

Određivanje emisija zrakoplovnog klipnog motora

Vuković, Magdalena

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:042144>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Magdalena Vuković

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing. stroj.

Student:

Magdalena Vuković

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću na savjetima, pomoći i razumijevanju tijekom izrade ovog rada te kolegama Vjekoslavu Sragi i Sandru Ljutiću na pomoći pri prikupljanju informacija korištenih u ovom radu.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i svim prijateljima koji su mi potpora tijekom studija.

Magdalena Vuković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Magdalena Vuković**

Mat. br.: 0119044507

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Određivanje emisija zrakoplovnog klipnog motora

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Determination of emissions of aircraft piston engine

Opis zadatka:

Zbog specifičnog načina uporabe, odnosno leta zrakoplova, emisije iz klipnog motora s unutarnjim izgaranjem koji se ugrađuju u zrakoplove mjere se iznimno rijetko. Na emisije iz motora, uz konstrukcijske značajke, koje se tijekom eksploatacije praktički ne mijenjaju, ključan utjecaj ima način uporabe (eksploatacije) motora.

Glavni cilj rada je izmjeriti emisije iz motora za karakteristične eksploatacijske režime rada motora odnosno za različite faze leta, a na temelju tih rezultata odrediti emisijske faktore ispitivanog motora zrakoplova.

U okviru završnog rada treba:

- Izraditi pregled dostupnih literaturnih izvora s emisijskim faktorima za klipne motore koji se ugrađuju u zrakoplove.
- Opisati princip rada i mogućnosti korištenja prijenosnog-mjernog sustava za mjerenje koncentracija ispušnih plinova (engl. *Portable Emission Measurement System - PEMS*) na zrakoplovnom klipnom motoru.
- Osmisliti i razraditi način ugradnje mjernog sustava PEMS AVL M.O.V.E na zrakoplov s klipnim motorom koji je dostupan u Laboratoriju za motore i vozila.
- Nakon ugradnje mjernog sustava provesti postupak mjerenja emisija iz klipnog motora zrakoplova.
- Izračunate emisijske faktore s ciljem validacije usporediti s emisijskim faktorima dostupnim u literaturi (EEA, HBEFA).

U okviru završnog rada treba se ograničiti samo na zrakoplove koji su namijenjeni generalnoj avijaciji.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. svibnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 6. srpnja 2022.
3. rok: 22. rujna 2022.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 8. srpnja 2022.
3. rok: 26. rujna - 30. rujna 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. Uvod	1
2. Emisije motora s unutarnjim izgaranjem.....	3
2.1. Zrakoplov i motor	3
2.1.1. Utjecaj faktora zraka	4
2.1.2. Utjecaj visine	6
2.2. Izgaranje i ispušni plinovi	8
3. Emisijski faktori.....	11
3.1. Pregled dostupnih emisijskih faktora za motor Lycoming O-320	12
4. PEMS.....	15
4.1. Princip rada	15
4.2. Komponente	15
5. Mjerenje.....	18
5.1. Postupak mjerenja	18
5.2. Rezultati mjerenja	21
6. Usporedba rezultata	29
7. Zaključak	33

Popis slika

<i>Slika 1. Udio emisija stakleničkih plinova po gospodarskom sektoru [12]</i>	<i>1</i>
<i>Slika 2. Cessna 172N Skyhawk.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3. Ovisnost efektivne snage i specifične potrošnje goriva o faktoru zraka [7]</i>	<i>5</i>
<i>Slika 4. Ovisnost „sirovih“ emisija štetnih ispušnih plinova o faktoru zraka [7]</i>	<i>5</i>
<i>Slika 5. Prikaz ovisnosti tlaka, gustoće zraka i temperature zraka o visini [7]</i>	<i>7</i>
<i>Slika 6. Idealni Ottov proces [7]</i>	<i>8</i>
<i>Slika 7. Faze leta [13]</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8. Komponente PEMS uređaja [10]</i>	<i>17</i>
<i>Slika 9. PEMS uređaj spojen na ispušni sustav zrakoplova 9A-DMB</i>	<i>18</i>
<i>Slika 10. Produžena ispušna cijev.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 11. Komponente PEMS uređaja spojene na ispušnu cijev</i>	<i>19</i>
<i>Slika 12. Protok ispušnih plinova u mjernim točkama</i>	<i>22</i>
<i>Slika 13. Protok ispušnih plinova u ovisnosti o RPM</i>	<i>23</i>
<i>Slika 14. Temperatura ispušnih plinova u mjernim točkama</i>	<i>23</i>
<i>Slika 15. Temperatura ispušnih plinova u ovisnosti o RPM</i>	<i>24</i>
<i>Slika 16. Emisije ugljikovog monoksida u mjernim točkama</i>	<i>25</i>
<i>Slika 17. Emisije dušikovih oksida u mjernim točkama</i>	<i>25</i>
<i>Slika 18. Emisije ukupnih ugljikovodika u mjernim točkama</i>	<i>26</i>
<i>Slika 19. Emisijski faktori za ugljikov monoksid.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 20. Emisijski faktori za dušikove okside.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 21. Emisijski faktori za ukupne ugljikovodike</i>	<i>28</i>
<i>Slika 22. Usporedba emisijskih faktora za ugljikov monoksid.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 23. Usporedba emisijskih faktora za dušikove okside.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 24. Usporedba emisijskih faktora za ukupne ugljikovodike</i>	<i>31</i>
<i>Slika 25. EDM uređaj pri odgovarajućim brzinama vrtnje motora za sve ispitne točke</i>	<i>32</i>

Popis tablica

<i>Tablica 1. Norme za korekciju snage motora [7]</i>	<i>8</i>
<i>Tablica 2. Količinska i masena bilanca tvari pri potpunom izgaranju.....</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 3. Emisijski faktori za AVGAS 100 LL prema IPCC [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 4. Emisijski faktori za Lycoming seriju O-320 prema FOCA [9].....</i>	<i>13</i>
<i>Tablica 5. Emisijski faktori za Lycoming seriju O-320 prema ACRP [6]</i>	<i>13</i>
<i>Tablica 6 FOCA mjerenja za seriju Lyoming O-320 prema ACRP.....</i>	<i>14</i>
<i>Tablica 7. Plan režima leta i mjerenja</i>	<i>20</i>
<i>Tablica 8. Prikaz mjernih točaka i vremenskog perioda mjerenja</i>	<i>21</i>
<i>Tablica 9. Protok plinova zabilježen uređajem EFM</i>	<i>22</i>
<i>Tablica 10. Emisije ispušnih plinova</i>	<i>24</i>
<i>Tablica 11. Maseni protok pojedinog plina</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 12. Emisijski faktori</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 13. Usporedba izračunatih emisijskih faktora s dostupnima.....</i>	<i>29</i>

Popis tehničke dokumentacije

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
λ		faktor zraka
Z	kgZ/kgG	stvarna količina zraka
Z_0	kgZ/kgG	stehiometrijska količina zraka
g_e	g/kWh	specifična efektivna potrošnja goriva
$m_{G,h}$	kg/h	satna potrošnja goriva
P_e	kW	efektivna snaga
λ_{pu}		stupanj punjenja
m	kg	masa radne tvari sa stanjem okolne atmosfere
m_{ref}	kg	referentna masa sa stanjem standardne atmosfere
$m_{S, izg}$	kg	ukupna mase gorive smjese
$m_{S, ref}$	kg	masa referentne smjese
m_G		masa goriva
m_Z		masa zraka
p_e	Pa	srednji efektivni tlak
$\rho_{S, o}$	g/m ³	gustoća smjese sa stanjem okolne atmosfere
H_d	J/kg	donja ogrijevna vrijednost goriva
z		broja cilindara (i (te
V_H	m ³	radni volumena cilindra
n	s ⁻¹	brzina vrtnje
T	s	vrijeme
$E_{pollutant}$		emisija promatrane tvari
$AR_{fuel consumption}$	kg	masa potrošenog goriva
$EF_{pollutant}$	g/kg	emisijski faktor promatrane tvari
\dot{m}	kg/h	ukupni maseni protok ispušnih plinova
$\dot{m}_{pollutant}$	g/h	maseni protok pojedinog plina
FF	kg/h	maseni protoka goriva

Sažetak

Praćenje emisija ispušnih plinova irazito je važno radi njihovog štetnog utjecaja na okoliš i ljudsko zdrvlje. Cilj ovog rada je mjerenje emisija ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora, izračun odgovarajućih emisijskih faktora te usporedba dobivenih emisijskih faktora s otprije dostupnim podacima. Za određivanje sastava ispušnih plinova koristi se prijenosni uređaj za mjerenje emisija ispušnih plinova (engl. *Portable Emissions Measurement System, PEMS*). Mjerenja su provedena za različite režime rada motora koji simuliraju polijetanje, penjanje, krstarenje, prilaz, slijetanje, taksiranje i prazni hod motora.

Ključne riječi: emisija ispušnih plinova, zrakoplovni klipni motor, emisijski faktor, Portable Emissions Measurement System – PEMS

Summary

Monitoring exhaust gas emissions is extremely important due to its harmful impact on environment and human health. The purpose of this work is to measure the exhaust gas emissions of an aircraft piston engine, to calculate emission factors and as well to compare the given results with previous calculations. Portable Emissions Measurement System, PEMS, is used to determine the content of later. Take off, climb, cruise, descent, landing, taxi and idle were simulated with its corresponding engine settings.

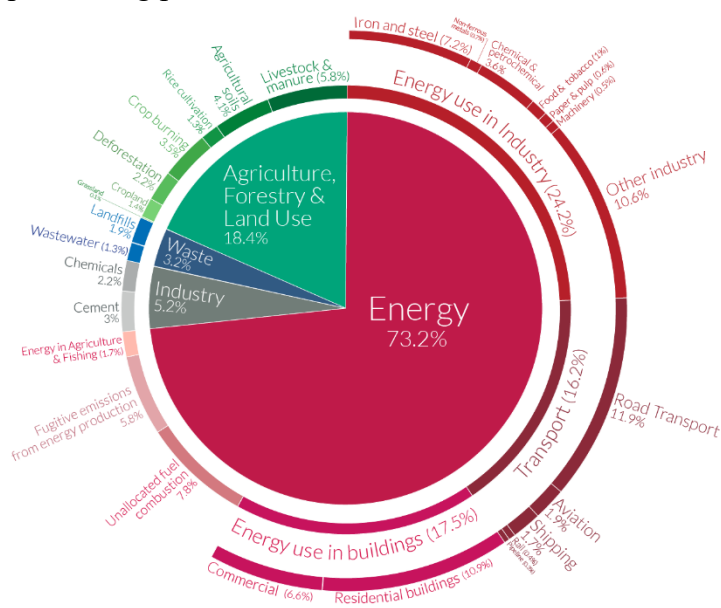
Keywords: exhaust gas emissions, aircraft piston engine, emission factors , Portable Emissions Measurement System – PEMS

1. Uvod

Klimatske promjene izravna su posljedica onečišćenja okoliša, osobito onečišćenja zraka. Porast prosječnih temperatura vodi k ekstremnim vremenskim uvjetima, topljenju leda na polarnim kapama te porastu razine mora. Osim na klimu, onečišćenje okoliša ima negativan utjecaj i na zdravlje ljudi.

U Parizu, 2015. godine, 194 države članice UNFCCC-a potpisale su Pariški sporazum kao globalni odgovor na opasnost od klimatskih promjena. Glavni cilj Pariškog sporazuma je zadržati povećanje prosječne globalne temperature na 2°C iznad razina u predindustrijskom razdoblju smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Određeno je da se svi doprinosi smanjenju emisija pojedinih država-potpisnica ostvaruju kroz nacionalne planove te da svi sektori gospodarstva trebaju doprinijeti smanjenju emisija. [1]

Zračni promet čini jednu od najvažnijih ekonomskih aktivnosti i gospodarskih sektora u svijetu. Prema mjerenjima emisija stakleničkih plinova iz 2016. godine, udio ukupnih emisija zračnog prometa veći je od pomorskog prometa (Slika 1).



Slika 1. Udio emisija stakleničkih plinova po gospodarskom sektoru [12]

Iako cestovni promet i proizvodnja električne energije imaju daleko veći udio u ukupnim emisijama štetnih ispušnih plinova od zračnog prometa, komercijalni zračni promet bilježi najbrži i najveći rast emisija po osobi od svih ostalih sektora. U šezdesetim godinama prošlog stoljeća 100 milijuna putnika koristilo je zračni prijevoz, dok se u 2019. godini broj putnika povećao na 4,5 milijarde. Unatoč činjenici da je zabilježen drastičan pad broja putnika tijekom

pandemije COVID-19, smatra se da će do 2025. godine broj putnika, a time i količina emisija štetnih ispušnih plinova, premašiti brojke iz predpandemijskog perioda [2].

Kako bi ostvarili ciljeve određene Pariškim sporazumom, 290 zrakoplovnih kompanija članica Međunarodne udruge za zračni promet (engl. *International Air Transport Association, IATA*), 2021. godine izglasalo je rezoluciju čiji je cilj postizanje neto nulte emisije ugljika, odnosno ugljične neutralnosti do 2050. godine. [3]

Obzirom da je cilj Pariškog sporazuma određen temperaturom, moraju se uzeti u obzir svi čimbenici koji utječu na klimu, a ne samo emisije ugljika. U ispušne plinove mogu se svrstati ugljikovi oksidi, dušikovi oksidi i ugljikovodici, a sastav ispušnih plinova ovisi o gorivu koje se koristi. Osim emisija ispušnih plinova, zračni promet ima utjecaj i na formaciju oblaka koji utječu na emisiju i reapsorpciju toplinskog zračenja Zemlje.

Za ukupne emisije iz komercijalnog zrakoplovstva razvijene su metode te je ono propisano brojnim pravilnicima, dok se praćenje emisija generalne avijacije zbog bitno manje zastupljenosti bazira na jednostavnijim izračunima i procjenama. Emisije motora s unutarnjim izgaranjem, kakvi se ugrađuju u zrakoplove generalne avijacije, mogu se pratiti i izravnim mjerenjem. Mjerenje se može provoditi u simuliranim uvjetima ili prilikom stvarne eksploatacije. PEMS (engl. *Portable Emissions Measurement System, PEMS*) prijenosni je uređaj za mjerenje emisija ispušnih plinova koji se ugrađuje na vozilo te mjeri emisije za vrijeme korištenja u stvarnim uvjetima i različitim fazama eksploatacije.

Cilj ovog rada je mjerenje emisija ispušnih plinova motora Lycoming serije O-320, izračun odgovarajućih emisijskih faktora te usporedba određenih emisijskih faktora s već provedenim istraživanjima. Emisije će se mjeriti korištenjem spomenutog PEMS uređaja.

2. Emisije motora s unutarnjim izgaranjem

2.1. Zrakoplov i motor

Generalna avijacija definirana je kao skup svih komercijalnih i privatnih letova, izuzev redovnih letova aviokompanija i vojnih letova, te pokriva širok spektar djelatnosti koje obuhvaćaju komercijalne i nekomercijalne letove, privatne letove, školske letove te mnoge druge aktivnosti. [4]

Cessna 172N Skyhawk (Slika 2) američki je zrakoplov s četiri sjedala, jednim klipnim motorom te je jedan od najpopularnijih zrakoplova generalne avijacije na svijetu. Koristi se i za praktičnu obuku pilota pri studiju aeronautike na Fakultetu prometnih znanosti.



Slika 2. Cessna 172N Skyhawk.

Zrakoplov C172N s registracijom 9A-DMB, u vlasništvu Fakulteta prometnih znanosti, opremljen je motorom Lycoming O-320-H2AD. To je klipni, četverocilindarski, zrakom hlađeni motor. [5]

Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova 9A-DMB su [15]:

- motor - Lycoming O-320-H2AD,
- snaga motora - 160 HP (135 kW) pri brzini vrtnje 2700 o/min,
- najveća brzina - 160 kt,
- kapacitet spremnika goriva - 43 U.S galona (2 spremnika od 21,5 galona).

Predmetni zrakoplov (9A-DMB) ima ugrađen sustav EDM (engl. *Engine Data Management*), koji omogućava praćenje rada motora i snimanje parametara rada motora za vrijeme leta, poput brzine vrtnje, snage motora, bogatstva smjese i slično.

2.1.1. Utjecaj faktora zraka

Faktor zraka λ predstavlja omjer stvarne i stehiometrijske količine zraka s kojom izgara gorivo u cilindru motora. Faktor zraka se računa prema:

$$\lambda = \frac{Z}{Z_0}, \quad (1)$$

pri čemu su :

- λ - faktor zraka,
- Z - stvarna količina zraka,
- Z_0 - stehiometrijska količina zraka.

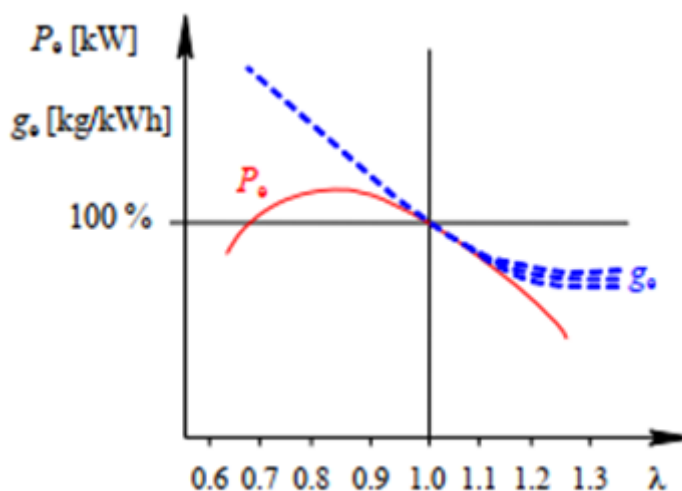
Stehiometrijska količina zraka je ona količina zraka potrebna za potpuno izgaranje 1 kg goriva. Stehiometrijska količina zraka za zrakoplovne klipne motore koji koriste gorivo AVGAS 100 LL (engl. *Aviation Gasoline 100 Low Lead*) iznosi 14,7 kgZ/kgG [7]. Za stehiometrijsku količinu zraka λ je jednako jedan, kako bi se zadovoljila stehiometrijska jednadžba izgaranja. Kada je λ manji od jedan onda je smjesa bogata (engl. *rich mixture*), odnosno u smjesi ima višak goriva, a manjak zraka u donosu na stehiometrijsku smjesu. Suprotno tome, kada je λ veći od jedan smjesa je siromašna (engl. *lean mixture*), odnosno smjesa ima manjak goriva, a višak zraka u donosu na stehiometrijsku smjesu. U stranoj literaturi se umjesto faktora zraka koristi maseni omjer gorivo/zrak (engl. *Fuel/Air ratio, F/A*). Faktor zraka ima izravan utjecaj na efektivnu snagu P_e i specifičnu efektivnu potrošnju goriva g_e (Slika 3). Specifična efektivna potrošnja goriva pokazuje koliko je goriva potrebno da se proizvede 1 kW snage i predstavlja omjer potrošnje goriva i efektivne snage. Specifična efektivna potrošnja goriva računa se prema:

$$g_e = \frac{m_{G,h}}{P_e}, \quad (2)$$

pri čemu su:

- g_e - specifična efektivna potrošnja goriva,
- $m_{G,h}$ - satna potrošnja goriva,
- P_e - efektivna snaga.

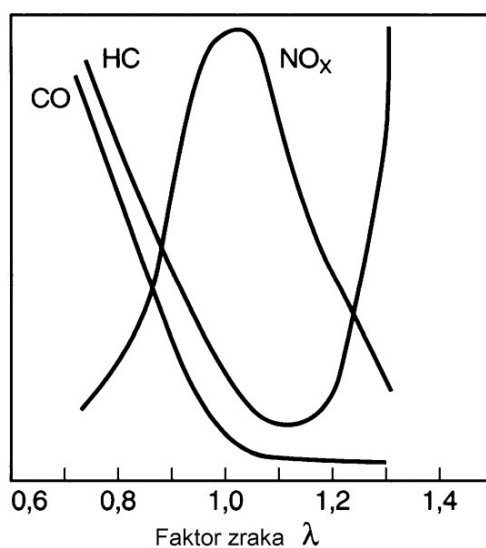
Za eksploataciju je važno znati u kojim uvjetima izgaranja se može dobiti najveću snagu, a u kojim najmanju potrošnju goriva.



Slika 3. Ovisnost efektivne snage i specifične potrošnje goriva o faktoru zraka [7]

Najveća snaga motora se može postići kada je smjesa bogata, kada λ iznosi od 0,84 do 0,92, za te vrijednosti specifična potrošnja goriva je veća nego li za stehiometrijsku smjesu. Najmanju specifičnu potrošnju goriva se može dobiti za siromašnu smjesu, kada λ iznosi od 1,03 do 1,2. Točne vrijednosti faktora zraka se razlikuju za pojedine motore. Goriva smjesa u tom rasponu se još naziva i smjesom najveće ekonomičnosti (engl. *best lean mixture*). Može se zaključiti da se prema zahtjevima za snagu i ekonomičnost određuje λ u različitim fazama leta i režimima rada motora.

O faktoru zraka ovise i tzv. „sirove“ emisije štetnih ispušnih plinova (Slika 4).



Slika 4. Ovisnost „sirovih“ emisija štetnih ispušnih plinova o faktoru zraka [7]

Emisija dušikovih oksida je najviša kada je λ približno jedan, dok je emisija ugljikovodika oko te točke najmanja, a najveća je kada je smjesa vrlo bogata ili siromašna. Emisija ugljikovog monoksida eksponencijalno raste s obogaćivanjem smjese [7].

2.1.2. Utjecaj visine

Zrakoplovni motori su predviđeni za eksploataciju pri različitim nadmorskim visinama, odnosno da stanje okolne atmosfere nije isto dok je zrakoplov na zemlji i u letu. S nadmorskom visinom tlak opada kao i gustoća zraka što direktno utječe na snagu motora.

Stupanj punjenja λ_{pu} (engl. *volumetric efficiency*) je veličina koja prikazuje napunjenost cilindra svježom radnom tvari, a jednak je omjeru mase svježeg radne tvari koja bi stala u radni volumen cilindra kod stanja okolne atmosfere i referentne mase sa stanjem standardne atmosfere:

$$\lambda_{pu} = \frac{m}{m_{ref}}, \quad (3)$$

pri čemu su:

λ_{pu} - stupanj punjenja,

m - masa radne tvari sa stanjem okolne atmosfere, kg

m_{ref} - referentna masa sa stanjem standardne atmosfere, kg.

Stupanj punjenja obuhvaća promjene u masi smjese izazvane promjenama atmosferskoga stanja, odnosno tlaka okoline, koje su posljedica promjene visine kod zrakoplovnih klipnih motora.

Kako je O-320 Ottov motor s rasplinjačem, smjesa goriva i zraka se usisava kroz usisnu cijev. Stupanj punjenja je definiran kao omjer ukupne mase gorive smjese ($m_{S, izg}$) koja je na raspolaganju za izgaranje u cilindru i mase referentne smjese ($m_{S, ref}$), stoga se u ovom slučaju koristi suma mase goriva (m_G) i mase zraka (m_Z).

$$m_{S, izg} = m_{G, izg} + m_{Z, izg} \quad (4)$$

$$m_{S, ref} = m_{G, ref} + m_{Z, ref} \quad (5)$$

$$\lambda_{pu} = \frac{m_{S, izg}}{m_{S, ref}} = \frac{m_{G, izg} + m_{Z, izg}}{m_{G, ref} + m_{Z, ref}} \quad (6)$$

O stupnju punjenja ovisi srednji efektivni tlak. Srednji efektivni tlak je zamišljeni tlak u cilindru, a iščitava se iz p - v dijagrama kružnog procesa u kojem je tlak jednak visini pravokutnika čija je površina jednaka efektivnom radu, a osnovica radnom volumenu cilindra i računa se prema:

$$p_e = \eta_e \cdot \lambda_{pu} \cdot \rho_{S,o} \cdot \frac{H_d \cdot \lambda}{1 + \lambda \cdot Z_0}, \quad (7)$$

pri čemu su:

p_e - srednji efektivni tlak,

λ_{pu} - stupanj punjenja,

$\rho_{S,o}$ - gustoća smjese sa stanjem okolne atmosfere,

λ - faktor zraka,

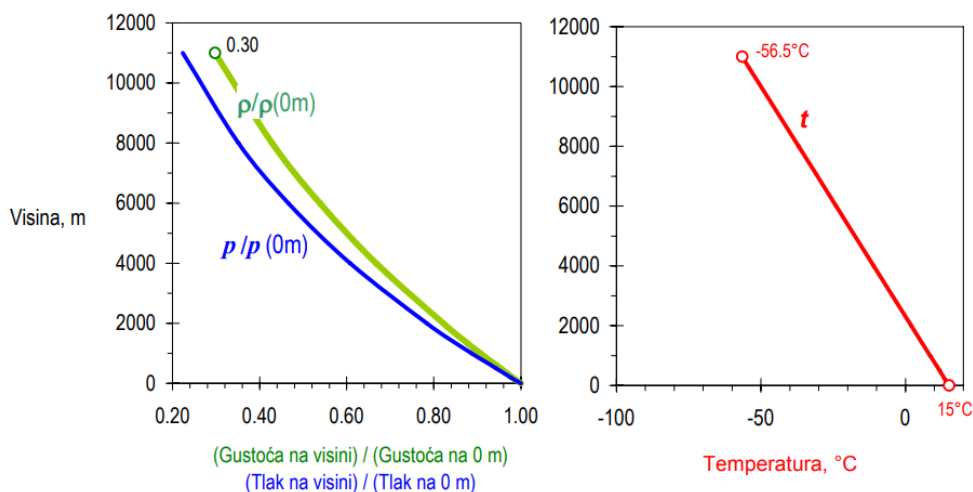
H_d - donja ogrijevna vrijednost goriva,

Z_0 - stehiometrijska količina zraka.

Efektivna snaga P_e je produkt srednjeg efektivnog tlaka (p_e), broja cilindara (z) i volumena cilindara (V_H) te broja okretaja ($\frac{2n}{T}$), pa i snaga direktno ovisi o stupnju punjenja.

$$P_e = z \cdot V_H \cdot p_e \cdot \frac{2n}{T} \quad (8)$$

Može se zaključiti da što je veća gustoća zraka, to je bolje punjenje cilindra i to je veća snaga motora. S povećanjem nadmorske visine opadaju tlak i temperatura i gustoća zraka. Uslijed toga je i snaga manja za približno 1 % na svakih 100 m povećanja visine (Slika 5).



Slika 5. Prikaz ovisnosti tlaka, gustoće zraka i temperature zraka o visini [7]

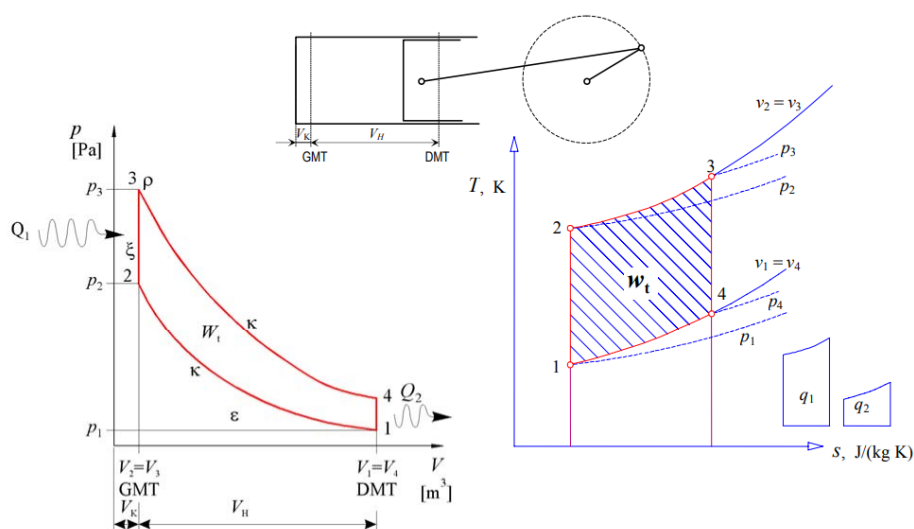
Kako se ispitivanja provode na različitim mjestima, u različitim uvjetima, uvedeno je standardno atmosfersko stanje. Svi rezultati dobiveni mjerenjima se preračunavaju prema izrazima u tablici 1.

Tablica 1. Norme za korekciju snage motora [7]

Stanje atmosfere na ispitnom mjestu: p_s (kPa) - tlak suhog zraka; p (kPa) – apsolutni tlak (tlak vlažnog zraka); T (K) - temperatura zraka					
Norma (datum objave)	EEC 80/1269 (4/81) ECE R 85	ISO 1585 (5/1982)	JIS D 1001 (10/1985)	SAE J 1349 (5/1985)	DIN 70020/6 (11/1976)
Stanje standardne atmosfere (p_{stand} , T_{stand}):					
suhi zrak $p_{\text{stand,s}}$ (kPa)	99			–	
apsolutni tlak p_{stand} (kPa)	–			101.3	
temperatura T_{stand} (K)	298 (25°C)			293 (20°C)	
Ottovi motori, bez i sa prednabijanjem:					
faktor korekcije α_a	$\alpha_a = A^{1.2} \cdot B^{0.6}$ $A = 99 / p_s$ $B = T / 298$			$\alpha_a = A \cdot B^{0.5}$ $A = 101.3 / p$ $B = T / T_{\text{stand}}$	
Korigirana efektivna snaga motora: $P_{\text{stand}} = \alpha_a \cdot P$ (P – snaga izmjerena na ispitnom mjestu)					
ECE R 85: da bi ispitivanje bilo valjano mora biti: $0.93 \leq \alpha_a \leq 1.07$					

2.2. Izgaranje i ispušni plinovi

Svi klipni motori su motori s unutarnjim izgaranjem. Motor Lycoming O-320-H2AD je Ottov motor. U motoru se odvija termodinamički Ottov kružni proces, u kojem se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju tijekom izgaranja, koja se zatim pretvara u mehaničku energiju. U idealnom Ottovom procesu se dovođenje topline, odnosno izgaranje, odvija pri konstantnom volumenu (Slika 6).



Slika 6. Idealni Ottov proces [7]

Izgaranje je kemijski proces pri kojemu dolazi do oksidacije gorivih sastojaka nekog goriva. Sudionici reakcije su gorivo i zrak, a produkti su ispušni plinovi i krute čestice. Izgaranje u realnim procesima je nepotpuno, što znači da u produktima ostaje još izgorivih tvari. Nepotpuno izgaranje nastaje zbog nedovoljne količine zraka (kisika) ili loše distribucije zraka u komori izgaranja. Potpuno izgaranje u idealnim procesima opisujemo stehiometrijskim jednadžbama reakcije pojedinog elementa s kisikom, a iz njih možemo odrediti količinu tvari koja sudjeluje u reakciji (Tablica 2). Produkti potpunog izgaranja su ugljikov dioksid, voda, dušik te sumporov dioksid kod brodskih motora koji koriste teško gorivo (engl. *heavy fuel oil*).

Tablica 2. Količinska i masena bilanca tvari pri potpunom izgaranju

Jednadžbe reakcije	Količinska (molarna) bilanca tvari	Masena bilanca tvari
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$1 \text{ kmol } C + 1 \text{ kmol } O_2 \rightarrow 1 \text{ kmol } CO_2$	$1 \text{ kg } C + 2,7 \text{ kg } O_2 \rightarrow 3,7 \text{ kg } CO_2$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$1 \text{ kmol } H_2 + \frac{1}{2} \text{ kmol } O_2 \rightarrow 1 \text{ kmol } H_2O$	$1 \text{ kg } H_2 + 8 \text{ kg } O_2 \rightarrow 9 \text{ kg } H_2O$
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$1 \text{ kmol } S + 1 \text{ kmol } O_2 \rightarrow 1 \text{ kmol } SO_2$	$1 \text{ kg } S + 1 \text{ kg } O_2 \rightarrow 2 \text{ kg } SO_2$

Pri nepotpunom izgaranju, uz već navedene produkte potpunog izgaranja, u ispušnim plinovima nalaze se i ugljikov monoksid (CO), neizgorjeli ugljikovodici (HC), vodik (H₂), sumporovi oksidi (SO₂), dušikovi oksidi (NO_x) i olovo (Pb).

CO₂ – ugljikov dioksid prirodni je staklenički plin nužan za regulaciju temperature na Zemlji. CO₂ je jedan od primarnih produkata izgaranja fosilnih goriva, što utječe na povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi i negativno utječe na globalnu klimu. Količina CO₂ u dimnim plinovima proračunava se iz bilance ugljika, odnosno iz razlike ukupne količine ugljika u gorivu i količine ostalih spojeva u dimnim plinovima koji sadrže neizgoreni ugljik. Količina potpuno izgorenog ugljika u obliku CO₂ daje informaciju o radu motora i ukupnoj potrošnji goriva. [6]

NO_x – pod kraticu NO_x svrstavamo sve spojeve dušika i kisika koji nastaju prilikom izgaranja. NO_x spojevi sudjeluju u kemijskim reakcijama kojima nastaju ozon, smog i kisele kiše. Ozon koji se nalazi u nižim slojevima atmosfere izrazito je štetan za ljudsko zdravlje, kao i smog, dok kisele kiše zagađuju tlo. Količina NO_x spojeva u ispušnim plinovima ovisi o temperaturi izgaranja, pri višoj temperaturi nastaje više NO_x, te o zasićenju smjese - više NO_x nastaje kada je faktor zraka manji od 1 (engl. *lean combustion*).[6]

CO – ugljikov monoksid je plin koji nastaje nepotpunim izgaranjem ugljika. Plin je otrovan ako se udahne, jer se zbog jedne slobodne kovalentne veze CO lakše od kisika veže za hemoglobin u krvi te onemogućuje oksigenaciju stanica, što može dovesti do smrti. Poznat i pod nazivom „tih ubojica“, CO je plin bez boje i mirisa, što ga čini izrazito opasnim. Iz tog razloga, kabine u zrakoplovima opremljene su detektorima CO i alarmima koji upozoravaju na povišene razine tog plina.

HC – Pod kraticu HC svrstavamo sve ugljikovodike koji se nalaze u ispušnim plinovima. Većina ugljikovodika u ispušnim plinovima nepotpuno su izgorjeni ugljikovodici iz goriva, dok su ostali ili produkti izgaranja ili gorivo koje uopće nije izgorilo. Neki od tih spojeva jako su nestabilni i, ovisno o vrsti, mogu biti opasni za zdravlje ili onečišćavati okoliš. [6]

Pb – Olovo i njegovi spojevi otrovni su i djeluju štetno na središnji živčani sustav. Od 2000. g. u Europi je zabranjena prodaja olovnog benzina. Gorivo AVGAS 100LL ima „nisku“ razinu olova, koja je i dalje bitno viša od bezolovnih goriva za cestovna vozila. Tetraetil-olovo bezbojna je otrovna tekućina koja se dodaje u benzinsko gorivo kao antidetonator. Pojava detonantnog izgaranja izrazito je opasna jer u kratkom vremenu može uništiti motor. Do detonacije dolazi kada se prilikom izgaranja smjese koja je u blizini svjećice val tlaka uzrokovan ekspanzijom produkata izgaranja širi brže od fronte plamena. Neizgorjeloj smjesi u cilindru povisi se tlak, a time i temperatura iznad temperature samozapaljenja te dolazi do sekundarnog upaljivanja. Dvije fronte plamena se sudaraju i dolazi do tlačnih poremećaja koji uzrokuju snažne vibracije i oštećuju motor. Zbog toga se iz sigurnosnih razloga u zrakoplovnim motorima i dalje koriste goriva koja sadrže olovo. Prema aktualnim normama, aviobenzin AVGAS 100LL gorivo smije sadržavati najviše 0,56 grama tetraetil-olova po litri goriva. [7]

3. Emisijski faktori

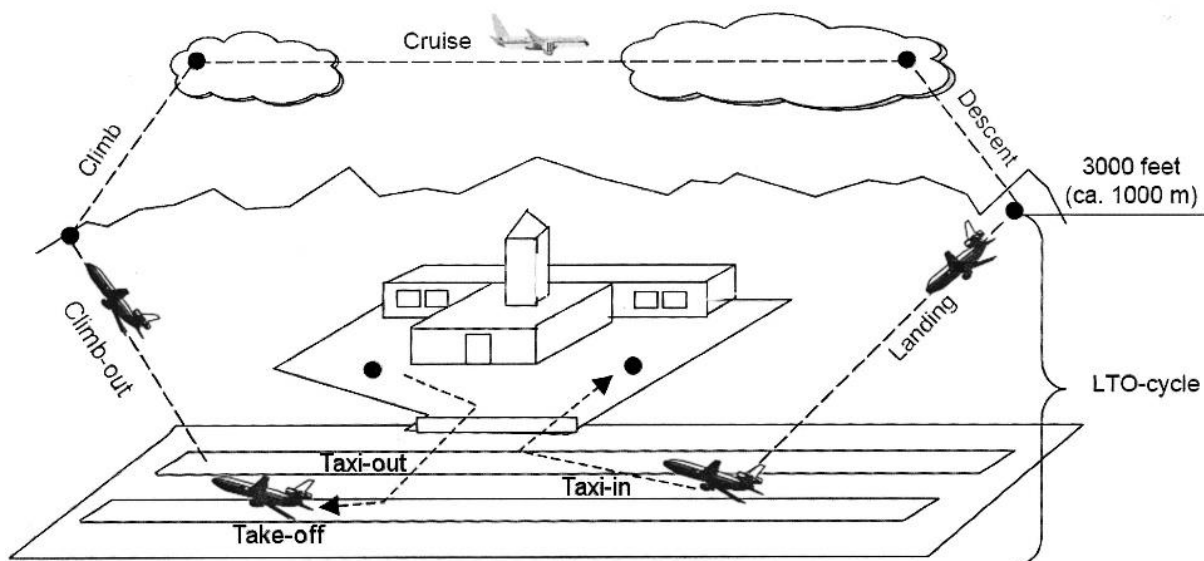
Emisijski faktor je omjer količine nastale promatrane tvari i potrošene sirovine u nekom procesu, u ovom slučaju emisija štetnih ispušnog plina i potrošenog goriva[6]. Emisije se računaju prema izrazu:

$$E_{pollutant} = AR_{fuel\ consumption} \times EF_{pollutant} \quad (9)$$

pri čemu su:

- $E_{pollutant}$ - emisija promatrane tvari,
- $AR_{fuel\ consumption}$ - masa potrošenog goriva,
- $EF_{pollutant}$ - emisijski faktor promatrane tvari.

Emisijski faktori su specifične veličine, kao mjerna jedinica koristi se gram emitirane štetne tvari po kilogramu goriva ili jedinici puta (g/km), odnosno vremena (g/h). Vrijednost emisijskih faktora određuje se iz potrošnje goriva, odnosno izmjerenog protoka goriva, i izmjerene količine štetnih tvari te se zatim emisijski faktor matematički izrazi kao omjer te dvije veličine. Važno je napomenuti da emisije štetnih tvari ovise o režimu rada motora jer se u različitim režimima rada postižu različiti tlakovi, temperature izgaranja i brzine strujanja usisa i ispuha. Režimi rada motora podijeljeni su u grupe u ovisnosti o fazi leta uz prazni hod motora. Faze leta su taksiranje, polijetanje, penjanje, krstarenje, prilaz i slijetanje, u kojima motor radi s različitim postotkom snage što se regulira brzinom vrtnje (engl. *revolutions per minute*, RPM) ili protokom goriva (engl. *% of max. fuel flow*).



Slika 7. Faze leta [13]

Prazni hod (engl. *idle*) je stanje motora kada motor ne predaje snagu za pogon.

Podaci o emisijskim faktorima moraju biti iz pouzdanih izvora kao što su proizvođači motora ili službene baze podataka. Gorivo koje koristi većina zrakoplovnih klipnih motora danas je aviobenzin AVGAS 100LL (engl. *Aviation Gasoline 100 Low Lead*). Postoje i druge vrste AVGAS goriva koja se razlikuju po oktanskom broju.

Opći emisijski faktori za AVGAS 100LL dostupni su u Bazi podataka emisijskih faktora (engl. *Emission factor database, EFDB*) Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) [7]. U navedenoj bazi podataka nalaze se emisijski faktori za metan (CH₄), duškov dioksid (NO₂), dušikove okside (NO_x) te ugljikov dioksid (CO₂). Emisijski faktori navedeni su u mjernim jedinicama mase tvari po masi izgorenog goriva.

Tablica 3. Emisijski faktori za AVGAS 100 LL prema IPCC [7]

Gorivo	Emisijski faktori [g _{tvari} / kg _{goriva}]			
AVGAS 100 LL	CH ₄	NO ₂	NO _x	CO ₂
	0,022	0,087	10,875	3132

3.1. Pregled dostupnih emisijskih faktora za motor Lycoming O-320

Savezni ured civilnog zrakoplovstva Švicarske (engl. *Federal Office of Civil Aviation, FOCA*; njem. *Bundesamt für Zivilluftfahrt, BAZL*) je između 2000. i 2007. godine proveo niz istraživanja i mjerenja, među kojima i mjerenje emisija u letu te su iz tih podataka sastavili listu emisijskih faktora zrakoplovnih klipnih motora. Podaci o emisijskim faktorima zrakoplovnih klipnih motora navedeni su u Bazi podataka za zrakoplovne klipne motore (njem. *Flugzeug Kolbenmotoren Datenbank*) [9]. U bazi podataka nalazi se 16 vrsta zrakoplovnih klipnih motora, a za motore koji nisu eksplicitno navedeni u bazi podataka iskazani su prosječni emisijski faktori koji su rangirani prema tipičnoj snazi motora. Tablica 4 prikazuje emisijske faktore za Lycoming seriju O-320.

Tablica 4. Emisijski faktori za Lycoming seriju O-320 prema FOCA [9]

Mjerna točka	Faza leta	% of max fuel flow	EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA		
			FOCA		
			CO [g/kg]	NOX [g/kg]	THC [g/kg]
1	Polijetanje	100	922.9	4.6	8.81
2	Penjanje	85	890.3	5.5	8.75
3	Krstarenje	65	795.1	8.6	11
4	Prilaz	45	1159	1.6	23.3
5	Slijetanje	45	1159	1.6	23.3
6	Taksiranje	13	654.9	5.4	5.4
7	Idle	13	654.9	5.4	5.4

2016. godine u okviru Američkog aerodromskog istraživačkog programa (engl. *The Airport Cooperative Research Program, ACRP*) proširena je studija koju je objavila FOCA u kojoj su izmjerili emisije 57 vrsta zrakoplovnih klipnih motora i sastavili proširenu listu emisijskih faktora. Izmjerene su emisije krutih čestica (PM), dušikovih oksida (NO_x), ugljikovog monoksida (CO) te ugljikovodika (HC). Prema smjernicama Američke agencije za zaštitu okoliša (engl. *United States Environmental Protection Agency, US EPA*), navedene tvari su zagađivači, čije se emisije prate i kontroliraju u skladu s odredbama IPCC.

Prilikom istraživanja mjerenja su provedena na zrakoplovima koji su dio standardne flote. Ovo istraživanje je omogućilo prikupljanje podataka o stvarnim emisijama zrakoplovnih klipnih motora, s obzirom da se u generalnoj avijaciji koriste zrakoplovi koji su u eksploataciji desetljećima, za razliku od mjerenja emisija novih motora prilikom certifikacije. [6]

Rezultati mjerenja emisijskih faktora za Lycoming seriju O-320 prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Emisijski faktori za Lycoming seriju O-320 prema ACRP [6]

Mjerna točka	Faza leta	% of max propellor speed	% of max fuel flow	EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA		
				ACRP		
				CO [g/kg]	NO _x [g/kg]	THC [g/kg]
1	Polijetanje	100	98	905	8	35.5
2	Penjanje	100	98	905	8	35.50
3	Krstarenje	91	80	525	23.1	39.1
4	Prilaz	70	41	770	7.2	39.6
5	Slijetanje	69	39	857	3.1	50
6	Taksiranje	46	18	700	4.5	42.5
7	Idle	34	12	767	1.6	96.6

Važno je napomenuti da se vrijednosti emisijskih faktora od FOCA-e za Lycoming seriju O-320, ne poklapaju s onima koji su dostupni u prilogu ACRP istraživanja, koji su navedeni za mjerenje koje je provela FOCA za Lycoming seriju O-320 (Tablica 6).

Tablica 6. FOCA mjerenja za seriju Lycoming O-320 prema ACRP

Mjerna točka	Faza leta	% of max fuel flow	EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA		
			FOCA		
			CO [g/kg]	NOX [g/kg]	THC [g/kg]
1	Polijetanje	100	816.0	6.68	12.6
2	Penjanje	85	837.0	6.92	15.1
3	Krstarenje	65	/	/	/
4	Prilaz	45	696.0	19.44	13.7
5	Slijetanje	45	696.0	19.44	13.7
6	Taksiranje	13	690.0	1.64	16.0
7	Idle	13	690.0	1.64	16.0

4. PEMS

Prijenosni sustav za mjerenje emisija PEMS (engl. *Portable Emissions Measurement System, PEMS*) je uređaj za ispitivanje emisija cestovnih vozila koji je razvijen kako bi se mogao ugraditi unutar ili izvan vozila, ovisno o dimenzijama samog vozila. Najveća prednost PEMS sustava je mogućnost mjerenja emisija tijekom stvarnog korištenja vozila ili stroja u stvarnim uvjetima rada. Laboratorijska mjerenja pokazuju samo rezultate u zatvorenom prostoru, dok PEMS sustav omogućuje promatranje promjene parametara pod utjecajem vanjskih uvjeta koji se stalno mijenjaju, te se time može dobiti preciznija i realnija slika emisija tijekom korištenja. Kompaktan dizajn omogućuje lako prenošenje do vozila i ugradnju na vozilo, ako je to moguće. Rezultati ovakvog mjerenja su brojčane vrijednosti emisija štetnih tvari u ispušnim plinovima, koje se izražavaju u ppm (engl. *parts per million*).

4.1. Princip rada

Osnovni princip mjerenja putem sustava PEMS[14]:

- protok od otprilike 2 l/min čistog ispušnog plina se prenosi do sustava putem ugrijane cijevi,
- na kraju ugrijane cijevi se nalazi filter koji odvaja čestice od ispušnog plina,
- nakon prolaska kroz filter, plin se hladi prije odlaska u hladnjak s dvije razine,
- nakon prve razine hlađenja plin prolazi kroz NDUV (engl. *Non-dispersive Ultraviolet Analyzer*) analizator gdje se NO i NO₂ mjere odvojeno,
- nakon NDUV analizatora plin se dijeli na dva djelomična protoka,
- jedan od protoka prolazi kroz drugu razinu hlađenja gdje se CO i CO₂ mjere pomoću NDIR (engl. *Non-dispersive Infrared Analyzer*) analizatora te se kisik mjeri pomoću O₂ senzora, drugi se protok provodi kao *by-pass* protok,
- nakon toga se 2 protoka opet sastaju i napuštaju sustav putem odvodne cijevi.

4.2. Komponente

PEMS uređaj se sastoji od komponenti koje su shematski prikazane na slici 8. Osnovne komponente PEMS uređaja su [10]:

- analizatori koji služe za određivanje koncentracija određenih tvari u ispušnim plinovima,

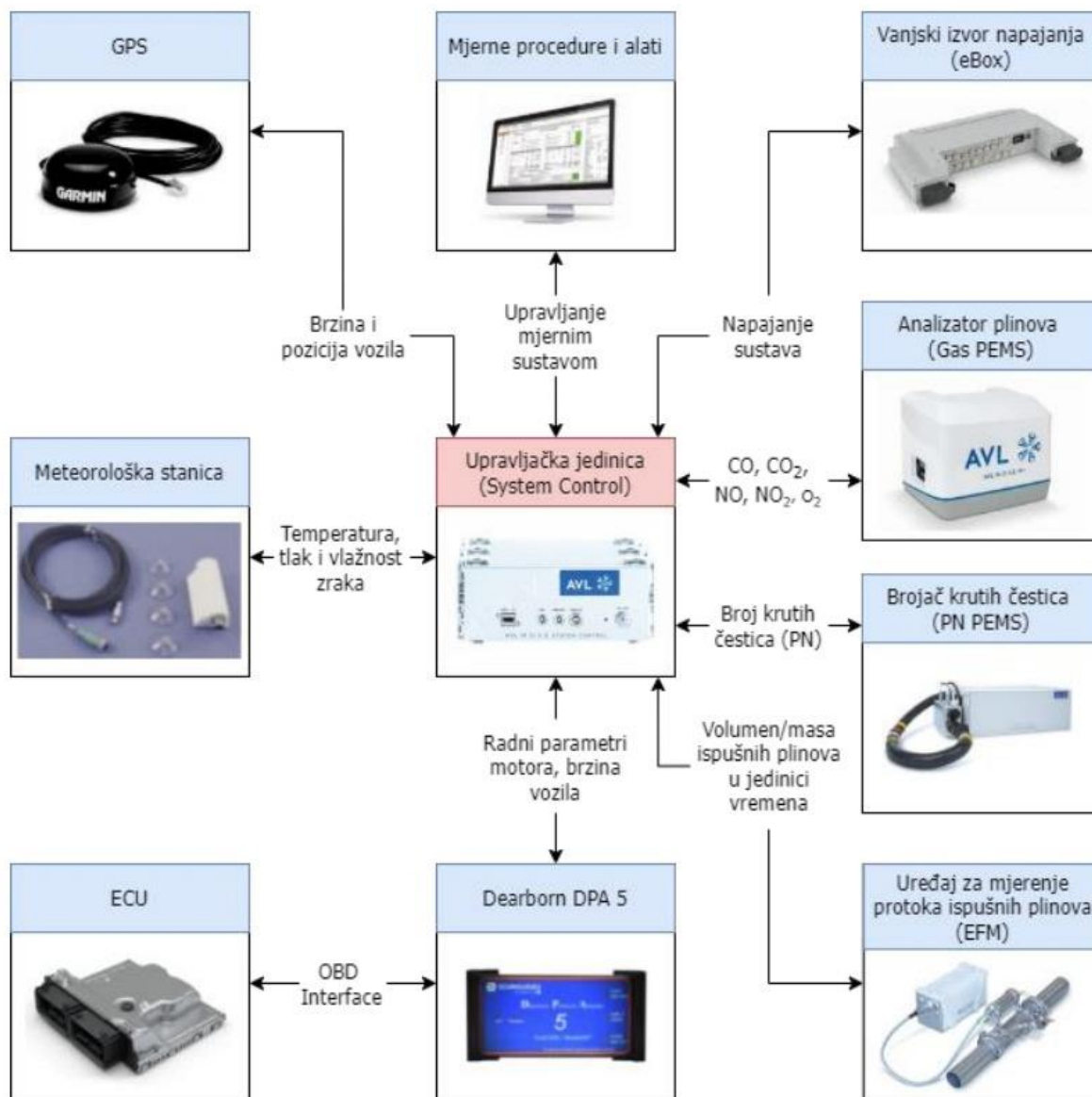
- instrumenat za mjerenje masenog protoka ispušnih plinova, kao što je EFM (engl. *Exhaust Flow Meter*)
- globalni sustav za određivanje položaja, nadmorske visine i brzine vozila,
- senzori i drugi uređaji koji nisu dio vozila, na primjer senzor temperature okoline, relativne vlažnosti, tlaka zraka (meteorološka stanica),
- izvor energije neovisan o vozilu, za napajanje PEMS-a.

Sam PEMS uređaj sastoji se od dva osnovna modula kojima se ispituju određeni parametri [10]:

- Gas PEMS - uređaj koji analizira hlapljive čestice ispušnih plinova vozila. Taj uređaj mjeri koncentraciju ugljikovog monoksida (CO), ugljikovog dioksida (CO₂), dušikovih oksida (NO_x) te kisika (O₂) u ispušnim plinovima vozila.
- PN PEMS (engl. *Particle Number PEMS – PN PEMS*) - uređaj koji mjeri broj krutih čestica u ispušnim plinovima.

Osim navedenih komponenti, sustav se može proširiti dodatnim mjernim uređajima kao što su [10]:

- analizator neizgorjelih ugljikovodika (engl. *Total Hydrocarbon Content - THC*),
- uređaj za mjerenje potrošnje goriva,
- uređaj za mjerenje potrošnje električne energije i slično.



Slika 8. Komponente PEMS uređaja [10]

5. Mjerenje

Mjerenje emisija zrakoplovnog klipnog motora Lycoming O-320-H2AD je provedeno 09. rujna 2022. na aerodromu Lučko.

5.1. Postupak mjerenja

Za potrebe ovog mjerenja korišten je PEMS uređaj koji je primarno namjenjen za mjerenje emisija iz automobilskih motora, no to nije ograničenje za njegovu uporabu na ostalim motorima. Za provođenje postupka mjerenja ispušnih plinova zrakoplova registracije 9A-DMB PEMS uređaj nije ugrađen na zrakoplov, već se nalazi izvana, spojen na ispušni sustav (Slika 9). Također, tijekom mjerenja zrakoplov je na zemlji i motor će biti u određenom režimu rada kako bi se simulirali režimi rada za različite faze leta.



Slika 9. PEMS uređaj spojen na ispušni sustav zrakoplova 9A-DMB

Važno je napomenuti da je ispušni sustav na motorima serije O-320 vrlo kratak pa se ispušni plinovi ne stignu ohladiti te se na izlazu iz ispušne cijevi razvijaju visoke temperature, koje su puno veće od onih kod automobilskih motora. Zbog potencijalne opasnosti od oštećenja mjerne opreme bilo je nužno prilagoditi mjernu opremu mjerenju ispušnih plinova na avionskom motoru.



Slika 10. Produžena ispušna cijev

Najjednostavnije rješenje bilo je produženje same ispušne cijevi s drugom cijevi (Slika 10), koja je dovoljno dugačka da se ispušni plin ohladi do prijelaza na plastične cijevi koje vode do analizatora. Prije početka mjerenja, cijevi koje vode do analizatora plinovitih komponenti se moraju zagrijati na temperaturu od 190 °C kako ne bi došlo do kondenzacije ispušnih plinova na stijenci cijevi.

Prilikom mjerenja zrakoplovu se mora pristupati oprezno zbog rotirajuće elise zrakoplova i zbog zagrijanih dijelova ispuha, ali i zbog znatne količine ugljikovog monoksida iz ispuha. Potrebna je zaštita od buke, ali i protupožarna oprema u neposrednoj blizini zrakoplova [11]. Mjerenja izvode minimalno dvije osobe, između kojih je potrebno održavati stalnu komunikaciju.



Slika 11. Komponente PEMS uređaja spojene na ispušnu cijev

Mjerenje se izvodi tako da se na ispušnu cijev spoji EFM uređaj i ostale komponente PEMS uređaja (Slika 11). Zatim se motor zagrije na radnu temperaturu, kako bi mjerenja bila što vjerodostojnija simuliranim uvjetima. Nakon toga vrši se mjerenje.

Bitno je naglasiti da se za mjerenje se koristi bogata gorivna smjesa.

Svaka radna točka ima fazu stabilizacije (90 sekundi) i fazu mjerenja (90 sekundi).

Plan mjerenja je prikazan u tablici 7.

Tablica 7. Plan režima leta i mjerenja

Mjerna točka	RPM	Režim leta	Postotak snage
1	700	Prazni hod	
2	1000	Taksiranje	
3	1500	Krstarenje	55 %
4	1700	Krstarenje	65 %
5	1900	Krstarenje	75 %
6	2100	Krstarenje	85 %
7	2300	Polijetanje	100 %

Postupak mjerenja:

1. Osoba u zrakoplovu prema planu mjerenja postavlja motor u željeni režim rada.
2. Motor se održava u željenom režimu sve dok se rezultati mjerenja ne ustabile, što se prati na ekranu uređaja za analizu ispušnih plinova i na instrumentima zrakoplova.
3. Na programskom sučelju uređaja za analizu ispušnih plinova, osoba izvan zrakoplova odabere opciju spremanja podataka u memoriju za kasniju analizu.
4. Osoba unutar zrakoplova očitava brzinu vrtnje i protok goriva na EDM uređaju te ih bilježi.
5. Mjerenje se ponavlja za svaki režim rada koji će se promatrati.

Tablica 8. Prikaz mjernih točaka i vremenskog perioda mjerenja

Mjerna točka	RPM	Period od 30 s osrednjavanja signala u zapisu	Napomena
1	IDLE_1	100 s - 130 s	14:21 (početak zapisa)
2	1000	235 s - 265 s	14:24
3	1900	360 s - 390 s	14:26
4	IDLE_2	570 s - 600 s	14:28
5	1500	720 s - 750 s	14:32
6	2100	800 s - 830 s	14:34
7	IDLE_3	955 s - 985 s	14:36
8	1700	1050 s - 1080 s	14:38
9	IDLE_4	1110 s - 1140 s	14:40
			14:45 (kraj zapisa)

U tablici 8. su prikazane mjerne točke i brzina vrtnje koje odgovaraju određenim režimima leta u kojima su izmjerene emisije. Brzina vrtnje u praznom hodu motora (engl. *IDLE*) iznosi 690 RPM, dok je maksimalna brzina vrtnje dok je zrakoplov na zemlji između 2280 i 2400 RPM. [15].

Redoslijed mjerenja je određen ograničenjima zrakoplovnog klipnog motora dok je na zemlji. Naime, motor O-320 je zrakom hlađen, što predstavlja problem dok je zrakoplov na zemlji, jer se motor ne hladi dovoljno i postoji opasnost od pregrijavanja. Iz tog razloga broj okretaja se ne povećava konstantno, već se skokovito mijenja s periodima kada je motor u praznom hodu između. Također, mjerenje je moralo biti prekinuto radi previsoke temperature ispuha i opasnosti od oštećenja mjerne opreme. Najveća brzina vrtnje za koju su izmjerene emisije iznosi 2100 RPM.

Nakon izvršenog mjerenja, rezultati se analiziraju i mogu se izračunati emisijski faktori. Emisije ispušnih plinova imaju mjernu jedinicu ppm i potrebno ih je preračunati u g/h, kako bi se mogao dobiti omjer emisije plina i protoka goriva u g/kg, odnosno emisijski faktor.

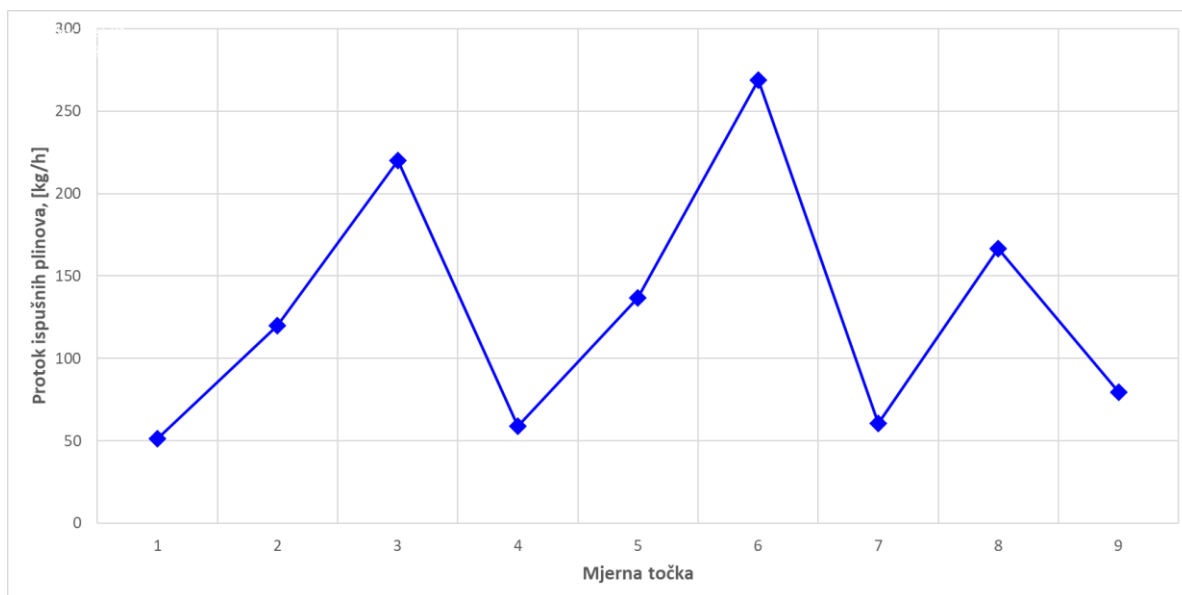
5.2. Rezultati mjerenja

Tablica 9. prikazuje podatke dobivene mjernim uređajem EFM. Iznosi volumnog i masenog protoka ispušnih plinova su u skladu s brzinom vrtnje (Slika 12 i 13), odnosno postotkom maksimalne snage motora u određenom režimu rada. Vidljiv je rast temperature ispušnih

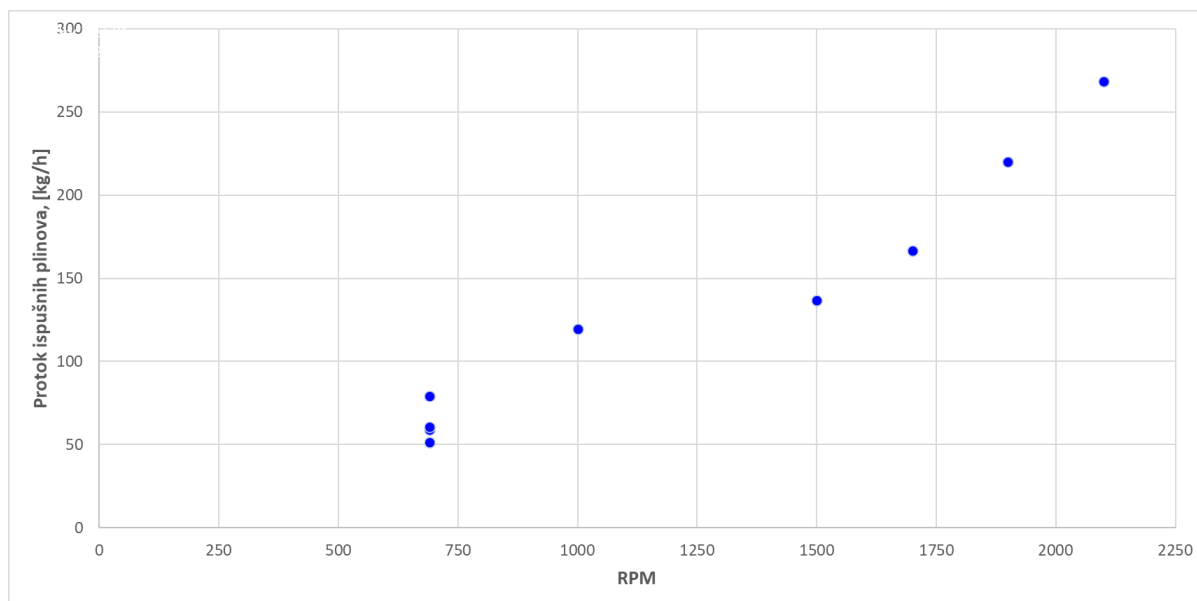
plinova, pogotovo kod ponovljenih mjernih točaka koje predstavljaju prazni hod motora, što se može pripisati nedovoljnom hlađenju samog motora.

Tablica 9. Protok plinova zabilježen uređajem EFM

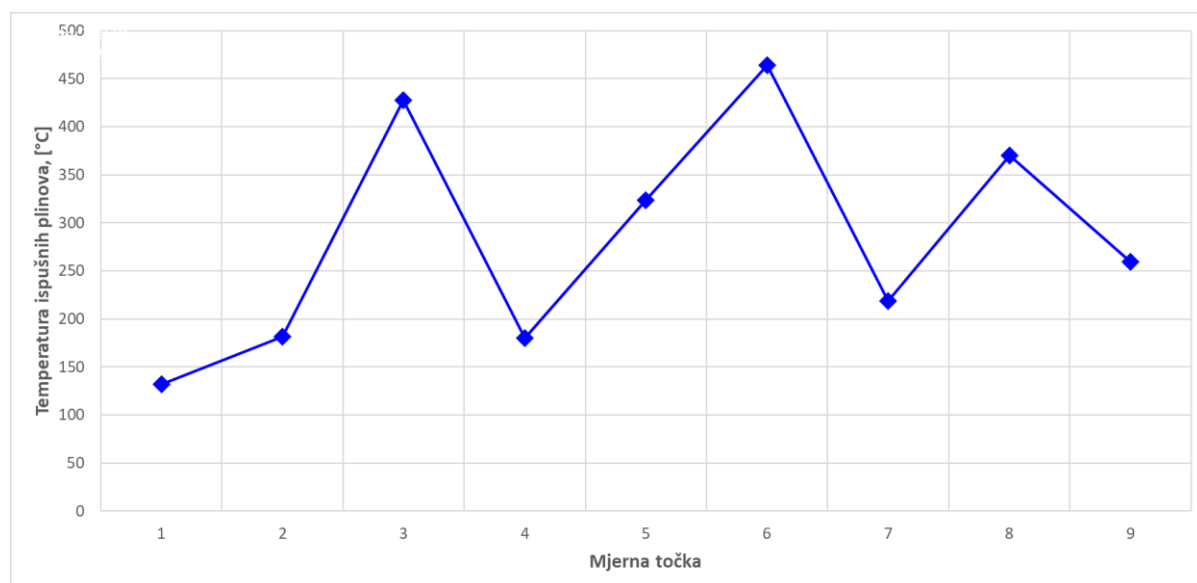
Mjerna točka	RPM	PROTOK PLINOVA				
		PEMS HD EFM				
		\dot{V} [m ³ /s]	$\dot{m}^{(1)}$ [kg/h]	$r_{gas}^{(4)}$ [kg/m ³]	dp [hPa]	$t_{gas4}^{(6)}$ [°C]
1	690	1.200E-02	51.207	4267.250	0.426	132.300
2	1000	2.800E-02	119.688	4274.571	1.182	181.433
3	1900	5.100E-02	219.894	4311.647	5.789	427.307
4	690	1.400E-02	59.032	4216.571	0.477	180.133
5	1500	3.200E-02	136.708	4272.125	1.948	323.119
6	2100	6.200E-02	268.599	4332.242	9.069	464.344
7	690	1.400E-02	60.766	4340.429	0.509	218.783
8	1700	3.800E-02	166.596	4384.105	3.082	370.325
9	690	1.800E-02	79.329	4407.167	0.655	259.126



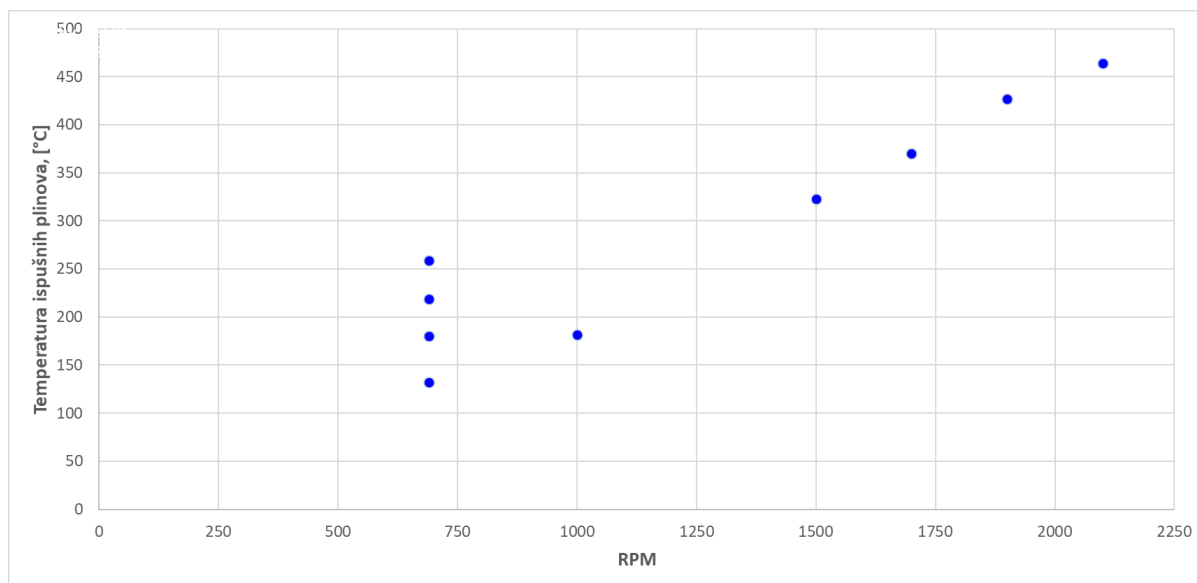
Slika 12. Protok ispušnih plinova u mjernim točkama



Slika 13. Protok ispušnih plinova u ovisnosti o RPM



Slika 14. Temperatura ispušnih plinova u mjernim točkama



Slika 15. Temperatura ispušnih plinova u ovisnosti o RPM

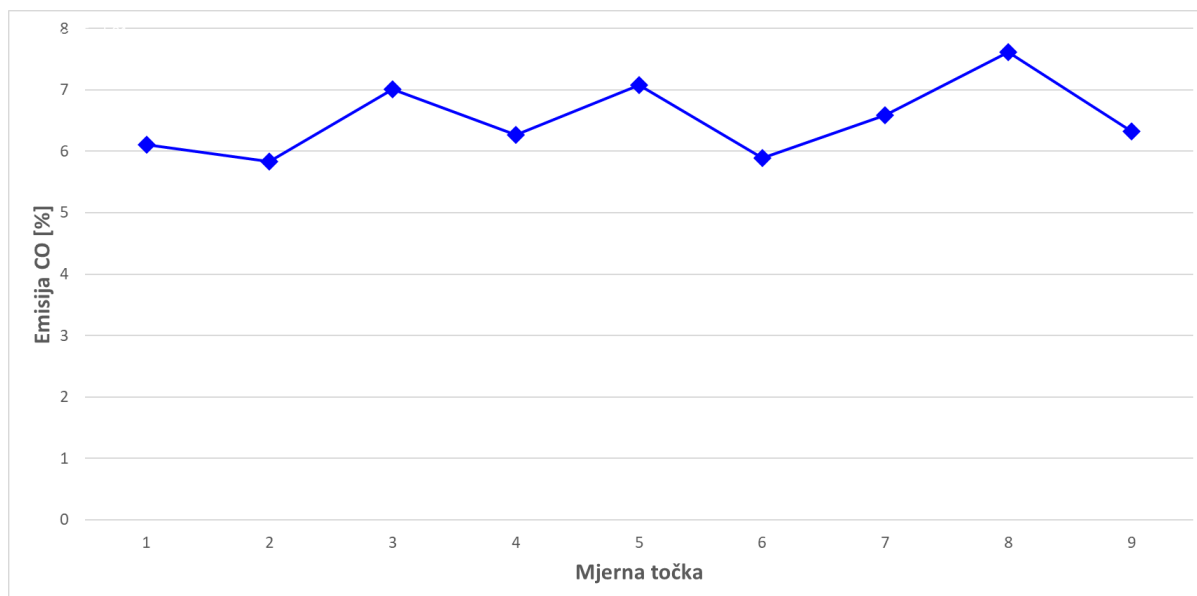
Na slikama 14 i 15 se jasno vidi povišenje temperature u mjernim točkama u režimu praznog hoda.

Emisije ispušnih plinova su prikazane u tablici 10, a njihove vrijednosti su izražene kao maseni i volumni udjeli protoka ispušnih plinova.

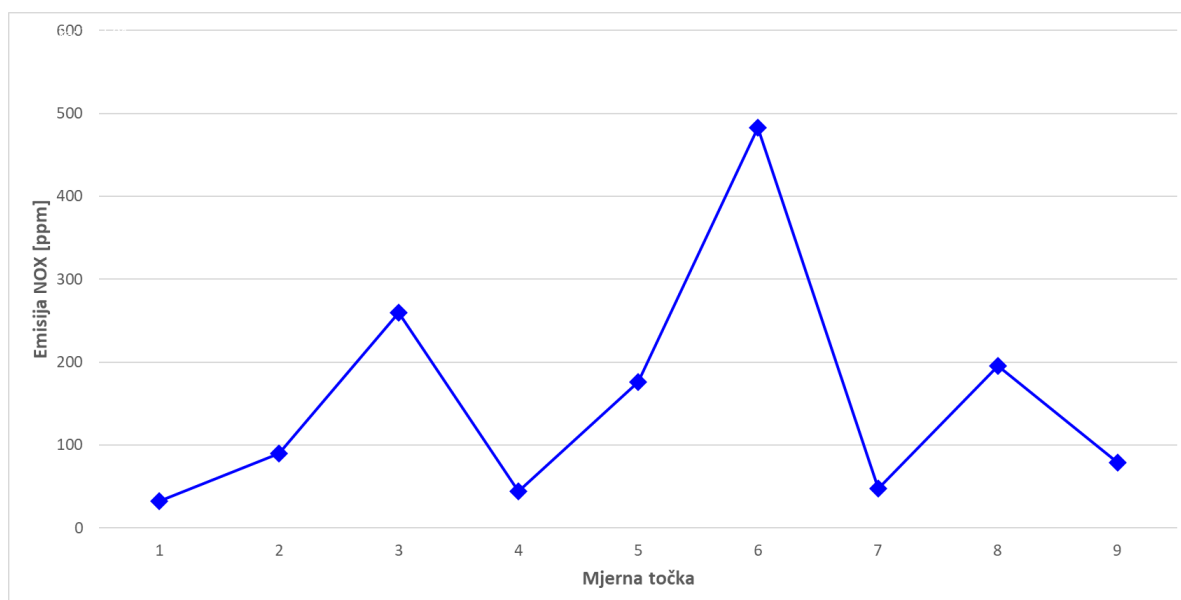
Tablica 10. Emisije ispušnih plinova

Mjerna točka	RPM	EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA							
		PEMS-HD							
		CO [%]	CO ₂ [% vol.]	NO [ppm]	NO ₂ [ppm]	NO _x [ppm]	THC [ppmC1]	CH ₄ [ppmC1]	NMHC [ppmC1]
1	690	6.11	7.66	25.01	7.39	32.40	6707.5	1458.5	5249.0
2	1000	5.84	10.26	83.27	6.32	89.59	3561.8	529.3	3032.5
3	1900	7.01	9.67	255.52	4.20	259.71	3018.6	468.2	2550.5
4	690	6.27	8.79	35.69	8.60	44.30	5171.3	1130.7	4040.6
5	1500	7.08	9.48	169.64	5.99	175.63	2976.3	482.6	2493.8
6	2100	5.89	10.64	478.66	4.29	482.95	2679.7	429.9	2249.8
7	690	6.59	8.88	38.67	8.55	47.21	4910.7	1028.1	3882.6
8	1700	7.62	8.99	190.45	5.38	195.83	3299.9	534.5	2765.4
9	690	6.32	9.72	71.29	7.28	78.57	3689.8	620.6	3069.2

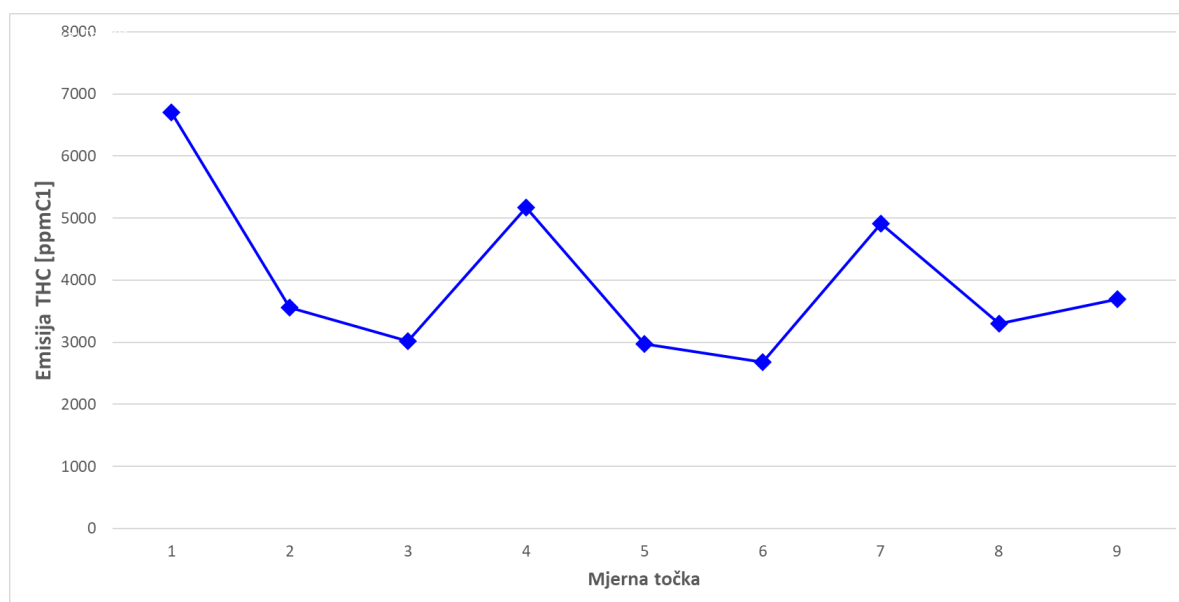
Na slikama 16., 17. i 18. su grafički prikazane izmjerene emisije plinovitih komponenti ispušnog plina CO, NO_x i THC u mjernim točkama.



Slika 16. Emisije ugljikovog monoksida u mjernim točkama



Slika 17. Emisije dušikovih oksida u mjernim točkama



Slika 18. Emisije ukupnih ugljikovodika u mjernim točkama

Emisijski faktori se računaju tako da se prvo izračuna maseni protok pojedinog plina (Tablica 11). Maseni protok pojedinog plina dobije se iz ukupnog masenog protoka ispušnih plinova i masenog udjela pojedinog plina, odnosno emisija, koji je za CO izražen u postocima, dok je za NO_x i THC izražen u ppm, prema formuli (10).

$$E_{pollutant} \times \dot{m} = \dot{m}_{pollutant} , \quad (10)$$

gdje je :

$E_{pollutant}$ - maseni udio pojedinog plina, tj. emisija,

\dot{m} - ukupni maseni protok ispušnih plinova

$\dot{m}_{pollutant}$ - maseni protok pojedinog plina.

Tablica 11. Maseni protok pojedinog plina

Mjerna točka	RPM	PROTOK ISPUŠNIH PLINOVA EFM	EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA PEMS-HD			MASENI PROTOK PLINA m.protok*emisija=[g/h]		
		[kg/h]	CO[%]	NOX[ppm]	THC[ppmC1]	CO	NOX	THC
1	690	51.21	6.11	32.40	6707.5	3130.8	1.66	343.5
2	1000	119.69	5.84	89.59	3561.8	6986.2	10.72	426.3
3	1900	219.89	7.01	259.71	3018.6	15416.8	57.11	663.8
4	690	59.03	6.27	44.30	5171.3	3703.1	2.61	305.3
5	1500	136.71	7.08	175.63	2976.3	9672.1	24.01	406.9
6	2100	268.60	5.89	482.95	2679.7	15817.8	129.72	719.8
7	690	60.77	6.59	47.21	4910.7	4003.9	2.87	298.4
8	1700	166.60	7.62	195.83	3299.9	12692.9	32.63	549.8
9	690	79.33	6.32	78.57	3689.8	5015.2	6.23	292.7

Zatim se iz izračunatog masenog protoka pojedinog plina i protoka goriva (engl. *Fuel Flow*, FF) u određenoj mjernoj točki odredi emisijski faktor ($EF_{pollutant}$).

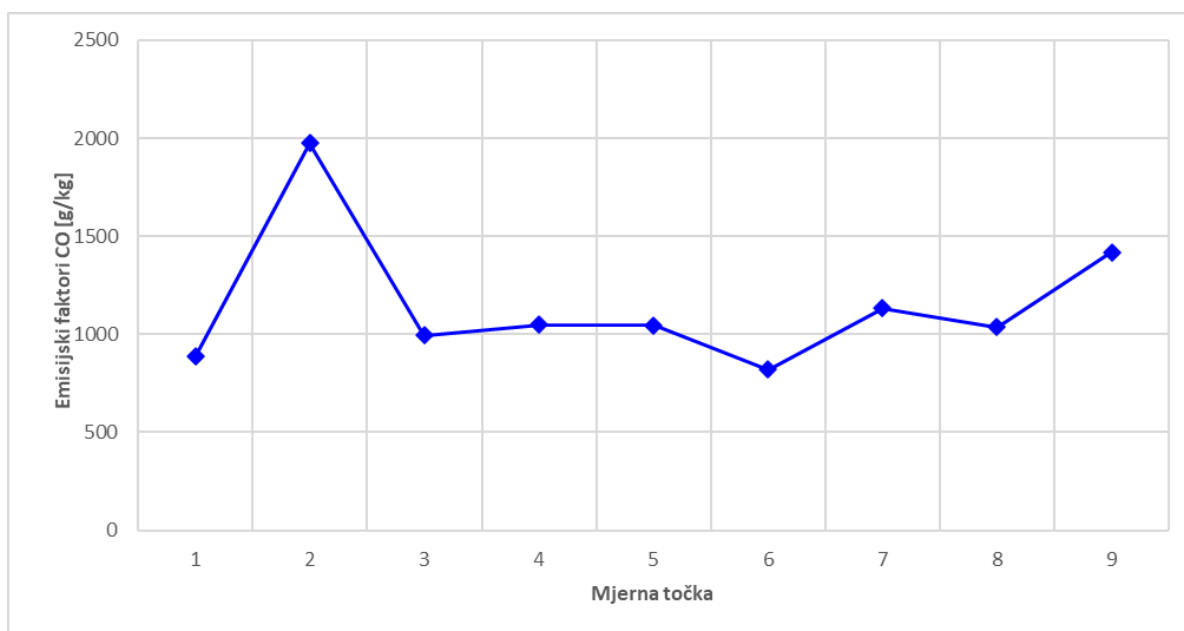
$$EF_{pollutant} = \dot{m}_{pollutant}/FF \quad (11)$$

Izračunati emisijski faktori su prikazani u tablici 12. U tablici je, uz emisijske faktore, prikazani su i podaci o snazi i potrošnji goriva, zabilježeni uređajem EDM.

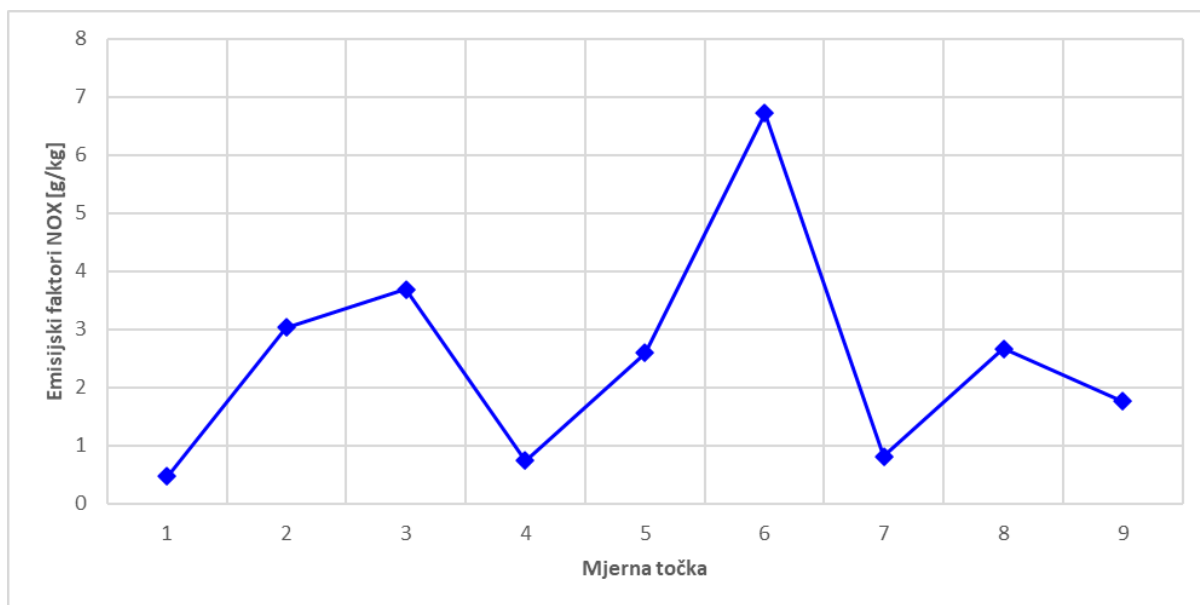
Tablica 12. Emisijski faktori

MASENI PROTOK PLINA m.protok*emisija=[g/h]			PROTOK GORIVA EDM		EMISIJSKI FAKTORI emisija/protok goriva=[g/kg]			%of max fuel flow EDM
CO	NOX	THC	FF [GPH]	FF [kg/h]	CO	NOX	THC	
3130.8	1.66	343.5	1.3	3.54	885.4	0.47	97.14	10
6986.2	10.72	426.3	1.3	3.54	1975.7	3.03	120.56	14
15416.8	57.11	663.8	5.7	15.50	994.4	3.68	42.81	48
3703.1	2.61	305.3	1.3	3.54	1047.3	0.74	86.33	10
9672.1	24.01	406.9	3.4	9.25	1045.9	2.60	44.00	30
15817.8	129.72	719.8	7.1	19.31	819.1	6.72	37.27	59
4003.9	2.87	298.4	1.3	3.54	1132.3	0.81	84.39	10
12692.9	32.63	549.8	4.5	12.24	1037.0	2.67	44.91	38
5015.2	6.23	292.7	1.3	3.54	1418.3	1.76	82.78	10

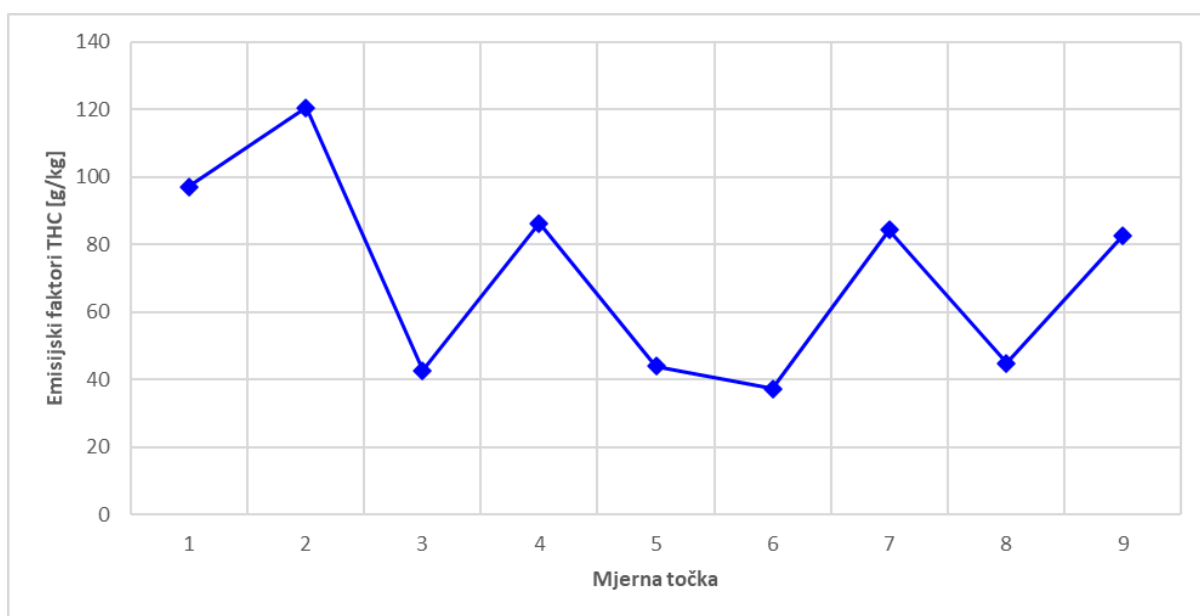
Slike 19, 20, i 21 prikazuju emisijske faktore za ugljikov monoksid, dušikove okside i ukupne ugljikovodike u mjernim točkama.



Slika 19. Emisijski faktori za ugljikov monoksid



Slika 20. Emisijski faktori za dušikove okside



Slika 21. Emisijski faktori za ukupne ugljikovodike

6. Usporedba rezultata

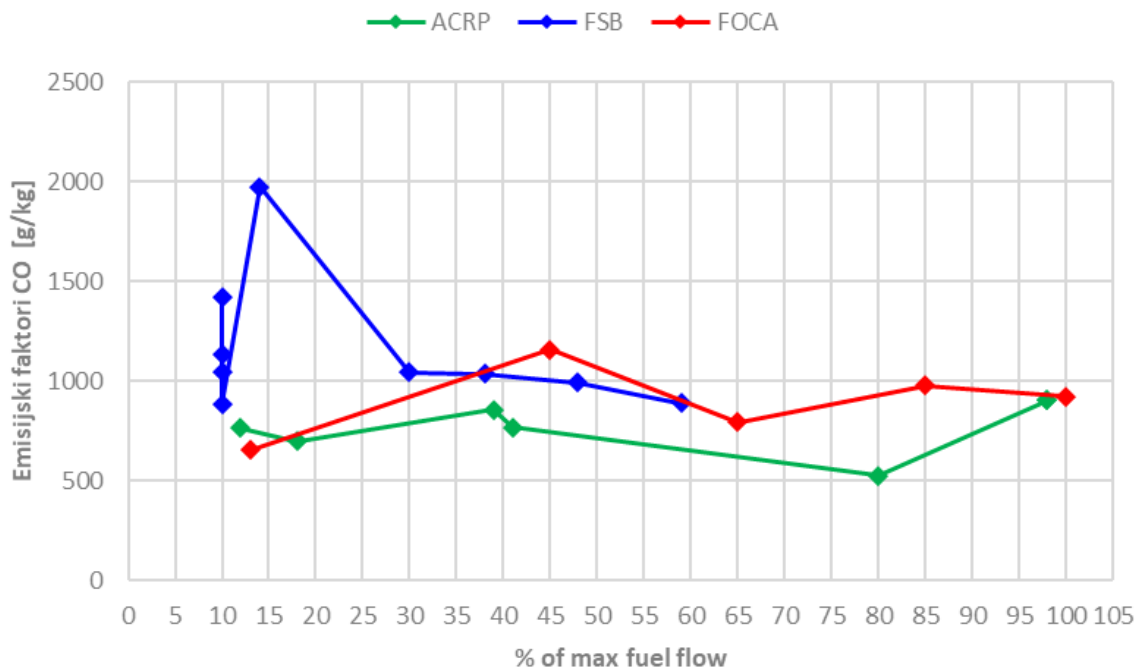
U nastavku su uspoređeni rezultati mjerenja s već dostupnim emisijskim faktorima iz baza podataka od FOCA-e i ACRP-a. U svim slučajevima je korištena bogata smjesa te je zrakoplov bio na zemlji i simulirani su režimi rada.

Tablica 13. prikazuje emisijske faktore za CO, NO_x i THC izmjerene za različitu snagu iskazanu postotkom protoka goriva.

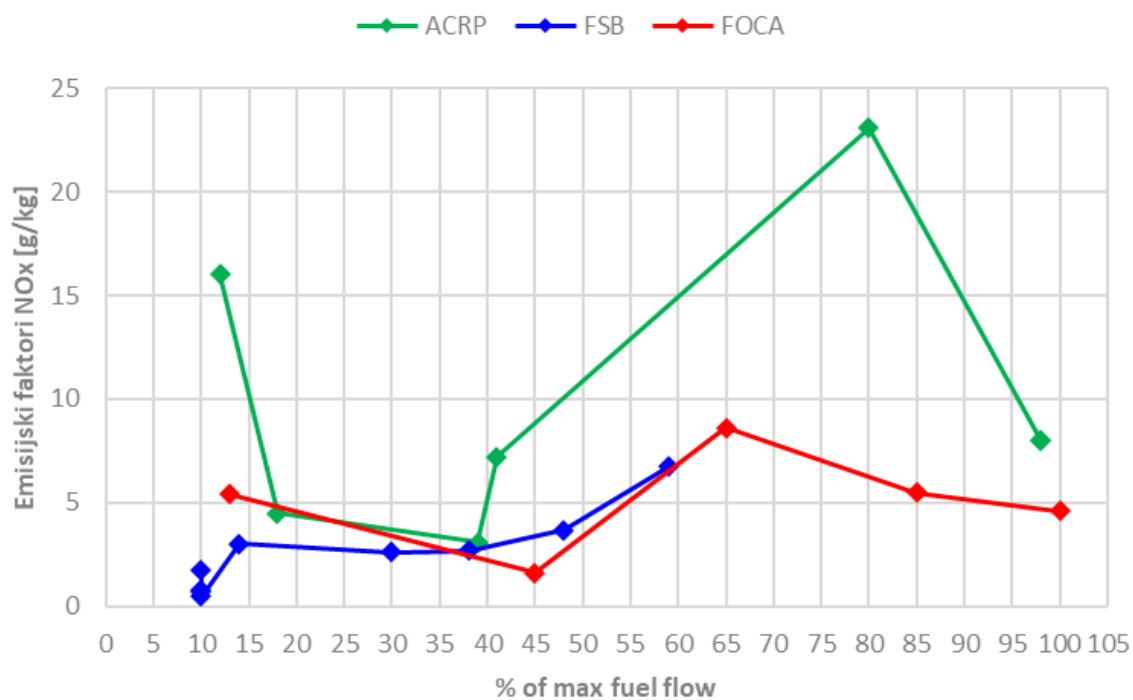
Tablica 13. Usporedba izračunatih emisijskih faktora s dostupnima

% of max fuel flow	EMISIJSKI FAKTORI								
	CO [g/kg]			NOX [g/kg]			THC [g/kg]		
	ACRP	FSB	FOCA	ACRP	FSB	FOCA	ACRP	FSB	FOCA
100			922.9			4.6			8.81
98	905			8			35.5		
98	905			8			35.5		
85			980.3			5.5			8.75
80	525			23.1			39.1		
65			795.1			8.6			11
59		891.1			6.72			37.27	
48		994.4			3.68			42.81	
45			1159			1.6			23.3
41	770			7.2			39.6		
39	857			3.1			50		
38		1037.0			2.67			44.91	
30		1045.9			2.60			44.00	
18	700			4.5			42.5		
14		1975.7			3.03			120.56	
13			654.9			5.4			5.4
12	767			16			96.6		
10		885.4			0.47			97.13	
10		1045.9			0.74			86.33	
10		1132.3			0.81			84.39	
10		1418.3			1.76			82.78	

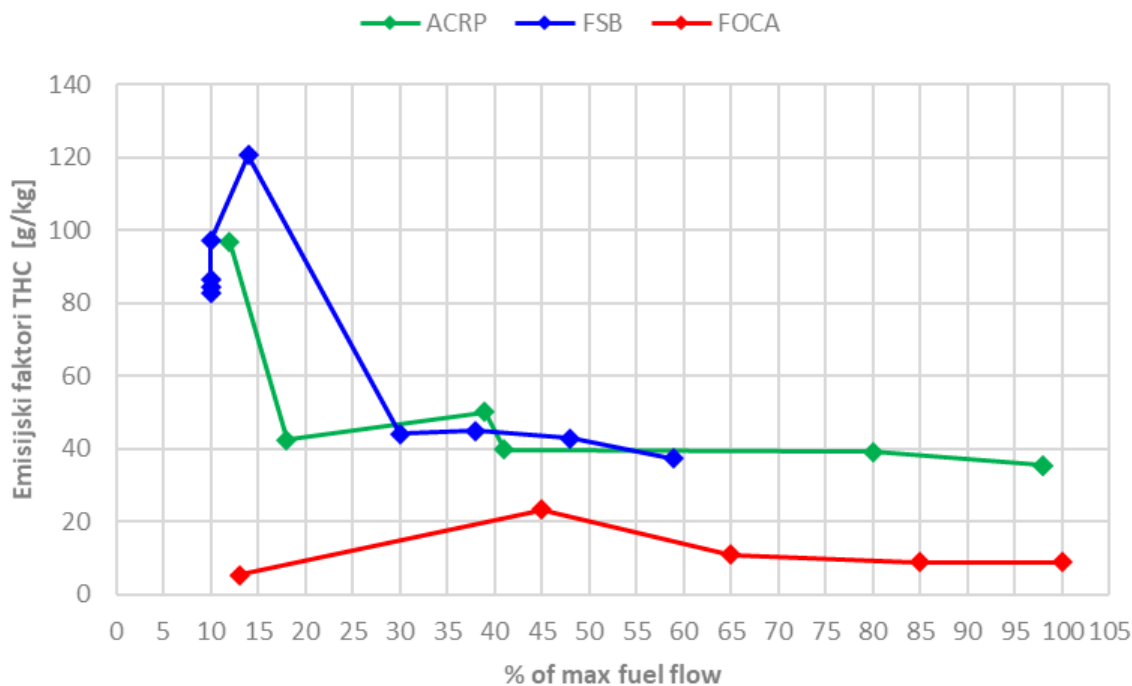
Iz slika 22., 23. i 24. se može zaključiti da iznosi emisijskih faktora za vrijednosti snage veće od 30% prate isti trend rasta i pada kao i kod otprije dostupnih emisijskih faktora.



Slika 22. Usporedba emisijskih faktora za ugljikov monoksid



Slika 23. Usporedba emisijskih faktora za dušikove okside



Slika 24. Usporedba emisijskih faktora za ukupne ugljikovodike

Kod nižih brzina vrtnje, rezultati imaju veća odstupanja. Mogući uzrok je nepreciznost EDM uređaja, koji za različite brzine vrtnje očitava isti protok goriva, a različit tlak u usisnoj cijevi (engl. *Manifold pressure, MAP*). Za 690 RPM očitana je isti protok goriva (1,3 GPH) kao i za 1000 RPM (Slika 25), što upućuje na grešku na uređaju ili slabu osjetljivost uređaja pri manjim brzinama vrtnje.



Slika 25. EDM uređaj pri odgovarajućim brzinama vrtnje motora za sve ispitne točke

7. Zaključak

Emisije zračnog prometa čine značajan udio u ukupnim emisijama stakleničkih plinova koje imaju utjecaj na globalnu klimu. Ispušni plinovi koji se smatraju zagađivačima, uz ugljikov dioksid, su ugljikovi oksidi, dušikovi oksidi i ugljikovodici.

U svrhu provođenja istraživanja izmjerene su emisije motora Lycoming O-320-H2AD koristeći prijenosni uređaj za mjerenje emisija ispušnih plinova PEMS (engl. *Portable Emissions Measurement System, PEMS*). Tijekom mjerenja zrakoplov je bio na zemlji i simulirani su režimi rada motora za različite faze leta. Emisijski faktori ispušnih plinova su izračunati iz izmjerenih emisija i protoka goriva za određene mjerne točke.

Rezultati emisijskih faktora su uspoređeni s otprije dostupnim podacima Saveznog ureda civilnog zrakoplovstva Švicarske (engl. *Federal Office of Civil Aviation, FOCA*) i Američkog aerodromskog istraživačkog programa (engl. *The Airport Cooperative Research Program, ACRP*). Izračunati iznosi emisijskih faktora za vrijednosti snage veće od 30% slični su kao i kod otprije dostupnih emisijskih faktora. Veća odstupanja zabilježena su pri vrijednostima snage manjim od 30%. Uzrok toga može biti slabija osjetljivost EDM uređaja.

Izvođenje mjerenja se moralo prekinuti radi opasnosti od pregrijavanja mjerne opreme. Naime, motor Lycoming serije O-320 je zrakom hlađen motor kojeg hladi struja zraka dok je u letu, a mjerenja su bila izvršena na zemlji. To je dovelo do nedovoljnog hlađenja zrakoplovnog motora te povišenja temperature ispuha što je za posljedicu imalo opasnost od pretjeranog toplinskog opterećenja mjerača masenog protoka ispušnih plinova.

Kako bi rezultati budućih mjerenja bili pouzdaniji, potrebno je u svim mjernim točkama mjerenje ponoviti najmanje 3 puta, tako da se omogući statistička obrada rezultata i utvrdi ponovljivosti rezultata.

Sva mjerenja u ovom radu su provedena s bogatom gorivnom smjesom. U budućim mjerenjima trebalo bi uzeti u obzir ustaljenu praksu promjene bogatstva gorivne smjese radi ekonomičnosti potrošnje goriva tijekom faze leta krstarenje. U skladu s navedenim, potrebno je izvršiti mjerenja s različitim bogatstvom smjese. Također, buduća mjerenja bi trebalo izvršiti u stvarnim uvjetima rada, odnosno dok je zrakoplov u letu.

Planovi za nastavak istraživanja uključuju mjerenja emisija različitih zrakoplovnih klipnih motora te proširenje mjernih kanala (temperatura ispuha, faktor zraka, brzina vrtnje - RPM, tlak u usisnoj cijevi - MAP).

Literatura

- [1] Službene internetske stranice Europske unije, EUR-Lex, Pariški sporazum – Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/content/paris-agreement/paris-agreement.html?locale=hr> (07.08.2022.)
- [2] Enviromental and Energy Study Institute, Issue Brief | The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation (2019, revised 2022) Dostupno na: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation> (07.08.2022.)
- [3] Službene internetske stranice IATA-e, Net-Zero Carbon Emissions by 2050, Dostupno na: <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero> (08.08.2022.)
- [4] ICAO, Glossary V1.2, Dostupno na: https://www.icao.int/dataplus_archive/Documents/20130807/GLOSSARY%20v1%202.pdf (10.08.2022.)
- [5] Operator's Manual Lycoming O-320 Series, Dostupno na: [60297-3011.pdf](https://www.lycoming.com/60297-3011.pdf) (lycoming.com) (15.08.2022.)
- [6] Airport Cooperative Research Program; Emissions from In-Use General Aviation Aircraft Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016.
- [7] Lulić Z., Mahalec I., Kozarac D.: Klipni motori, interna skripta, ver. 5, FSB, listopad 2010.
- [8] IPCC, EFDB emission factor database, Intergovernmental Panel on Climate Change, Dostupno na: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.
- [9] FOCA, Aircraft piston engine emissions - Summary Report, Federal Office of Civil Aviation, Bern, 2007.
- [10] L. Polenus, Emisije vozila u stvarnim uvjetima vožnje, FSB Zagreb, 2021.
- [11] E. Bazijanac, A. Domitrović, Zrakoplovne emisije, Zagreb: Sveučilište u Zgrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2016./17.
- [12] Our World in Data, Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?, Dostupno na: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> (11.9.2022)
- [13] Estimation of Engine Emissions from Commercial Aircraft at a Midsized Turkish Airport, Journal of Environmental Engineering, Volume 134 Issue 3 - March 2008, Dostupno na: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282008%29134%3A3%28210%29> (11.9.2022.)
- [14] M. Jurčić, Određivanje sastava ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora u letu Jurčić, Diplomski rad, Sveučilište u Zgrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2021.
- [15] Pilot's operating handbook - SKYHAWK model 172N, Wichita, Kansas, 1977.