom masom i promjenjivim uvjetima okoline u kojima se nalazi. Korištenje ove tehnike je trenutno ograničeno, ali s razvojem mogućnosti zračnog prostora i zrakoplova bi mogla postati više primjenjiva.

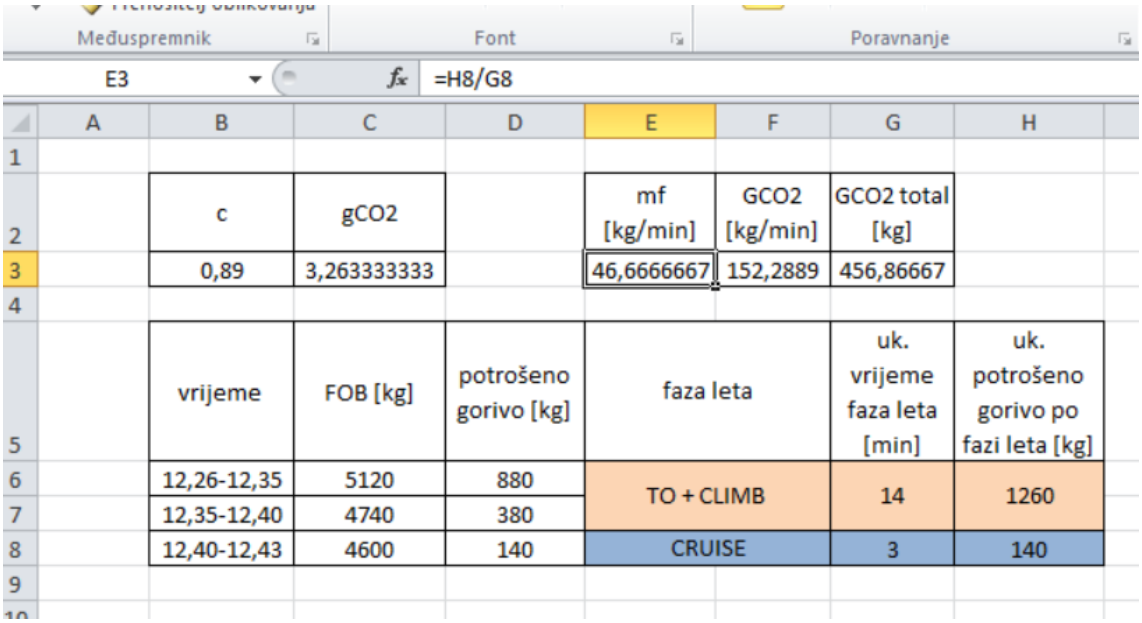
5.3.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida u fazi krstarenja zrakoplova

Prema planu leta je bio izračunat dolazak na točku TIVNU u 12:38 te je također tada planiran i TOC. Dolazak na točku TIVNU jest bio u 12:38, ali TOC je dosegnut tek u 12:40 h. Razlog tome je zatražena nova razina leta FL310 (eng. *Flight Level- FL*) od strane pilota umjesto RFL270. Za dodatno penjanje je bilo potrebno više vremena, međutim penjanje je zaustavljeno na FL290 prema podacima iz programa NEST. U točki TOD je zabilježena količina goriva od 4740 kg s potrošnjom od sveukupnih 1380 kg. FOB u točki TOD iznosi 4600 kg, s potrošnjom od 1470 kg. Ponovno se potrošnja ne slaže s početnom količinom goriva s kojom je zrakoplov poletio tako da je potrošnja goriva u fazi krstarenja izračunata kao razlika dvaju FOB u točkama TOC i TOD koja iznosi 140 kg (slika 16). Također, TOD je dostignut u 12:43 što znači da je krstarenje trajalo svega 3 minute iz razloga koji su navedeni prije te odluke kontrole leta da zrakoplov već tada krene u spuštanje na FL150.

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	faza leta	uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140

Slika 16 Prikaz ukupnog vremena i potrošnje goriva u fazi krstarenja

Sljedeći je izračunat maseni protok goriva dijeljenjem ukupne potrošnje goriva u krstarenju s ukupnim trajanjem krstarenja izraženim u minutama što je prikazano na slici 17.

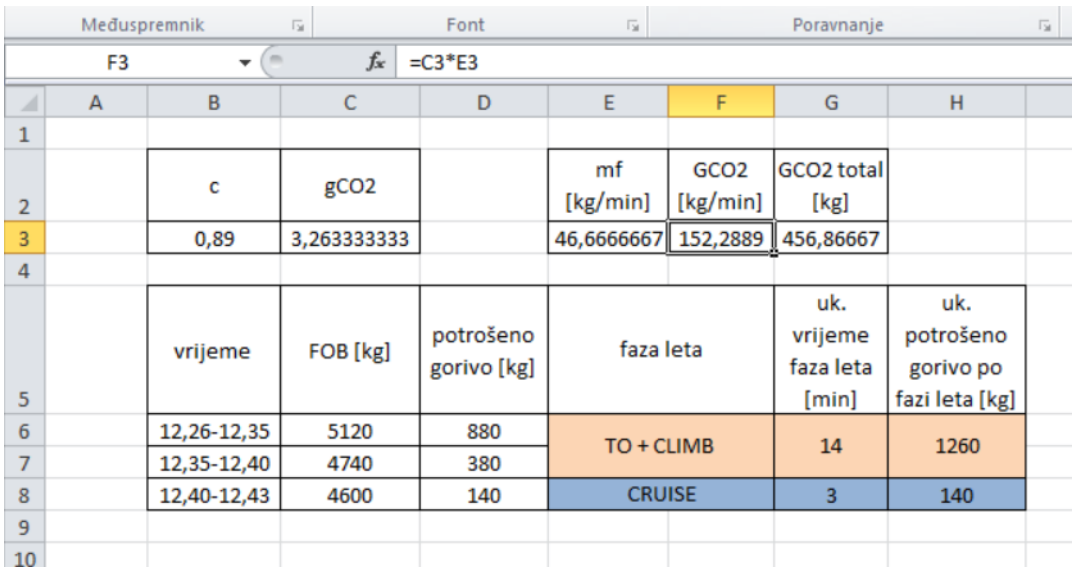


c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
0,89	3,263333333		46,6666667	152,2889	456,86667

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	faza leta	uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140

Slika 17 Prikaz izračuna masenog protoka goriva u fazi krstarenja zrakoplova

S izračunatim masenim protokom goriva je moguće izračunati proizvodnju CO_2 tog leta po jednoj minuti s time da je prethodno izračunata proizvodnja mase CO_2 po kilogramu goriva koje je u zrakoplovu (kao što je objašnjeno u podpoglavlju polijetanja i penjanja). Izračun CO_2 (GCO_2) po jednoj minuti tog leta je prikazan na slici 18.

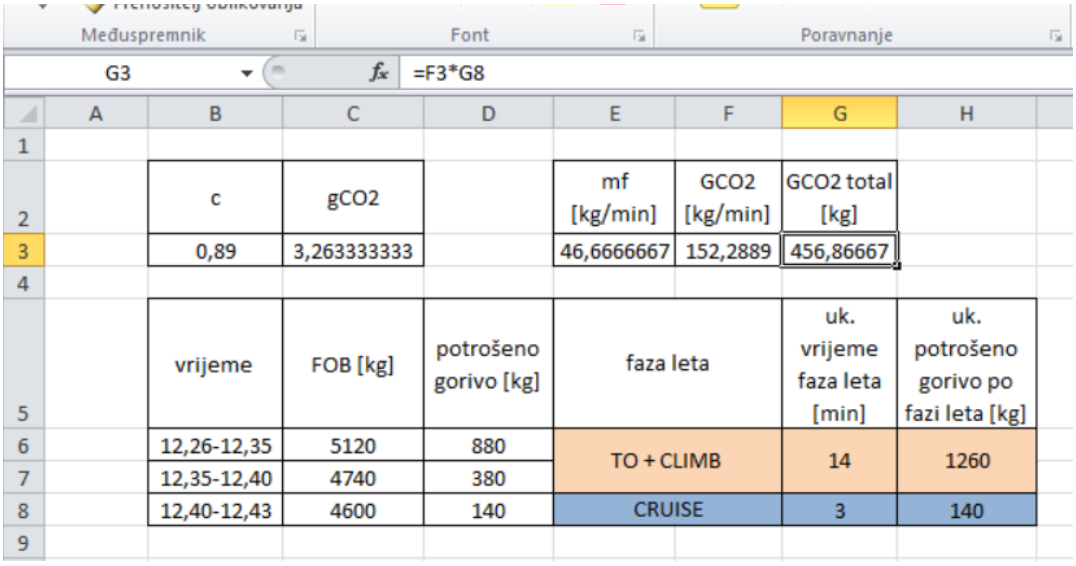


c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
0,89	3,263333333		46,6666667	152,2889	456,86667

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	faza leta	uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140

Slika 18 Prikaz izračuna CO_2 po jednoj minuti u fazi krstarenja zrakoplova

Na kraju je izračunata ukupna količina emisija za fazu krstarenja na tom letu tako što je dobivena količina CO_2 po jednoj minuti pomnožena s 3 minute, koliko je ukupno trajalo krstarenje. Dobivene emisije CO_2 za fazu krstarenja navedenog leta iznose 456,867 kg (slika 19).



Međuspremnik | Font | Poravnanje

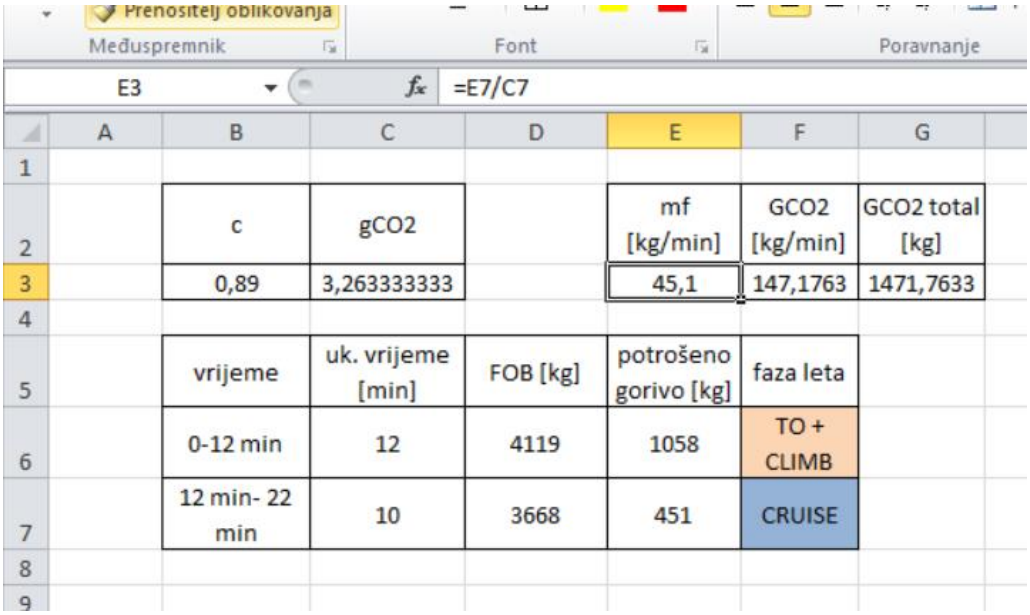
G3 | =F3*G8

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		46,6666667	152,2889	456,86667	
4								
5		vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	faza leta		uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6		12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
7		12,35-12,40	4740	380				
8		12,40-12,43	4600	140	CRUISE		3	140
9								

Slika 19 Prikaz izračuna CO_2 za fazu krstarenja zrakoplova

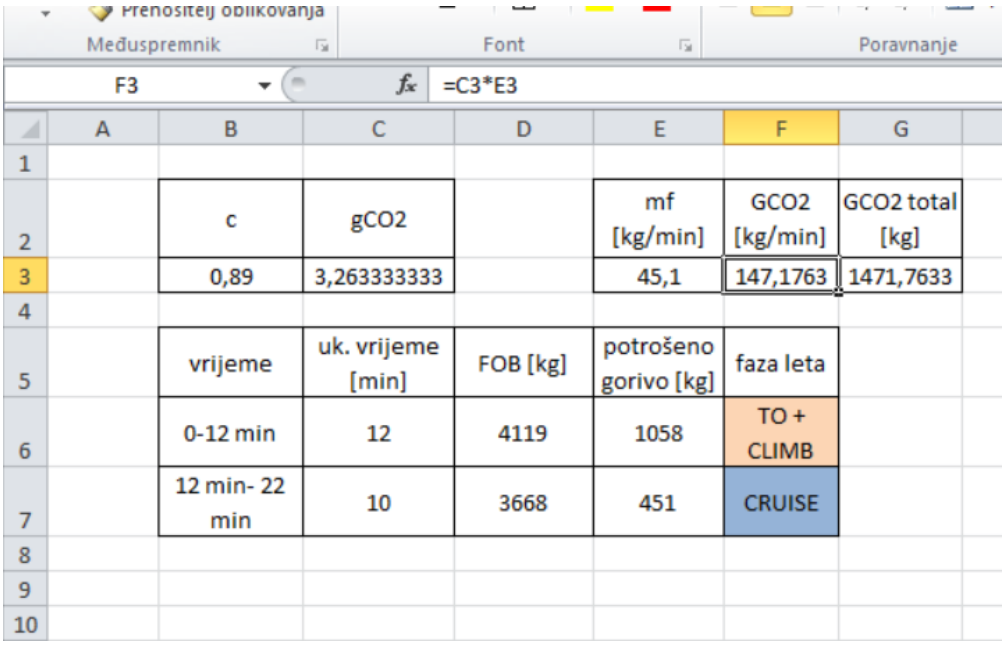
5.3.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva faze krstarenja

Prema planiranome planu leta, faza krstarenja je trebala trajati od 12. do 22. minute leta, ukupno 10 minuta. U TOC točki je zapisan FOB od 4119 kg, a u točki TOD je planiran FOB od 3668 kg. Na slici 20 je prikazan izračun masenog protoka goriva za planiranu potrošnju goriva u fazi krstarenja.



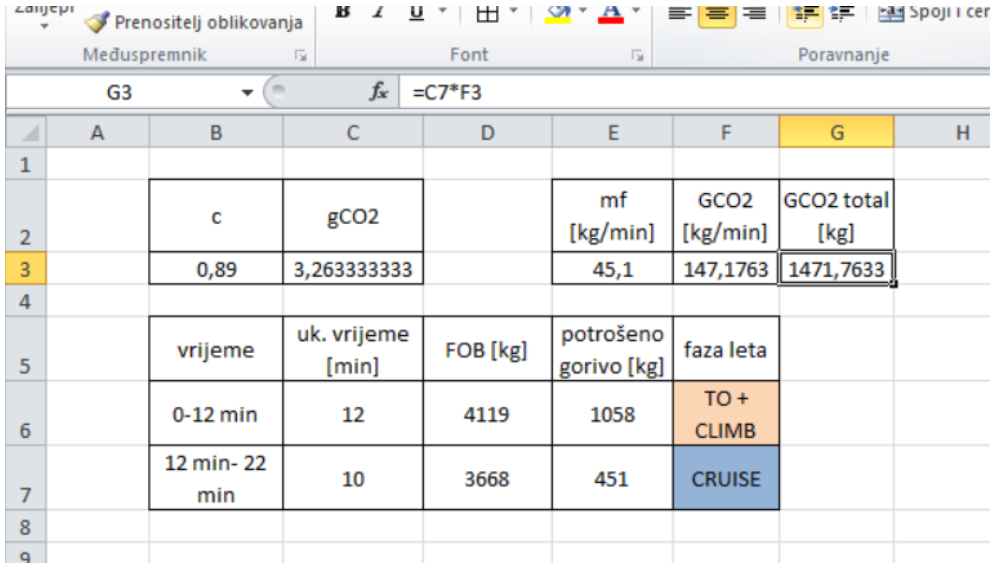
Slika 20 Prikaz izračuna masenog protoka za planiranu potrošnju goriva u fazi krstarenja

Zatim su izračunate emisije ugljičnog dioksida za fazu krstarenja po jednoj minuti što je prikazano na slici 21.



Slika 21 Prikaz izračuna CO_2 za fazu krstarenja po jednoj minuti za planiranu potrošnju goriva

Kada je poznata količina emisija CO_2 koja se proizvela u jednoj minuti za vrijeme krstarenja s planiranom potrošnjom goriva može se odrediti kolika je količina emisija CO_2 za to cijelo krstarenje. Dobitak konačne količine CO_2 je prikazan na slici 22 te iznosi 1471,763 kg.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		45,1	147,1763	1471,7633	
4								
5		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	faza leta		
6		0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB		
7		12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE		
8								
9								

Slika 22 Prikaz izračuna ukupnih emisija CO_2 za planiranu potrošnju goriva u krstarenju

5.3.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u krstarenju

Usporedbom emisija CO_2 prema stvarnoj i planiranoj potrošnji goriva, vidljivo je da je količina ugljičnog dioksida prema planiranoj potrošnji goriva puno veća od stvarnih emisija. Razlika između 456,867 kg i 1471,7633 kg emisija u fazi krstarenja je više od tone CO_2 koje su smanjene u jednom letu. Naravno, razlika je u vremenskom trajanju za obje situacije te različite razine leta.

5.4. Snižavanje

Faza snižavanja razine leta se odvija nakon faze krstarenja te je priprema za prilaz i slijetanje na odredišni aerodrom. Prema primjeru leta na kojem su rađeni izračuni, zrakoplov je dobio instrukciju snižavanja u 12:43 s FL 280 na FL150. Za Fazu snižavanja se uzima razdoblje od točke TOD do dolaska na točku NERRA za koju se uzima da je početak prilaza. Na točki NERRA je očitano 4440 kg goriva u zrakoplovu s potrošnjom od 1650 kg u tom trenutku (12:57 h).

5.4.1. Optimalno provođenje snižavanja

Faza snižavanja ima manju potrošnju goriva u odnosu na penjanje i krstarenje, ali količina emisija stakleničkih plinova koja se proizvodi na tom dijelu leta nije zanemariva. Preporuča se primjena metoda i procedura koje olakšavaju postizanje optimalne putanje snižavanja koliko god je to moguće.

Osnovni ciljevi optimalne potrošnje goriva u fazi snižavanja leta su:

1. letenje što je bliže moguće profilu snižavanja s najučinkovitijom potrošnjom goriva (izbjegavanje segmenata letenja na razinama leta)
2. izbjegavanje letenja u čekanju (eng. *Holding*)
3. reduciranje količine vektoriranja i ograničavanja brzine koje izdaju kontrolori letenja
4. izbjegavanje situacija koje mogu izazvati procedure neuspjelog prilaza i zaobilaženja (eng. *Go-Arounds*)

Velika količina letova uspijeva održavati kontinuirano snižavanje u manje zagušenom zračnom prostoru. Pozitivne strane takvog profila snižavanja mogu varirati od 10 kg do preko 400 kg uštede goriva. Prema Europskoj konferenciji Civilnog Zrakoplovstva (eng. *European Civil Aviation Conference- ECAC*) je procijenjeno da bi uštede goriva primjenom kontinuiranog snižavanja mogle smanjiti troškove goriva za preko 100 milijuna Eura te smanjiti emisije ugljičnog dioksida za otprilike 0,5 milijuna tona u jednoj godini. Iz navedenih razloga se radi na tome da se takav način snižavanja implementira za što je više zrakoplova moguće, na što većoj visini te za što dulje razdoblje.

5.4.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida za fazu snižavanja

Na slici 23 su prikazani trajanje faze snižavanje na letu te kolika je potrošnja goriva bila za tom razdoblju. Potrošnja goriva je dobivena kao razlika FOB u točki TOD te FOB u vremenu dolaska na točku NERRA.

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140
12,43-12,57	4440	160	DESCENT	14	160

Slika 23 Prikaz ukupnog vremena trajanja faze snižavanja te količine potrošenog goriva

Potrošnja goriva po minuti izračunata pomoću podataka ukupne potrošnje goriva u fazi snižavanja i ukupnog vremena trajanja faze. Odmah se može prepoznati da maseni protok goriva neće biti veliki broj. Na slici 24 je prikazan dobitak masenog protoka za fazu snižavanja leta koji iznosi 11,429 kg/min.

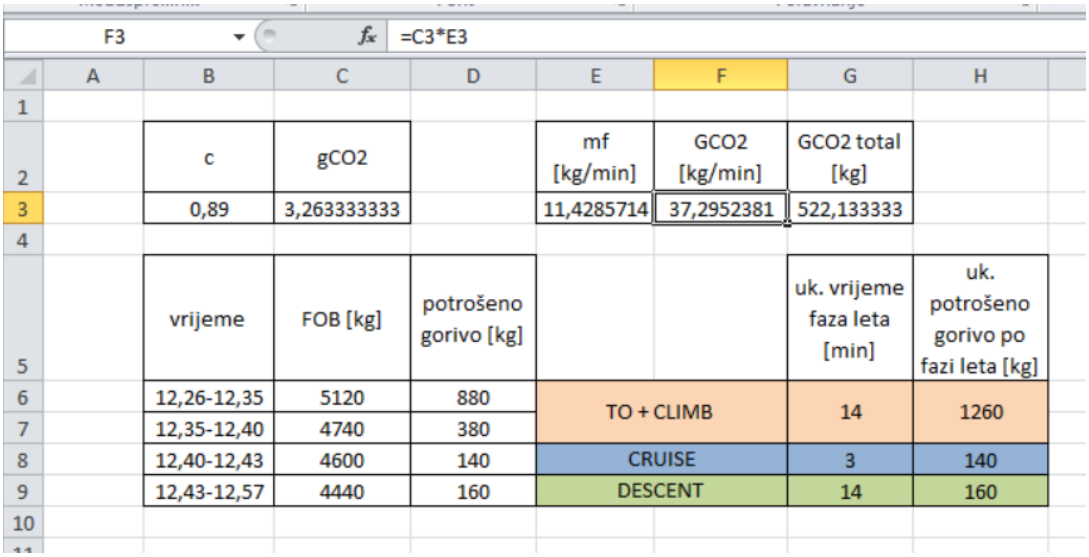
Međuspremnik | Font | Poravnanje

E3 =H9/G9

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		11,4285714	37,2952381	522,133333	
4								
5		vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6		12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
7		12,35-12,40	4740	380				
8		12,40-12,43	4600	140	CRUISE		3	140
9		12,43-12,57	4440	160	DESCENT		14	160
10								

Slika 24 Prikaz izračuna masenog protoka za fazu snižavanja

Nakon izračunatog masenog protoka goriva te otprije izračunate količine kilograma ugljičnog dioksida po kilogramu JET A1 goriva se može izračunati koliko se kilograma ugljičnog dioksida proizvede u jednoj minuti u snižavanju tijekom primjernog leta kao što je prikazano na slici 25.

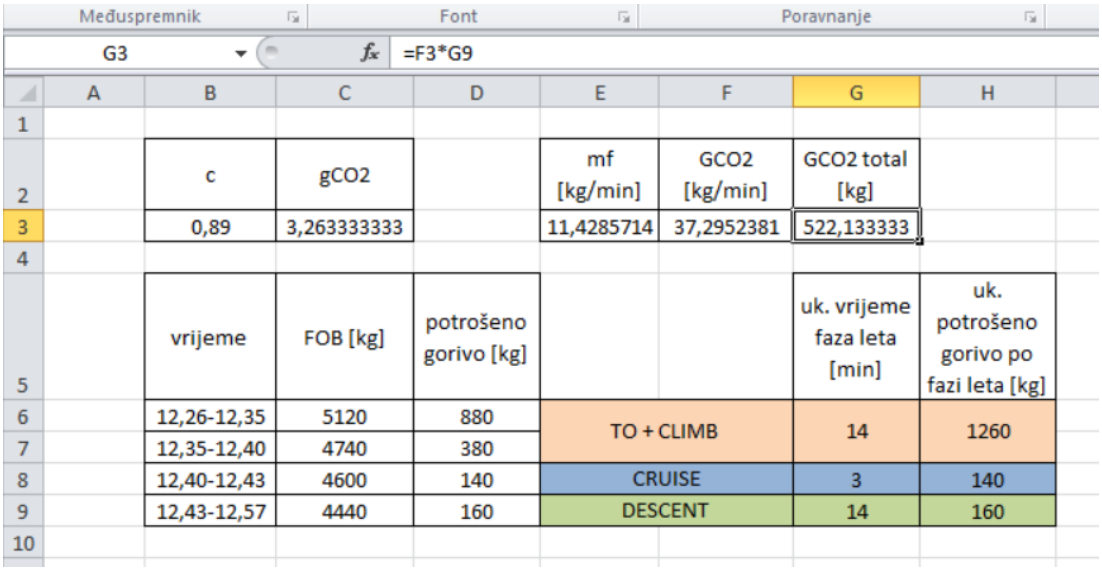


F3 =C3*E3

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		11,4285714	37,2952381	522,133333	
4								
5		vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6		12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
7		12,35-12,40	4740	380				
8		12,40-12,43	4600	140	CRUISE		3	140
9		12,43-12,57	4440	160	DESCENT		14	160
10								

Slika 25 Prikaz izračuna proizvodnje kilograma CO_2 po minuti u fazi snižavanja

Naposlijetku se pomnoži dobiveni CO_2 po minuti sa sveukupnim vremenskim trajanjem, odnosno s 14 minuta trajanja faze snižavanja kako bi se dobile ukupne emisije ugljičnog dioksida u snižavanju primjernog leta (slika 26). Dobivene emisije CO_2 su očekivano male za razdoblje od 14 minuta te iznose 522,133 kg.



Međuspremnik Font Poravnanje

G3 =F3*G9

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		11,4285714	37,2952381	522,133333	
4								
5		vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6		12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
7		12,35-12,40	4740	380				
8		12,40-12,43	4600	140	CRUISE		3	140
9		12,43-12,57	4440	160	DESCENT		14	160
10								

Slika 26 Prikaz izračuna ukupnih emisija CO_2 za fazu snižavanja

5.4.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja

Na slici 27 su prikazane planirane potrošnje goriva i FOB za koje je uzeto iz plana leta da faza snižavanja zopičinje u točki TOD, a završava dolaskom na točku NERRA. Za snižavanje se planiralo trajanje od 8 minuta.

vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	
0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB
12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE
22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT

Slika 27 Prikaz planirane potrošnje goriva i FOB za fazu snižavanja

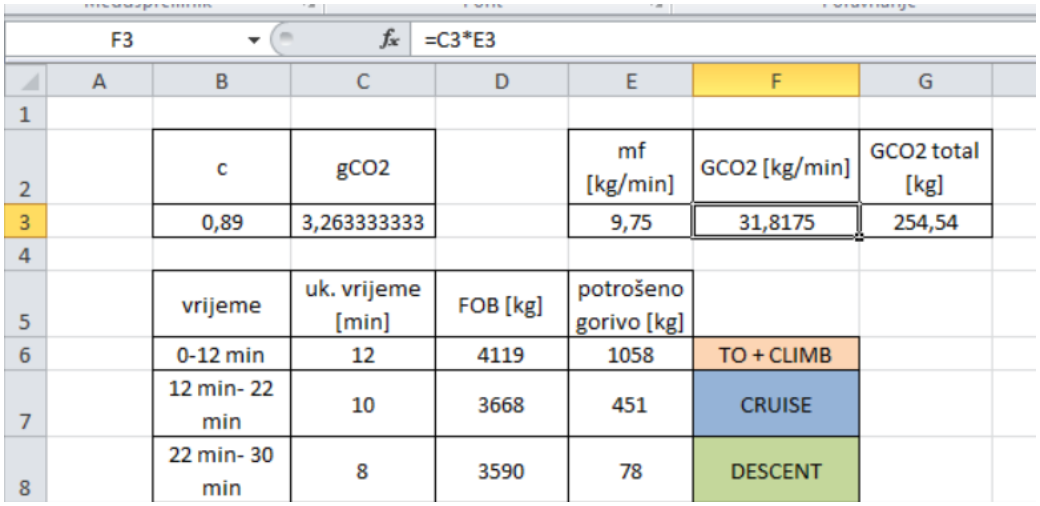
U spomenutih 8 minuta je potrošeno 78 kg goriva te se na temelju toga može izračunati maseni protok goriva kao što je pokazano na slici 28.

E3 f_x =E8/C8

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
3		0,89	3,263333333		9,75	31,8175	254,54
4							
5		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		
6		0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB	
7		12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE	
8		22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT	

Slika 28 Prikaz izračuna masenog protoka goriva za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja

Nakon toga je potrebno izračunati proizvodnju ugljičnog dioksida po jednoj minuti za planiranu potrošnju goriva. Otprije je izračunata količina ugljičnog dioksida po kilogramu goriva koju je potrebno pomnožiti s masenim protokom (prikaz na slici 29).

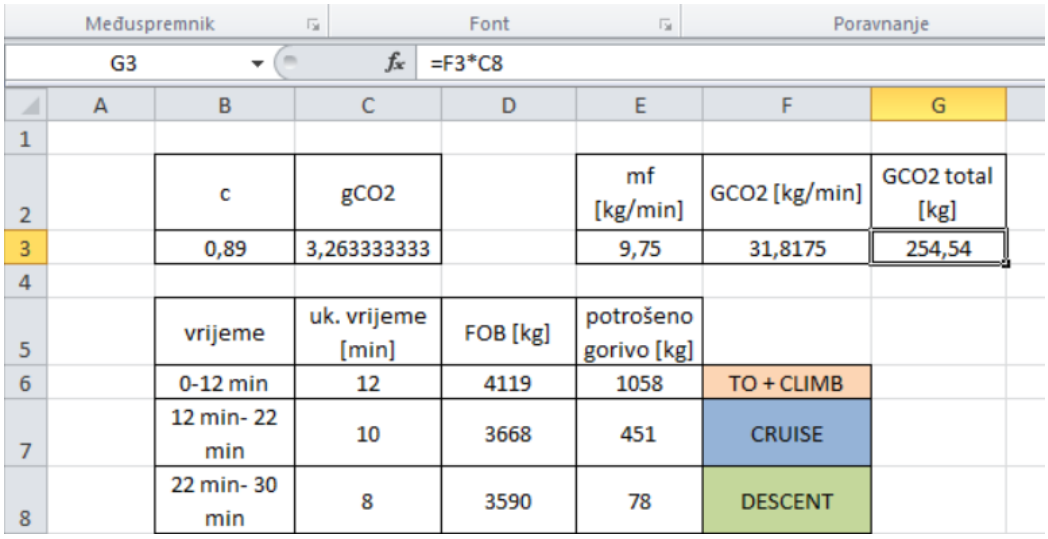


F3 =C3*E3

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
3		0,89	3,263333333		9,75	31,8175	254,54
4							
5		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		
6		0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB	
7		12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE	
8		22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT	

Slika 29 Prikaz izračuna emisija CO_2 po minuti za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja

Uz dobivenu količinu emisija ugljičnog dioksida po minuti, sada se može pomnožiti sa planiranim vremenom trajanja faze snižavanja koja iznosi 8 minuta te se dobiva ukupna količina CO_2 koja bi bila proizvedena za planiranu potrošnju goriva u toj fazi. Na slici 30 se vidi da ona iznosi 254,54 kg.



Međuspremnik Font Poravnanje

G3 =F3*C8

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
3		0,89	3,263333333		9,75	31,8175	254,54
4							
5		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		
6		0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB	
7		12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE	
8		22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT	

Slika 30 Prikaz izračuna emisija CO_2 za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja

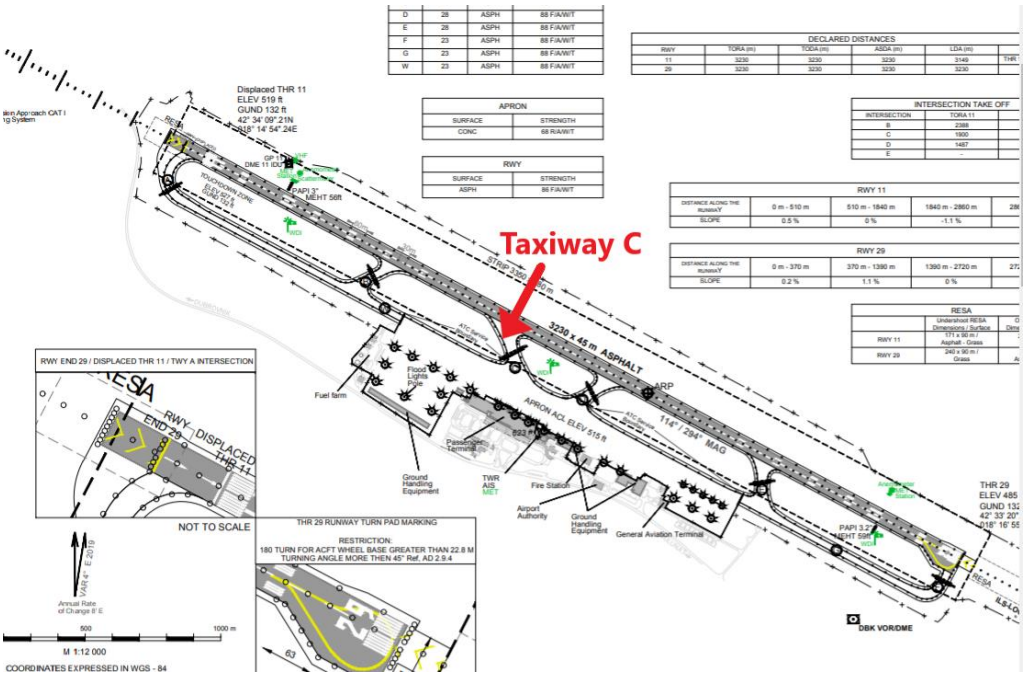
5.4.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi snižavanja

Promatrajući dobivene iznose za stvarnu i planiranu potrošnju goriva, stvarna količina emisija CO_2 je i više nego duplo veća od emisija za planiranu potrošnju goriva. Razlozi tome mogu biti različita vremenska

trajanja faza te različite potrošnje goriva za naravno različitu količinu goriva ukrcanog na zrakoplov. Prema stvarnom planu leta je snižavanje trajalo 14 minuta u odnosu na planirano snižavanje od 8 minuta što je skoro duplo veći iznos. Također, potrošnja od planiranih 78 kg goriva je više nego duplo manja od stvarnih potrošenih 160 kg goriva u fazi snižavanja.

5.5. Prilaz i sijetanje

Prilaz i slijetanje se tretiraju kao jedna faza leta iz razloga jer na planu leta nema podataka prema kojima se može zaključiti prijelaz iz prilaza u slijetanje te ponovno, ne postoji jasna granica kada točno započinje slijetanje, a završava prilaz. Također, samo slijetanje traje prilično kratko da bi se potrošila značajna količina goriva. Na kraju, pilot je na planu leta zapisao vrijeme dolaska na točku NERRA i količinu goriva na toj točki te je sljedeće zapisao vrijeme slijetanja i kolčinu goriva koja je preostala u zrakoplovu kada je parkirao. Piloti nikad ne zapisuju kolčinu goriva u zrakoplovu kada su sletjeli, nego preostala količina goriva kada se parkiraju. U ovom slučaju je u redu što nema podataka o količini i potrošnji goriva u trenutku slijetanja jer je izlazak sa uzletno-sletne staze (USS) i taksiranje do stajanke na zračnoj luci u Dubrovniku toliko kratko da se također može zanemariti (oko 1 minute), odnosno pridružiti u potrošnju goriva za prilaz i slijetanje. Na slici 31 je prikazana karta Zračne luke Dubrovnik te staza za vožnju C (eng. *Taxiway- TWY*) kojom se najčešće izlazi s USS-e 11 na stajanku.



Slika 31 Prikaz karte Zračne luke Dubrovnik i staze za vožnju C

Prema zapisima u planu leta, od kontrole leta je zadano praćenje standardnog rutnog dolaska (eng. *Standard Terminal Arrival Route- STAR*) NERRA 2X. Prilaz putem STAR-a počinje točkom NERRA s minimalnom visinom od 5000 ft na koju stiže u 12.57. Može se približno izračunati visina zrakoplova na točki NERRA pomoću pravila prilaza pod kutem od 3˚. Na planu leta je otprije izračunata udaljenost od svake točke u nautičkim miljama. Od točke NERRA do USS-e je udaljenost od 38 NM. Pomoću tangensa kuta od 3˚ i "priležeće katete" vrijednosti 38 NM dobiva se visina. Pretvorbom NM u ft se dobiva otprilike 12100 ft što bi značilo da je zrakoplov bio otprilike na FL 120 u točki NERRA.

5.5.1. Optimalno provođenje faze prilaza i slijetanja

Vektoriranje se zadaje kako bi se održala separacija te za provođenje sekvenciranja zrakoplova za uspješno i sigurno slijetanje. Takva skretanja s planirane rute rezultiraju s dodatnim prijeđenim nautičkim miljama što narušava optimalni vertikalni profil te se izgaranje goriva povećava kao i emisije i buka. Vektoriranje i potrebna intervencija za vrijeme slijetanja se može smanjiti korištenjem kontrolorskih alata (npr. *Arrival Management- AMAN*) te korištenje STAR-ova i prostorne navigacije (eng. *Area Navigation- RNAV*).

Procedure obilaženja (eng. Go-Around) i neuspjelog prilaza su česta pojava koja se događa iz mnogo razloga, a može ih pokrenuti pilot ili kontrolor leta. Pokušava se smanjiti učestalost tih procedra jer povećavaju buku, emisija i potrošnju goriva. Traženjem rješenja za smanjenje nepotrebnih zaobilaženja i neuspjelih prilaza donijet će se sigurnosne i operativne koristi te će se smanjiti izgaranje goriva i utjecaj na okoliš. Operaterima zračnih luka preporučuje se poduzimanje istraživanja njihovih uzroka.

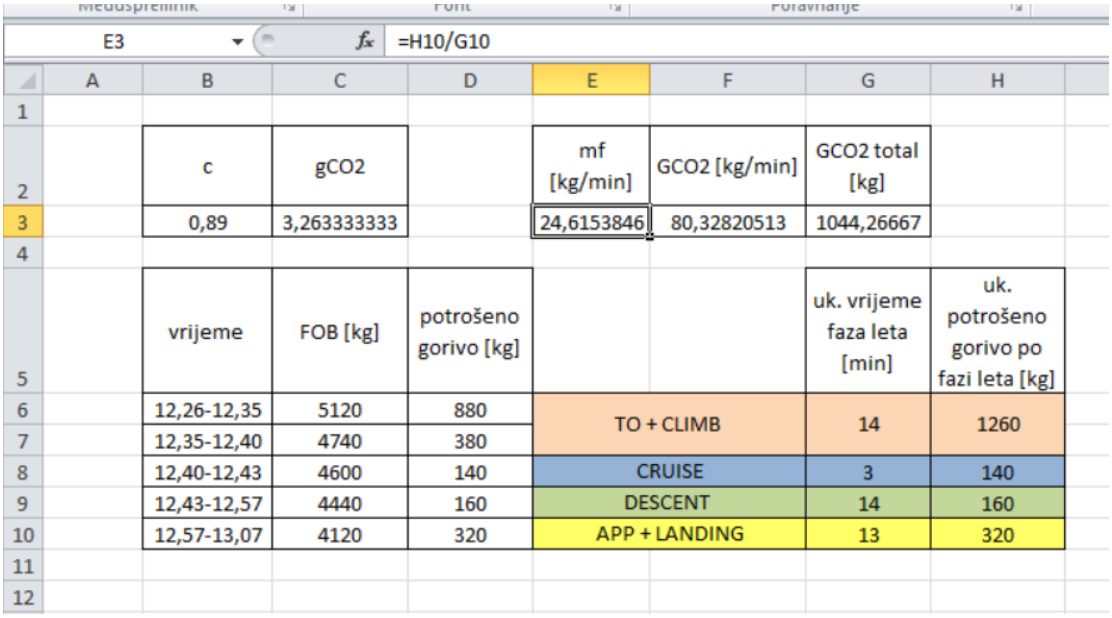
5.5.2. Izračun stvarnih emisija ugljičnog dioksida za faze prilaza i slijetanja

Budući da je u zabilježenoj količini i potrošnji goriva na slijetanju uključeno i taksiranje do stajanke, uzima se vrijeme parkiranja u ukupno vrijeme trajanja ove faze. Iz zapisa pilota je slijetanje završeno u 13.08 h, a parkiranje u 13.15 h. Razlog tako dugog vremeskog trajanja za izlaz i parkiranje na stajanci je što piloti zaokružuju minutažu na 0 i 5. Vjerojatno u to vrijeme bila neka gužva pa je trebalo možda 3 minute za parkiranje, ali je zaokruženo da je trajalo do 13.15 h. Kako bi izračun bio bliži stvarnim emisijama ugljičnog dioksida, vrijeme parkiranja je zaokruženo na 13:10 h. U točki NERRA je zabilježena količina goriva 4440 kg, a potrošnja od 1650 kg goriva. Nakon parkiranja, zabilježeno preostalo gorivo je iznosilo 4120 kg, a potrošnja 1890 kg. Ponovno su radi točnijeg izračuna uzimate količine goriva u zrakoplovu umjesto zabilježene potrošnje koje nisu pouzdane koliko i prikaz količine goriva u zrakoplovu, tako da je razlikom brojeva 4440 i 4120 dobivena potrošnja od 320 kg za fazu prilaza i slijetanja. U točki NERRA se zrakoplov nalazio u 12.57, a sa zaokruženim vremenom parkiranja dobiva se ukupno vrijeme trajanja faze od 13 minuta što je prikazano na slici 32.

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140
12,43-12,57	4440	160	DESCENT	14	160
12,57-13,07	4120	320	APP + LANDING	13	320

Slika 32 Prikaz ukupne potrošnje goriva i ukupnog vremena trajanja faze prilaza i slijetanja

Na slici 33 je prikazan izračun masenog protoka goriva, stavljajući u izračun potrošnju goriva u vremenu u kojem je potrošeno.



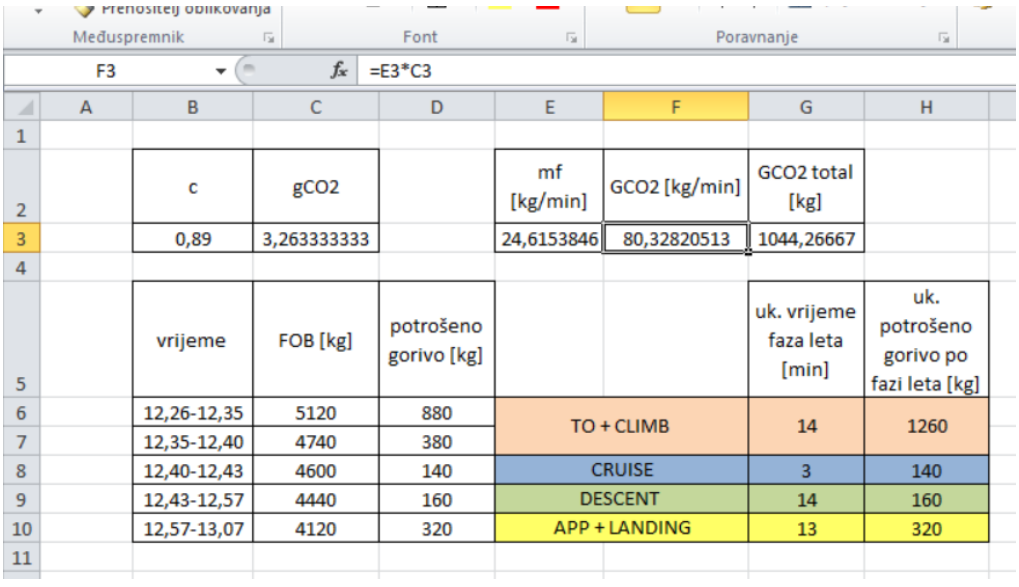
E3 =H10/G10

	c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
	0,89	3,263333333		24,6153846	80,32820513	1044,26667

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140
12,43-12,57	4440	160	DESCENT	14	160
12,57-13,07	4120	320	APP + LANDING	13	320

Slika 33 Prikaz izračuna masenog protoka goriva za fazu prilaza i slijetanja

Maseni protok je potreban za izračun proizvodnje kilograma ugljičnog dioksida po minuti faze prilaza i slijetanja s gorivom koje se koristilo za let. Na slici 34 je prikazan izračun.



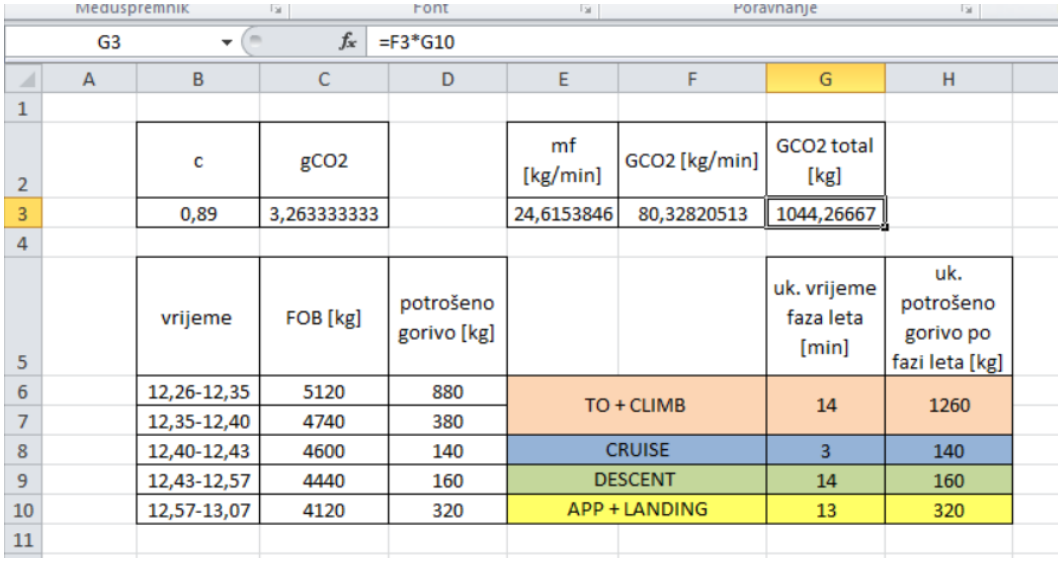
F3 =E3*C3

	c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
	0,89	3,263333333		24,6153846	80,32820513	1044,26667

vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB	14	1260
12,35-12,40	4740	380			
12,40-12,43	4600	140	CRUISE	3	140
12,43-12,57	4440	160	DESCENT	14	160
12,57-13,07	4120	320	APP + LANDING	13	320

Slika 34 Prikaz izračuna količine CO_2 po minuti faze prilaza i slijetanja

Na kraju je količina ugljičnog dioksida po minuti pomnožena s ukupnim trajanjem faze koje iznosi 13 minuta te je dobivena konačna količina emisija CO_2 za fazu koja iznosi 1044,267kg (slika 35).



Međuspremnik | Font | Poravnanje

G3 | =F3*G10

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]	
3		0,89	3,263333333		24,6153846	80,32820513	1044,26667	
4								
5		vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
6		12,26-12,35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
7		12,35-12,40	4740	380				
8		12,40-12,43	4600	140	CRUISE		3	140
9		12,43-12,57	4440	160	DESCENT		14	160
10		12,57-13,07	4120	320	APP + LANDING		13	320
11								

Slika 35 Prikaz izračuna CO_2 za fazu prilaza i slijetanja

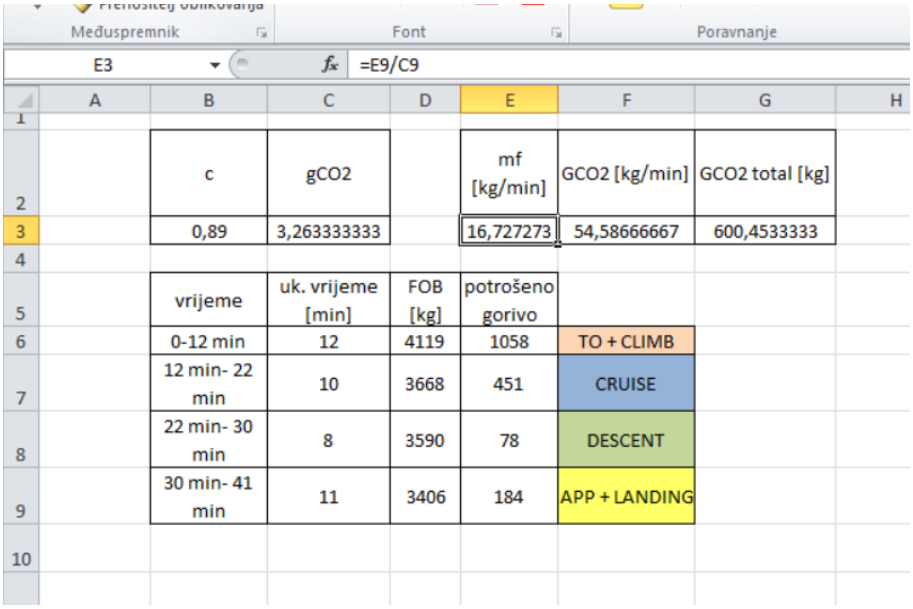
5.5.3. Izračun emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja

Pretpostavka je da je planirana količina i potrošnja goriva koja je isprintana na planu leta gorivo u trenutku slijetanja. Ukupno vrijeme trajanja faze prilaza i slijetanja traje 11 minuta, a potrošeno je 184 kg goriva tijekom njezinog trajanja. Na slici 36 je prikazano količina goriva i ukupno trajanje faze.

vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]	
0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB
12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE
22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT
30 min- 41 min	11	3406	184	APP + LANDING

Slika 36 Prikaz ukupnog trajanja faze prilaza i slijetanja te planirane potrošnje i količine goriva

Za potrebe izračuna emisija ugljičnog dioksida u toj fazi, potrebno je prvo izračunati maseni protok goriva. Prikaz izračuna masenog protoka goriva je prikazan na slici 37.



Međuspremnik | Font | Poravnanje

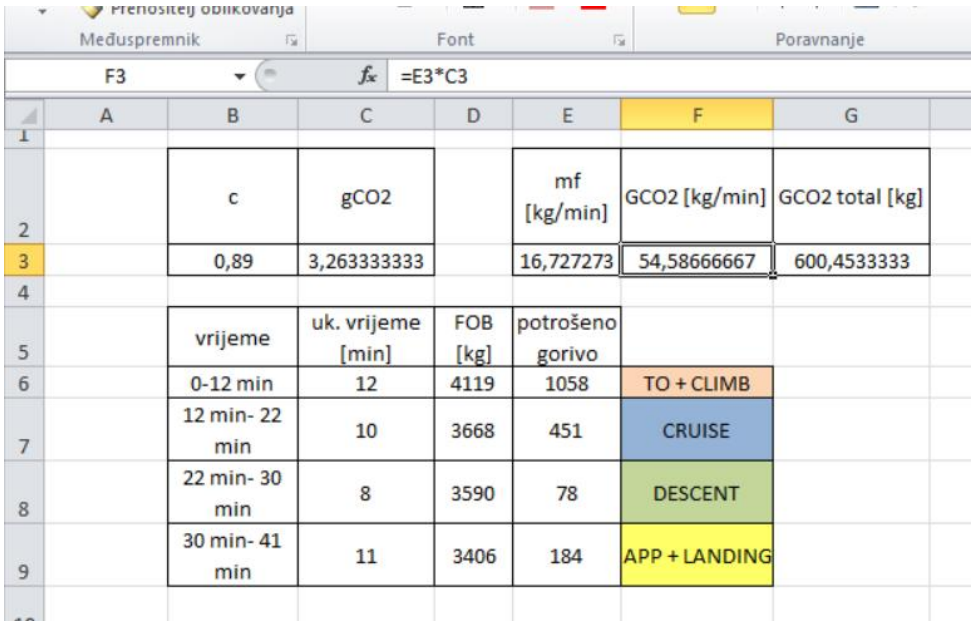
E3 | =E9/C9

	c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
3	0,89	3,263333333		16,727273	54,58666667	600,4533333

vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo	
0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB
12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE
22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT
30 min- 41 min	11	3406	184	APP + LANDING

Slika 37 Prikaz izračuna masenog protoka goriva za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja

Dobiveni maseni protok goriva je relativno mali, ali je očekivan s obzirom da je potrošnja goriva u fazi mala te je podijeljena na 11 minuta. Sljedeće se može izračunati koliko bi se ispustilo kilograma CO_2 u jednoj minuti faze prilaza i slijetanja. Izračun je prikazan na slici 38.



Međuspremnik | Font | Poravnanje

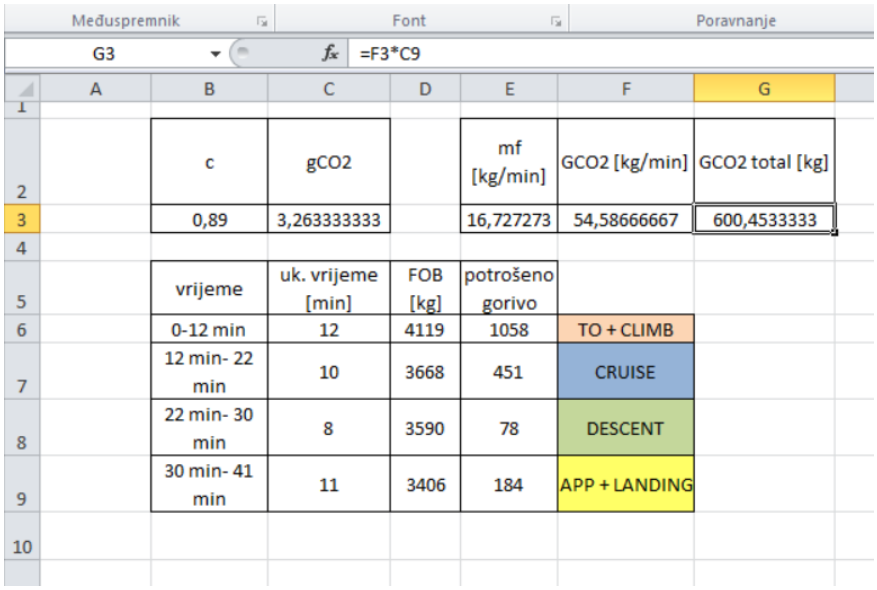
F3 | =E3*C3

	c	gCO2		mf [kg/min]	GCO2 [kg/min]	GCO2 total [kg]
3	0,89	3,263333333		16,727273	54,58666667	600,4533333

vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo	
0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB
12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE
22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT
30 min- 41 min	11	3406	184	APP + LANDING

Slika 38 Prikaz izračuna emisija CO_2 za planiranu potrošnju goriva u jednoj minuti faze

Napokon se može izračunati kolike su planirane emisije ugljičnog dioksida za fazu prilaza i slijetanja što je prikazano na slici 39. Izračunate emisije bi iznosile 600,4533333 kg CO_2 za 11 minuta prilaza i slijetanja.



Slika 39 Prikaz izračuna CO_2 za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja

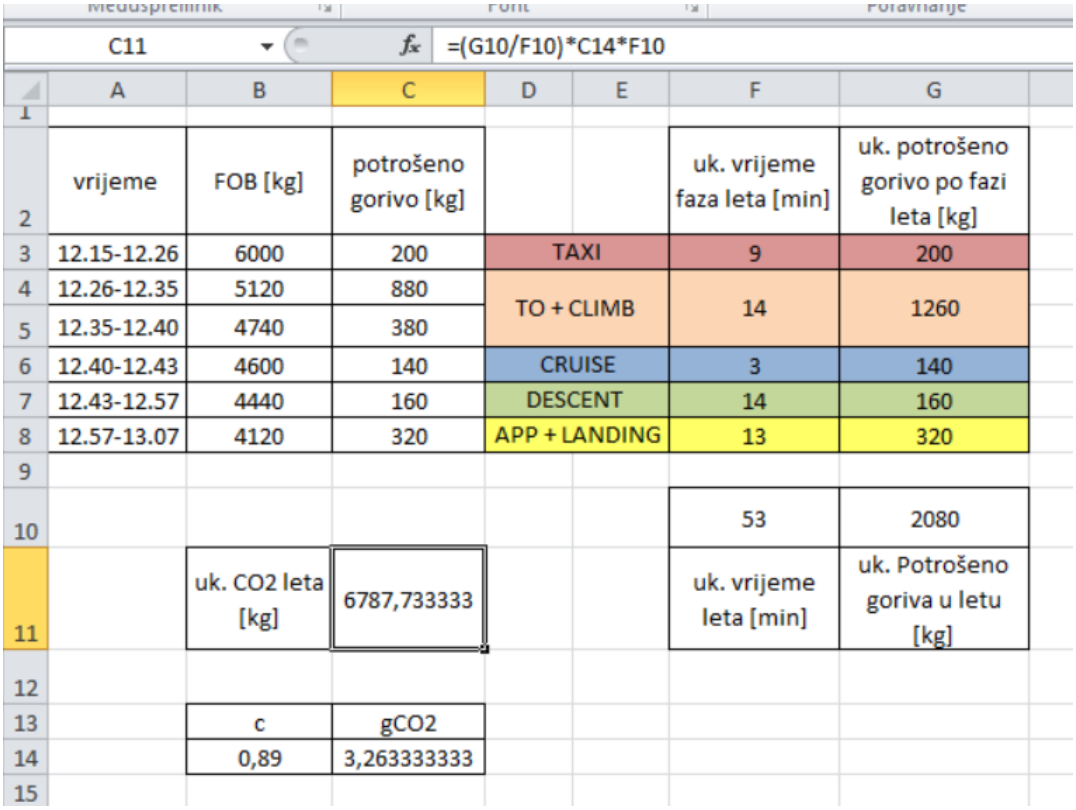
5.5.4. Usporedba stvarnih emisija i emisija ugljičnog dioksida za planiranu potrošnju goriva u fazi prilaza i slijetanja

Uspoređujući dobivene rezultate emisija ugljičnog dioksida za stvarnu i planiranu potrošnju goriva, jasno je vidljiva razlika u količini proizvedenog CO_2. Prema stvarnoj potrošnji goriva je u fazi prilaza i slijetanja proizvedeno 1044,26667 kg CO_2, a za planiranu potrošnju u toj fazi je količina proizvedenog CO_2 600,4533333 kg. Razloga može biti više, jasno je samo da je u stvarnosti potrošeno skoro duplo više goriva nego što je planirano, a uključeno je i taksiranje do stajanke.

5.6. Izračun ukupnih emisija ugljičnog dioksida za let

U ovom podpoglavlju će se usporediti ukupne emisije za stvarnu i planiranu potrošnju goriva te dobiveni podaci iz progarama NEST. Za stvarnu potrošnju goriva su uključeni vrijeme i potrošnja goriva za taksiranje na Zračnoj luci Zagreb te vrijeme i potrošnja goriva za taksiranje na Zračnoj luci Dubrovnik koji su pribrojeni fazi prilaza i slijetanja. Za planiranu potrošnju goriva prema planu leta nema podataka za potrošnju i

vrijeme taksiranja na obje zračne luke tako da nisu uzete u obzir. Na slici 40 je prikazana izračunata količina emisija za stvarnu potrošnju goriva tijekom cijelog leta. Izračun je rađen na istom principu kao i za svaku pojedinu fazu leta.

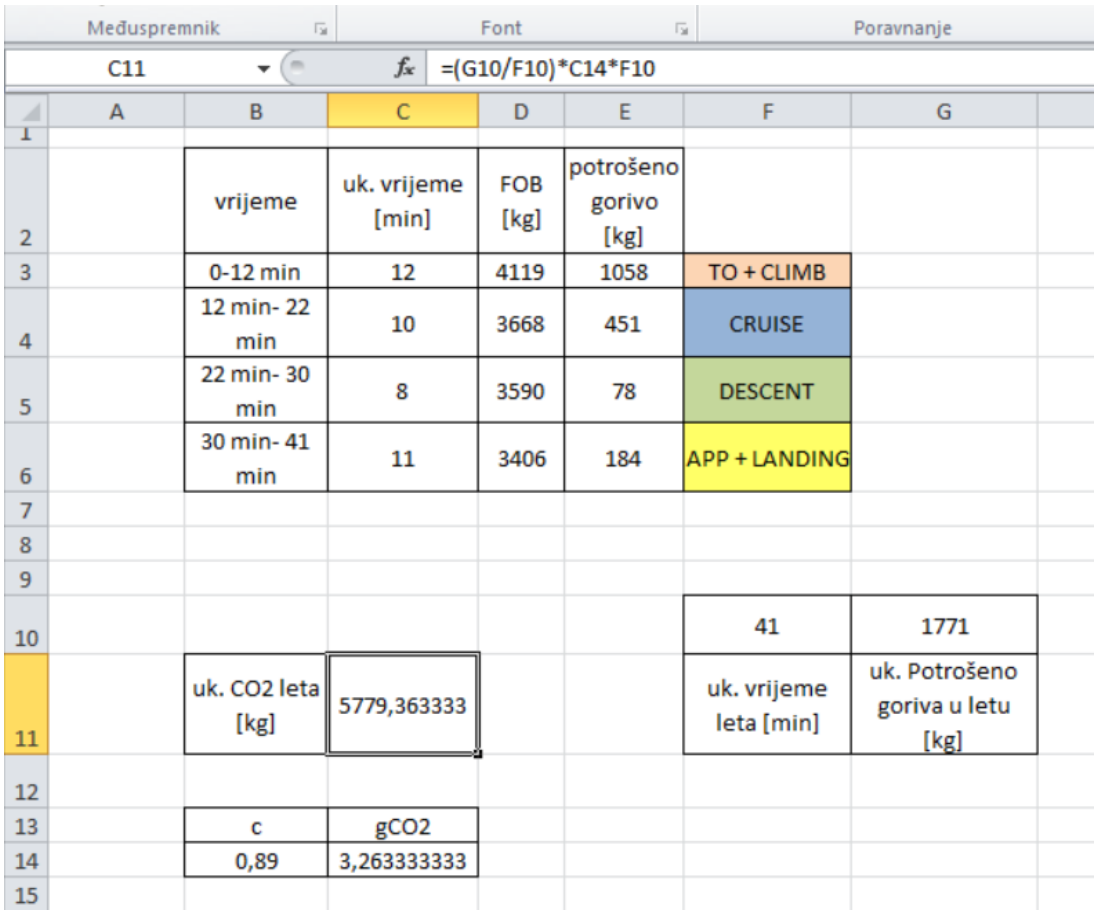


C11 | =(G10/F10)*C14*F10

	A	B	C	D	E	F	G
2	vrijeme	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]			uk. vrijeme faza leta [min]	uk. potrošeno gorivo po fazi leta [kg]
3	12.15-12.26	6000	200	TAXI		9	200
4	12.26-12.35	5120	880	TO + CLIMB		14	1260
5	12.35-12.40	4740	380				
6	12.40-12.43	4600	140	CRUISE		3	140
7	12.43-12.57	4440	160	DESCENT		14	160
8	12.57-13.07	4120	320	APP + LANDING		13	320
9							
10						53	2080
11		uk. CO2 leta [kg]	6787,733333			uk. vrijeme leta [min]	uk. Potrošeno goriva u letu [kg]
12							
13		c	gCO2				
14		0,89	3,263333333				
15							

Slika 40 Prikaz izračuna emisija CO_2 za cijeli let prema stvarnoj potrošnji goriva

Na slici 41 je prikazan izračun za cijeli let prema planiranoj potrošnji goriva s time da nisu uključena vremena i potrošnje goriva za vrijeme taksiranja.



Međuspremnik | Font | Poravnanje

C11 | =(G10/F10)*C14*F10

	A	B	C	D	E	F	G
2		vrijeme	uk. vrijeme [min]	FOB [kg]	potrošeno gorivo [kg]		
3		0-12 min	12	4119	1058	TO + CLIMB	
4		12 min- 22 min	10	3668	451	CRUISE	
5		22 min- 30 min	8	3590	78	DESCENT	
6		30 min- 41 min	11	3406	184	APP + LANDING	
10						41	1771
11		uk. CO2 leta [kg]	5779,363333			uk. vrijeme leta [min]	uk. Potrošeno goriva u letu [kg]
13		c	gCO2				
14		0,89	3,263333333				

Slika 41 Prikaz izračuna emisija CO_2 za cijeli let prema planiranoj potrošnji goriva

Usporedbom dobivenih izračuna se vidi jasna razlika od čak jedne tone emisija ugljičnog dioksida. Kao što je već spomenuto, vrijeme trajanja leta je kraće te je ukupna potrošnja goriva nešto manja jer nema podataka za taksiranje.

Za podatak ukupne proizvedene količine emisije ugljičnog dioksida za let iz programa NEST se koristila usporedba simuliranih letova te su zato dobiveni isti rezultati za referencu i scenarij. Na slici 42 je prikazana dobivena količina CO_2 tijekom leta.

J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
		Reference						Scenario		
Length (NM)	Time (min)	Fuel (kg)	CO2 (kg)	NOx (kg)		Length (NM)	Time (min)	Fuel (kg)	CO2 (kg)	NOx (kg)
231.667	39.316	1761.490	5566.320	32.451		231.667	39.316	1761.490	5566.320	32.451
231.667	**39.316**	**1761.490**	**5566.320**	**32.451**		**231.667**	**39.316**	**1761.490**	**5566.320**	**32.451**

Slika 42 Prikaz ukupnih emisija CO_2 za cijeli let iz programa NEST

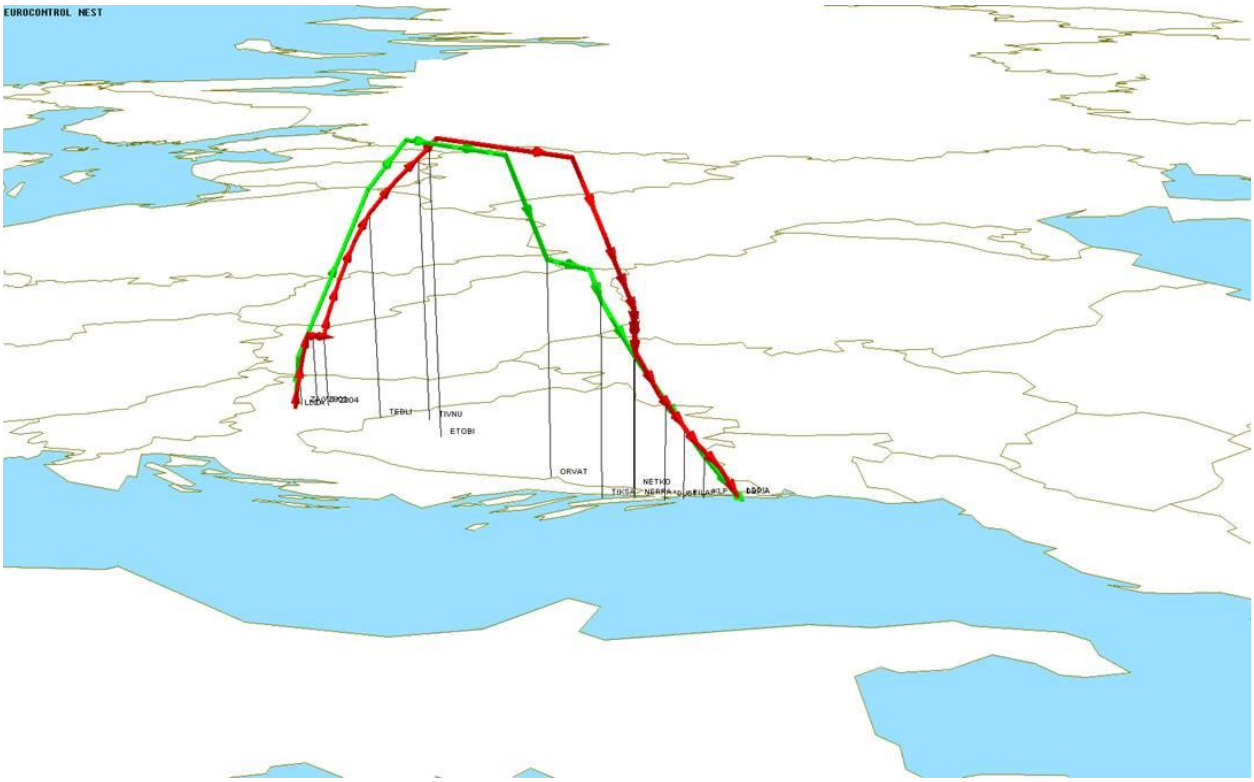
Prema dobivenim podacima je vidljivo da je količina CO_2 sličnija emisijama za planiranu potrošnju goriva što je i očekivano jer se u programu NEST radi izračun prema zadnjem podnesenom planu leta.



Slika 43 Prikaz 2D putanje leta za podneseni i simulirani plan leta

Na slici 43 i 44 su prikazane putanje leta za podneseni plan leta (crveno) i simulirani plan leta (zeleno). Simulirani plan leta je plan leta izračunat prema najkraćoj udaljenosti od aerodroma polaska do odredišnog aerodroma. Na slici 43 je prikazana 2D putanja leta na kojoj se jasno vide točke po kojima je zrakoplov letio te

je planirano da će slijediti TEBLI 6C standardni instrumentalni odlazak (eng. *Standard Instrument Departure-SID*) za USS-u 04. Također, planiran je dolazak prema NERRA 2X STAR-u za USS-u 11. Na slici 44 je prikazana 3D putanja leta na kojoj se otprilike vide visine penjanja, krstarenja i spuštanja.



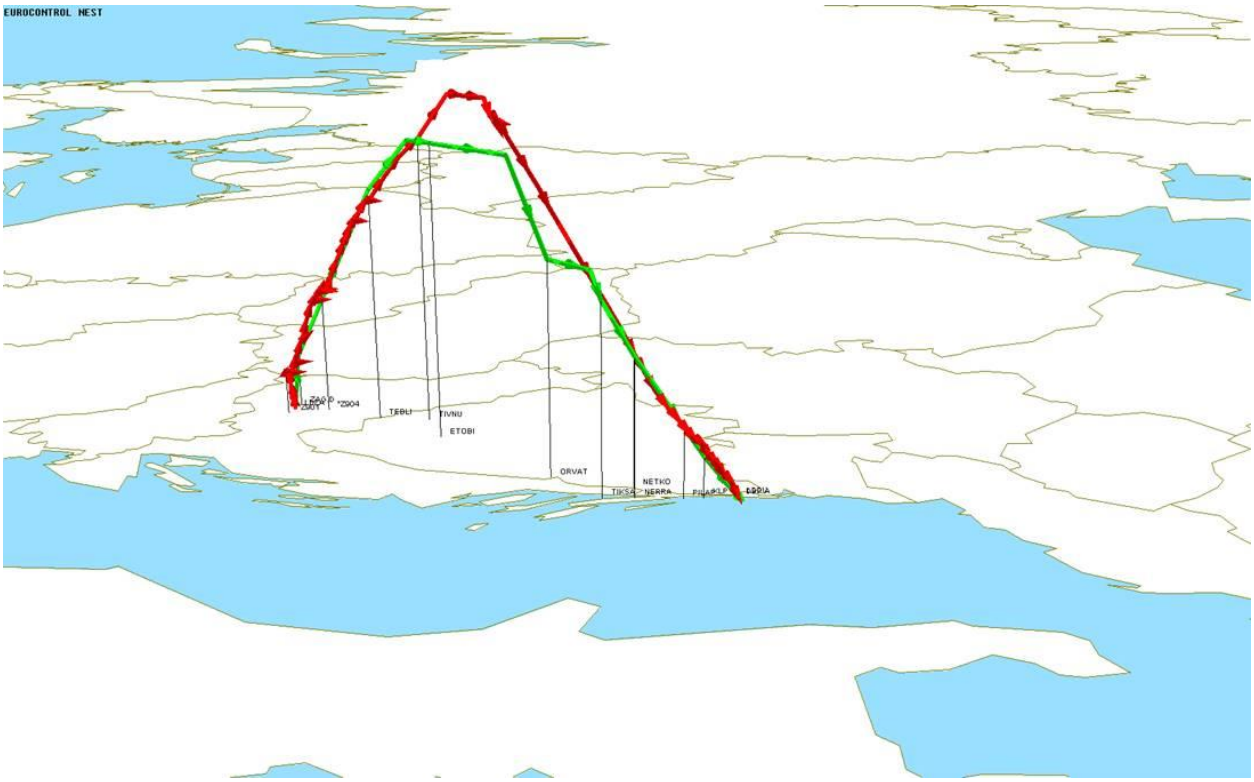
Slika 44 Prikaz 3D putanje leta za podneseni i simulirani plan leta



Slika 45 Prikaz 2D putanje leta za stvarni i simulirani plan leta

Na slici 45 je prikazan 2D prikaz za stvarni (crveno) i simulirani (zeleno) plan leta. Simulirani plan leta je ponovno prilagođen u programu kao najkraća ruta koju zrakoplov može letjeti, ali najčešće je nerealna za stvarne situacije. Sa slike je vidljivo da je u stvarnosti zrakoplov poletio sa USS-e 22 te je vjerojatno slijedio TEBLI 5J SID. Za dolazak na Zračnu luku Dubrovnik je zapisano da je zrakoplov dobio instrukciju da slijedi NERRA 2X STAR, ali čini se da je u nekom trenutku dobio vektore za razdvajanje ili sekvenciranje.

Na slici 46 je prikazan 3D putanja leta prema stvarnom i simuliranom planu leta. Iz prikazanog kuta je uočljivo da je pilot tražio krstarenje na većoj razini leta (FL310) od one planirane (FL270), ali prema zapisima se poznato da je dobio odobrenje za penjanje do FL290. Također je vidljivo da je krstarenje trajalo puno kraće te da nastupilo nešto kasnije od planiranog.

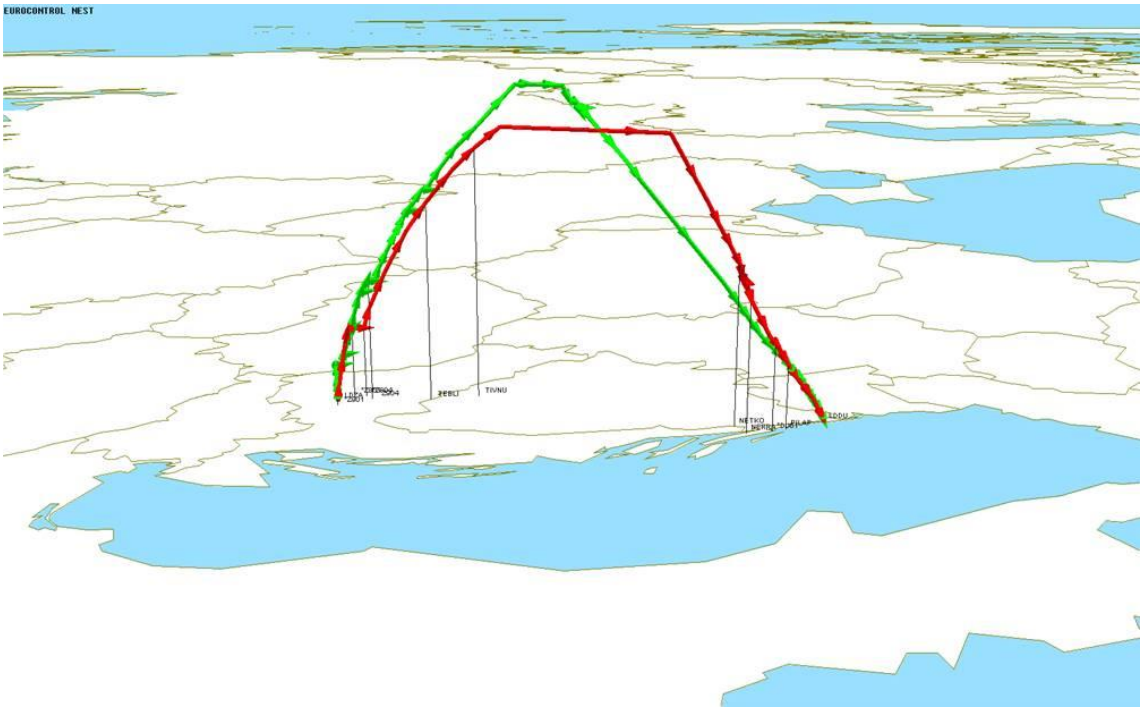


Slika 46 Prikaz 3D putanje leta za stvarni i simulirani plan leta

Na slici 47 i 48 su prikazane 2D i 3D putanje leta za stvarni i planirani plan leta kao konačna usporedba. Na obje slike je uočljiva razlika u stazi za polijetanje, a time i različiti zadani SID kao i STAR-ovi za prilaz. Krstarenje je počelo nešto kasnije od planiranog (2 minute nakon točke TIVNU za razilku od planiranog), a vidi se i da je trajanje krstarenja trajalo puno kraće (3 minute stvarnog krstarenja u odnosu na planirano od 10 minuta). Kod faze krstarenja je još prepoznata veća visina u odnosu na onu planiranu jer je pilot tražio penjanje na FL310, ali je zaustavljen ili odobren samo do FL290.



Slika 47 2D prikaz usporedbe stvarne i putanje leta prema podnesenom planu leta



Slika 48 3D prikaz usporedbe stvarne i putanje leta prema podnesenom planu leta

6. Mjere za smanjenje emisija ugljičnog dioksida

Uvođenjem različitih operativnih mjera pruža se najučinkovitiji način smanjenja zrakoplovnih emisija, a postiže se smanjenom potrošnjom goriva po letu (izgaranjem 1 litre zrakoplovnog goriva nastaje otprilike 3,15 tona CO_2). Dodatno, njihovom upotrebom se smanjuju troškovi goriva te nisu potrebne nikakve nove skupe tehnologije ili oprema. Takve mjere još se nazivaju metodama učinkovitog trošenja goriva (eng. *Fuel Efficiency*).

Sve operativne mjere opisane u ovom poglavlju rezultat su raznih programa koji su razvijeni s ciljem smanjenja potrošnje goriva. Jedan od tih programa je i EU ETS program Europske unije za trgovanje stakleničkim plinovima kojim se zračnim prijevoznicima dopušta točno određena količina emisija stakleničkih plinova po unaprijed određenim kriterijima.

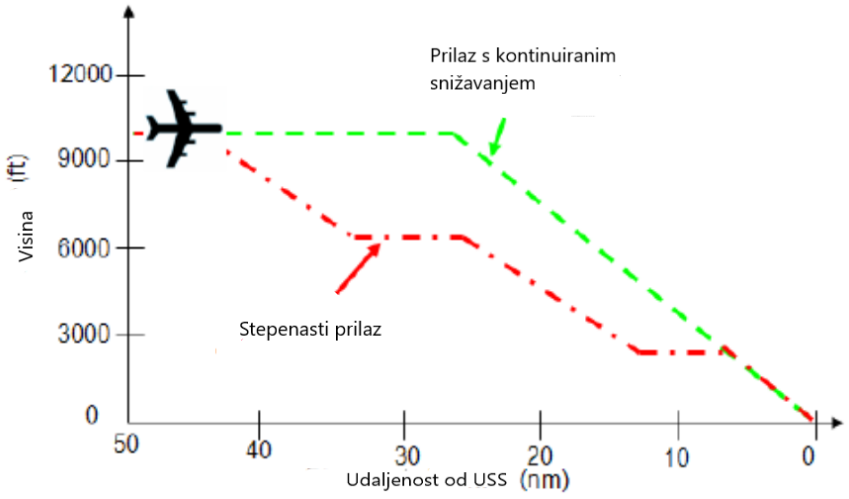
Dvije najvažnije mjere koje se koriste za učinkovito trošenje goriva su prilaz s kontinuiranim snižavanjem (eng. *Continuos Descent Approach*- CDA) i taksiranje pomoću jednog motora, a ostali načini za smanjenje potrošnje goriva uključuju: smanjenu masu zrakoplova, let na optimalnim visinama i s optimalnim brzinama, optimalna pozicija težišta, pravilno održavanje zrakoplova te korištenje manjih stupnjeva zakrilaca.

6.1. Prilaz s kontinuiranim snižavanjem (Continuous Descent Approach)

Prilaženje s kontinuiranim snižavanjem (eng. *Continuous Descent Approach- CDA*) je tehnika spuštanja zrakoplova s optimalne visine i minimalnim potiskom. Glavna značajka ovog prilaza je ipak, kako i samo ime govori, kontinuirano snižavanje što znači da nema stepenasti profil spuštanja.

Na slici 55 je vidljivo da s CDA, za razliku od konvencionalnog prilaza nema „lomljenja" profila spuštanja nego je putanja snižavanja linearna. Takvo idealno spuštanje počinje od vrha snižavanja (eng. *Top Of Descent- TOD*), a završava s finalnim prilazom (eng. *final approach*). Prilaz s kontinuiranim snižavanjem nije primjenjiv u svakoj situaciji i za svaki zrakoplov.

Prednost koju donosi prilaz s kontinuiranim snižavanjem je duži let na većoj visini s manjim potiskom koji rezultira s manjom potrošnjom goriva, a time i manjom emisijom štetnih plinova te manjom bukom, ali ovisi o rukovođenju zračnim prostorom i ograničenjem kapaciteta prostora. [11]



Slika 49 Prikaz CDA i konvencionalnog stepenastog prilaza

6.2. Taksiranje pomoću jednog motora

Taksiranje je operacija na zračnim lukama koja podrazumijeva značajno korištenje snage motora, tj. potrošnje goriva te proizvodnja emisija štetnih plinova. U većini slučajeva taksiranje ne traje dugo u odnosu na druge faze leta, međutim, korištenje motora nije optimalno za taj period djelovanja. Smanjeno izgaranje motora se može osigurati smanjenim korištenjem pomoćnog pogonskog sustava (eng. *Auxiliary Power Unit-APU*), optimalnom brzinom taksiranja, ali i taksiranjem samo jednim motorom. Poznato je da unutar obitelji zrakoplova tipa A320 jedna minuta taksiranja potroši 10-13 kg goriva, a taksiranje s jednim motorom može smanjiti izgaranje i emisije CO_2 za 20%-40%.

Iako je taksiranje s jednim motorom dobro rješenje za smanjenje potrošnje goriva, nije uvijek primjenjivo, a utječe i mnogo prepreka za mogućnost provođenja:

- meteorološki uvjeti (kiša, vjetar, magla..)
- zabranjeno je na nekim zračnim lukama
- mijenja se pokretljivost i ravnoteža zrakoplova
- mogućnost zapaljenja motora pri odlasku
- osjetljivo vrijeme zagrijavanja i hlađenja motora [12]

Iz primjera plana leta na temelju kojeg su rađeni izračuni u petom poglavlju, zrakoplov A319 je potrošio 200 kg goriva od micanja kočnica do polijetanja. Spomenuto gorivo je potrošio u razdoblju od 11 minuta, ali osim taksiranja je u tom vremenu uključen i *push-back* te čekanje dozvole za polijetanje.

6.3. Smanjena masa zrakoplova

Smanjenje mase zrakoplova utječe na potrošnju goriva koja posljedično utječe na smanjenu količinu emisija štetnih plinova. Na primjer, 500 kg dodatne težine na zrakoplovu ostvaruje dodatnu potrošnju od 125 do 225 kg goriva te povećanje emisije CO_2 od 390 kg do 710 kg za let koji traje 10 sati. Na masu zrakoplova se može utjecati preko smanjenja mase praznog zrakoplova te preko korištenja optimalnih rezervi goriva.

6.3.1. Smanjenje mase praznog zrakoplova

Masa praznog zrakoplova podrazumijeva masu zrakoplova bez mase natočenog goriva. Prvi korak prema reduciranju mase samog zrakoplova je konstrukcija skeleta s manjom masom, konstrukcija motora i opreme zrakoplova lakšim materijalima, odnosno kompozitima te s manje složenim sklopovima [13].

Oprema u zrakoplovu se može razvrstati u dvije kategorije: sigurnosna oprema i komercijalna oprema. U sigurnosnu opremu spadaju maske za kisik, prsluci za spašavanje, pribor za prvu pomoć itd. te se mora poštivati količina propisane sigurnosne opreme jer njezin manjak ne smije utjecati na sigurnost putnika. Komercijalna oprema omogućava udobnost putnika tijekom leta te nema propisanu količinu za let. Većina takvih predmeta nisu od osnovne važnosti za let te se njihov izostanak može primjeniti.

Neki od primjera za reduciranje mase zrakoplova su:

Prijedlog za reduciranje mase:	Obrazloženje:
Reduciranje količine pitke vode na letu	Optimiziranje količine pitke vode prema potrebama za svaki let
Micanje komponenata iz kuhinje	Grijači za vodu, pećnice i aparati za kavu nisu potrebni na svim letovima

Češće pražnjenje spremnika za otpad	Češćim pražnjenjem se smanjuje masa zrakoplova
Korištenje lakših cargo kontejnera na letu	Dostupni su puno lakši kontjeneri od aluminija
Micanje drugog APU generatora	Drugi APU nije uvijek potreban, a može osigurati manjak od 45 kg na letu
Reduciranje časopisa, kataloga i drugih materijala u pretincu sjedala	Ukupna masa svih časopisa nadodaje značajnu kilažu koja nije potrebna
Smanjenje nošenja bescarinskih (eng. *duty-free*) predmeta	Komercijalni čimbenici mogli bi biti uzeti u obzir.

Na prikazanoj slici tablice je prikazana ušteda goriva na pojedinim tipovima zrakoplova s redukcijom mase od 2250 kg. Najveća promjena se može vidjeti za zrakoplov B737 gdje je potrošnja goriva čak 5% manja u odnosu na prijašnju potrošnju bez smanjenja mase zrakoplova.

Tip zrakoplova	Ušteda goriva	
	Litre po godini po zrakoplovu	Postotak
B707	614 000	0.5
B727	422 000	2.4
B737	198 000	5.0
B747	1 310 000	0.6
DC-9	243000	3.5
DC-10	272000	0.9
MD-11	253000	0.8

Slika 50 Ušteda potrošnje goriva sa smanjenom masom zrakoplova

6.3.2. Korištenje optimalnih rezervi goriva

Količina goriva u zrakoplovu je do deset puta veća od mase putnika u zrakoplovu što znači da svaki kilogram goriva koji se može izostaviti stvara veliki potencijal za smanjeno izgaranje goriva. Ovisno o tipu zrakoplova, trajanju leta, profilu leta i brzini, svaka dodatna količina goriva na letu rezultira povećanim izgaranjem goriva od 2,5 do 4,5% za dodatnu masu goriva na letu u jednom satu. Pravilo je da se unosi minimalna sigurna rezerva goriva na letu kako bi se smanjilo izgaranje goriva.

Unutar ICAO Dokumenta 9976, Dodatka 6 (eng. *Annex*) su postavljene smjernice za nošenje minimalne količine goriva na letu koje su osnova za uspostavu državnih propisanih količina minimalnog goriva kao i za upravljanje planiranjem goriva. Količina potrebne rezerve goriva dakle ovisi o regulatornim zahtjevima, izbor alternativnog aerodroma, politici aviokompanije o količini rezerve goriva i slično.

Minimalna potrebna količina goriva u zrakoplovu podrazumijeva sigurno provođenje leta, a uključuje sljedeće radnje:

1. pokretanje motora, korištenje APU i taksiranje
2. polijetanje, let do odredišnog aerodroma, prilaz i slijetanje
3. postupak neuspjelog prilaženja te prilaz i slijetanje na alternativni aerodrom (u slučaju 2 alternativna aerodroma, goriva mora biti dovoljne količine goriva za onaj udaljeniji aerodrom)
4. nepredvidljive situacije na ruti (loši meteorološki uvjeti, neplanirane razine leta, odstupanje od planirane rute itd.)
5. konačna rezerva goriva (količina goriva potrebna za let od 30 minuta za mlazne zrakoplove na brzini čekanja na visini od 1500 stopa iznad alternativnog aerodroma u standardnim uvjetima)
6. dodatno gorivo ako je potrebno (količina goriva potrebna za 15 minuta leta iznad aerodroma u standardnim uvijetima) [13]

U određenim situacijama se u zrakoplov ukrcava i gorivo za idući let, što se naziva *Fuel tankering*. *Fuel tankering* se većinom prakticira radi manjih troškova, odnosno aviokompanije se opskrbljuju dodatnim gorivom u državama gdje su cijene goriva jeftinije, ali i u situacijama nedostatka goriva na odredišnom aerodromu, lošije kvalitete goriva itd. Zrakoplovne kompanije redovno provjeravaju cijene goriva na pojedinim

aerodromima te računaju isplativost *Fuel tanking*-a budući da u nekim europskim zemljama cijene variraju čak do 15%. Prilikom provođenja takvog opskrbljivanja gorivom treba uzeti u obzir vrijeme trajanja leta, razine leta, povećane mase zrakoplova s dodatnim gorivom što rezultira s povećanom potrošnjom goriva kao i emisijama stakleničkih plinova.

6.4. Optimalna pozicija težišta zrakoplova

Učinkovito upravljanje pozicijom težišta zrakoplova (eng. *Centre of Gravity*- CG) može dovesti do značajnih ušteda izgaranja goriva imajući na umu kako CG utječe na aerodinamiku zrakoplova. Ušteda goriva može biti do 0,05% za svaki postotak pomaka težišta k optimalnoj poziciji, ali to ovisi o uvjetima. Što je težište više prema naprijed (bliže nosu zrakoplova), to je potrebna veća sila na horizontalnom stabilizatoru koja treba biti uravnotežena radi povećanog uzgona na krilima što rezultira povećanim induciranim otporom. Udaljeniji CG (prema repu zrakoplova) će imati manji otpor, a time i učinkovitiju potrošnju goriva.

Raspon težišta je ograničen s utjecajem na stabilnost zrakoplova. Zato se za izračun pozicije težišta mora uzeti u obzir da se izgaranjem goriva masa zrakoplova postepeno smanjuje te može izazvati pomak težišta. Neki zrakoplovi imaju spremnik za gorivo koji im se nalazi u repu što olakšava postizanje učinkovitije pozicije težišta. Prijenosni sustav spremnika omogućava prebacivanje goriva prema i iz spremnika kako bi se očuvala željena pozicija težišta tijekom leta.

Učinci pozicije težišta na potrošnju goriva se mogu izraziti kao utjecaj na specifični domet (eng. *Specific Range*). Specifični domet se izražava kao udaljenost koju zrakoplov prijeđe po jedinici utrošenog goriva. Za neke zrakoplove koji lete na optimalnoj visini, CG koji je u najbližoj točki (prema naprijed) može smanjiti specifični domet do 1,8%, a naudaljeniji (prema nazad) može povećati specifični domet do 1,8% u usporedbi s referentnim CG. Utjecaj ovisi o tipu zrakoplova, a neki zrakoplovi imaju i automatski sustav za upravljanje pozicijom težišta [13].

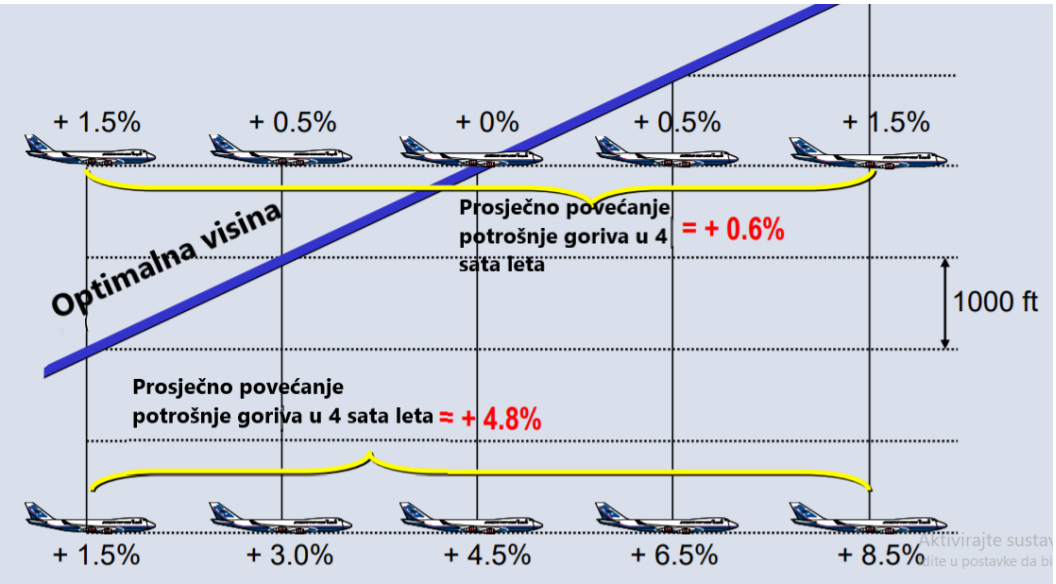
6.5. Korištenje manjih stupnjeva zakrilaca

Zakrilca su upravljačke površine na krilu zrakoplova koje mijenjaju ukupan uzgon krila na način da povećavaju zakrivljenost profila krila, ali i u slučaju *Fowlerov*-og zakrilca, povećava se površina krila. Rezultat izvlačenja zakrilaca, osim povećanja uzgona, je i povećanje aerodinamičkog otpora. Zakrilca se aktiviraju kada je brzina zrakoplova mala, odnosno pri polijetanju i slijetanju. Postavljanjem manjih stupnjeva otklona zakrilaca, povećanje uzgona i otpora je manje, te će potrošnja goriva biti manja. Također, s manjim stupnjem otklona se postižu bolje performanse penjanja.

6.6. Let na optimalnim visinama i s optmalnim brzinama

Optimalna visina se definira kao visina na postavci tlaka koja za zadanu masu i brzinu zrakoplova postiže najveći domet po jedinici goriva. Optimalna visina je promjenjiva jer ovisi o masi i atmosferskim uvjetima pa će tako za manju masu zrakoplova optimalna visina biti veća, a s povećanjem temperature će optimalna visina biti manja.

Na slici 51 su prikazane situacije potrošnje goriva sa stepenastim i nestepenastim penjanjem. Nestepenasto penjanje prati optimalnu visinu te je vidljivo da na 4000 ft kada se visina krstarenja i visina penjanja poklapaju u istoj točki, povećanja potrošnja goriva iznosi 0%. Također, sa slike je jasno uočljivo da je na većim visinama manje prosječno povećanje potrošnje goriva u razdoblju od 4 sata krstarenja u odnosu na manje visine.



Slika 51 Prikaz pimjera povećane potrošnje goriva s visinama

Brzina za najveći dolet jednaka je odnosu brzine TAS (*True Air Speed*) i otpora za mlazne motore. Preporučeno je korištenje malo većih brzina koje neće previše utjecati na dolet, ali povećavaju stabilnost zrakoplova. Potrebno je još uzeti u obzir i vjetar, koji, ukoliko nije povoljan, ostvaruje manji dolet na istoj visini.

6.7. Propisno održavanje zrakoplova

Održavanje zrakoplova se dijeli na održavanje konstrukcija, odnosno vanjskih površina zrakoplova te održavanje motora. Najveći uzrok povećanoj potrošnji goriva je loše stanje vanjskih površina zrakoplova, odnosno stvaranje povećanog otpora koji dolazi kao rezultat nepropisnog održavanja zrakoplova. Najčešći propusti u pravilnom održavanju zrakoplova su:

- preveliki razmaci između aerodinamičkih površina,
- loše postavljeni poklopci,
- nepotpuno uvlačenje pokretnih površina,
- oštećenja te nečistoće na aerodinamičkim površinama

6.7.1. Održavanje zrakoplovnih vrata

Posebna pozornost se mora posvetiti postavljanju i brtvljenju zrakoplovnih vrata jer nepravilno postavljena vrata ne samo da će poremetiti protok zraka, već može doći i do postupnog propuštanja zraka u kabinu. U oba slučaja dolazi do povećanja otpora na zrakoplovu.

6.7.2. Održavanje upravljačkih površina

Tolerancija na odstupanja kod postavljanja i namještanja upravljačkih površina manja je nego za ostale komponente zrakoplova, ali još uvijek ima načina za poboljšanje. Stupanj točnosti postavljanja upravljačkih površina znatno utječe na cjelokupnu učinkovitost zrakoplova, a time i na potrošnju goriva.

6.7.3. Nepravilnosti i oštećenja površine zrakoplova

Tijekom eksploatacije zrakoplova dolazi do raznih oštećenja, nepravilnosti te do zamora materijala i cijele konstrukcije. U nekim slučajevima i udari ptica, abrazija pijeskom te ostale nezgode dovode do neravnina i oštećenja na površinama zrakoplova. Te nepravilnosti ometaju struju zraka te se povećava otpor zrakoplova, a time i potrošnje goriva.

6.7.4. Točnost zrakoplovnih instrumenata

Pogrešno kalibrirani instrumenti također dovode do povećanja potrošnje goriva. Netočne informacije očitane s instrumenata ne samo da ne omogućavaju let u optimalnim uvjetima nego i utječu na sigurnost leta što je iznimno opasno. Takve netočnosti u prikazivanju machmetra od 0,01 povećavaju potrošnju goriva za 170 t goriva, dok pogreška visinomjera od 100 stopa povećava potrošnju za otprilike 100 tona godišnje po zrakoplovu. Razlog je što se ne leti na optimalnim visinama i s optimalnim brzinama, odnosno zbog krivih informacija prikazanih na instrumentima.

7. Zaključak

Iako međunarodno zrakoplovstvo iznosi oko samo 2% ukupnih emisija stakleničkih plinova u EU-u, ono je najbrži rastući izvor emisija koje doprinose klimatskim promjenama. Glavni razlog tome je rekordan rast prometa zbog većeg broja putnika, iako je u trenutnoj situaciji pandemije broj te sami rast putnika uvelike smanjen. Skoro godinu i pol nakon početka pandemije, prometna situacija i općenito zrakoplovstvo se jako dobro oporavilo te se može očekivati nastavak na porast broja putnika, a time i letova. Sektor zrakoplovstva je tek nedavno uključen u planove o smanjenju emisija stakleničkih plinova, na razini EU-a i na globalnoj razini što je zabrinjavajuće s obzirom na štetni utjecaj ugljičnog dioksida na atmosferu. Cilj je zadržavanje porasta prosječne temperature na globalnoj razini koja je niža od 2˚C u odnosu na razine predindustrijskog doba. Naravno, za porast temperature zemlje su odgovorni staklenički plinovi.

Prva rješenja za smanjenje emisija ugljičnog dioksida su dana s Protokolom iz Kyota te zatim Pariškim sporazumom, a nedugo zatim je i EU razvila svoj sustav za trgovanje i dozvole emisijama te se čak i ICAO potrudio uspostaviti svoj plan za smanjenje emisija. Sa spomenutim planovima i sustavima za smanjenje emisija se prate emisije stakleničkih plinova koje ispuštaju operateri te se i kažnjavaju ukoliko se prekorače dopuštene razine emisija. Emisijama se može trgovati ako postoji višak ili manjak, ali cijela odgovornost je aviokompanijama koje same moraju odrediti količinu emisija za godinu. Za podsjetnik, jedna dozvola iznosi jednu tonu emisija CO_2.

Uz pomoć danog plana leta aviokompanije za let koji je letio iz Zagreba za Dubrovnik dana 07.08.2021., napravljeni su izračuni proizvedene količine emisija ugljičnog dioksida za faze leta. Napravljena tablica daje uvid na emisije ugljičnog dioksida za faze koje uspoređuju stvarnu i planiranu potrošnju goriva.

Tablica 2 Usporedba emisija CO2 po fazama leta za stvarnu i planiranu potrošnju goriva

Količina stvarnih emisija CO_2 po fazama leta:	Količina emisija CO_2 prema planiranoj potrošnji goriva po fazama leta:
Taksiranje: 652,6667 kg	-
Polijetanje i penjanje: 4111,8 kg	Polijetanje i penjanje: 3452,60667 kg
Krstarenje: 456,8666667 kg	Krstarenje: 1471,763 kg
Snižavanje: 522,1333333 kg	Snižavanje: 254,54 kg
Prilaz i slijetanje (+ taksiranje): 1044,266667 kg	Prilaz i slijetanje: 600,453333 kg

Podatak za emisije ugljičnog dioksida u taksiranju je poznat samo za stvarnu potrošnju goriva, što znači da nije planirana. Vjerojatno se smatra da zrakoplov ne bi uspio potrošiti puno goriva za to vrijeme, ali iz priloženog se vidi da je u razdoblju taksiranja koje je trajalo 9 minuta emitirano čak 652,667 kg CO_2. Što se tiče ostalih faza leta, za planiranu potrošnju goriva je uvijek manja količina proizvedenog ugljičnog dioksida u odnosu na emisije za stvarnu potrošnju goriva osim u fazi krstarenja. Za sve faze osim krstarenja se višak emisija CO_2 može pripisati većoj količini goriva u zrakoplovu što znači da je zrakoplov bio teži, a time je i stvarna potrošnja goriva bila veća. Također, svaka faza leta osim krstarenja je trajala par minuta duže što znači da je više vremena trajalo emitiranje CO_2, odnosno proizvedena je veća količina CO_2 za to dodatno vrijeme. Faza krstarenja za stvarnu potrošnju goriva se ističe po svome kratkom trajanju i manjim emisijama u odnosu na emisije planirane potrošnje goriva. Razlog kratkog trajanja faze je taj što je pilot zatražio veću razinu leta u penjanju tako da je kasnije postigao željenu visinu za krstarenje, a i ranije je morao krenuti u snižavanje kako bi se stigao spustiti za odredište.

Stvarne i planirane potrošnje goriva, a time i količina emitiranog ugljičnog dioksida su očekivane za svaku fazu leta (osim velike razlike u emisijama za krstarenje). Pri polijetanju i penjanju se koristi najviše snage motora pa se tako i troši najviše goriva. Krstarenje je „mirna" faza leta u kojoj je potrebna manja postavka snage motora,

ali je prema planu očekivana da traje skoro kao i polijetanje i penjanje tako da su očekivane emisije dosta velike u odnosu na stvarne. Za optimalno snižavanje se podrazumijeva prvo micanje potiska pa zatim korištenje klizanja (eng. *glide*) do početka prilaza tako da velike potrošnje goriva nisu očekivane. U prilazu se koristi mala snaga postavke, a pri slijetanju je uobičajen *landing flare* kojim se još smanjuje postavka snage/potisak zrakoplova tako da se također ne očekuju prevelika potrošnja goriva. Vrijeme trajanja prilaza i slijetanja je dosta dugo tako da emisije ugljičnog dioksida iznose preko 1 tone.

Popis literature

1. Springer, O. P., Springer, D.: Otrovani modrozeleni planet, priručnik iz ekologije, ekotoksikologije i zaštite prirode i okoliša, Meridijani, str. 90.-101.
2. Brozović, I., Regent A., Grgurević M.: Emisije stakleničkih plinova, osobito iz prometa, Zbornik Veleučilišta u Rijeci, Vol. 2, p. 275-294, 2014
3. Bazijanac, E., Domitrović, A.: Autorizirana predavanja iz kolegija zrakoplovnih emisija
4. European Environment Agency- (https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-7/assessment) - pristupljeno svibanj 2021.
5. The EU Emissions Trading System-(https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf) –pristupljeno svibanj 2021.
6. United Nations Climate Change- (https://unfccc.int/kyoto_protocol) - pristupljeno svibanj 2021.
7. Europsko Vijeće, Klimatske promjene: Što EU poduzima- (https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/)- pristupljeno svibanj 2021.
8. ICAO Environment- (https://www.icao.int/environmental-protection/pages/a39_corsia_faq2.aspx)- pristupljeno lipanj 2021.
9. ICAO CORISA Brochure- (https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CorsiaBrochure_8Panels-ENG-Web.pdf)- pristupljeno lipanj 2021.
10. Bazijanac, E.: Zrakoplovni klipni motori, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2005.
11. Skybrary Continuous Descent-(https://www.skybrary.aero/index.php/Continuous_Descent)- pristupljeno srpanj 2021.
12. SESARJU, Greener Aircraft taxiing- (https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/webinars/Guiseppe.pdf) –pristupljeno srpanj 2021.
13. ICAO Operational Opportunities to Reduce Fuel Burn and Emissions- (http://www.icscc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.10013-EN%20Operational%20Opportunities%20to%20Reduce%20Fuel%20Burn%20and%20Emissions.pdf) – pristupljeno srpanj 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako 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 **Izračun emisije ugljičnog dioksida mlaznoga motora po fazama leta**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 10.9.2021

Student/ica:

Simona Barun

(potpis)