

Jednostavan alat za određivanje potrošnje goriva i emisija motora tijekom leta

Ljutić, Sandro

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:298082>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Sandro Ljutić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Sandro Ljutić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se roditeljima što su mi osigurali uvjete potrebne za studiranje.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću na savjetima i susretljivosti u tijeku izrade ovoga rada, te se također zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Aniti Domitrović i kolegi Luki Pančiću, sa Fakulteta prometnih znanosti na ustupljenim podacima sa letova.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. Lj.' with a flourish at the end.



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Sandro Ljutić** Mat. br.: 0036493714

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Jednostavan alat za određivanje potrošnje goriva i emisija motora tijekom leta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simple tool for determining fuel consumption and engine emissions for a given flight cycle**

Opis zadatka:

Na emisije iz motora, uz konstrukcijske značajke koje se tijekom eksploatacije praktički ne mijenjaju, ključan utjecaj ima način uporabe motora. On se može odrediti snimanjem parametara rada motora u stvarnim uvjetima eksploatacije ili uporabom različitih namjenskih računalnih simulacijskih programa. Kako je snimanje radnih parametara te mjerenje potrošnje goriva i emisija zahtjevno i skupo, značaj simulacija postaje sve značajniji.

U okviru završnog rada treba izraditi jednostavan računalni alat koji će pratiti proizvoljno zadani let zrakoplova i režim rada motora, fazu po fazu, od pokretanja motora pa do ponovnog zaustavljanja motora. Režim rada motora treba pratiti svaku sekundu tj. s frekvencijom 1 Hz.

Na temelju tih podataka, odrediti brzinu vrtnje $n(t)$, snagu motora $P(t)$, moment motora $M(t)$ i srednji efektivni tlak $p_e(t)$, pri čemu vrijeme t ide od $t = 0$ (pokretanje motora) do t_n (zaustavljanje motora). Na osnovu toga, iz tablično definiranih podataka o specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva $g_e(n, p_e)$ te emisijskim faktorima $EF_i(n, p_e)$, odrediti trenutnu potrošnju goriva i trenutne emisije. Na kraju postupka (simulacije) potrebno je odrediti ukupnu količinu potrošenog goriva i ukupne emisije.

Za određivanje (praćenje) radnih parametara motora koristiti dostupan program npr. *Flight Simulator X*, a za izračun potrošnje goriva i emisija koristiti pojednostavljene dijagrame specifične efektivne potrošnje goriva i emisijskih faktora. Prema dogovoru s mentorom, za demonstraciju i validaciju rada algoritma, dijagrami mogu biti i generički i/ili se temeljiti na preporučenim emisijskim faktorima dostupnim u literaturi (EEA, HBEFA).

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

Za izradu vlastitog programa proučiti postojeće javno dostupne programske pakete otvorenog koda kao što su CO2MPAS i VECTO.

Funkcionalnost računalnog programa treba dokazati na nekoliko jednostavnih primjera leta kao što je školski krug ili let na ruti.

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

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predvideni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Ugljikov monoksid.....	5
1.2. Ugljikov dioksid.....	5
1.3. Neizgorjeli ugljikovodici	6
1.4. Vodik.....	6
1.5. Dušikovi oksidi	6
1.6. Olovo.....	7
2. EMISIJE MOTORA	8
2.1. Zrakoplov i motor	9
2.2. Karakteristike motora.....	12
2.3. Uređaj za praćenje parametara motora EDM 900.....	20
2.4. Mjerni sustavi.....	22
3. RAČUNALNI ALAT	23
3.1. Raspon brzine vrtnje po fazama	25
3.2. <i>h-t</i> dijagram	26
3.3. Raspon snage po fazama	28
3.4. Raspon momenta po fazama	29
3.5. <i>M-n</i> dijagram.....	31
3.6. Emisijski faktori i ukupne emisije ispušnih plinova te ukupna potrošnja goriva	32
3.7. Dijagramski prikazi emisija, potrošnje goriva i performansi zrakoplovnog klipnog motora	41
4. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Prosječan sastav nepročišćenih ispušnih plinova Ottovog motora (prije katalizatora) [2]	2
Slika 1.2. Prosječan sastav nepročišćenih ispušnih plinova Diesellovog motora (prije katalizatora) [2]	2
Slika 1.3. Promjena emisije štetnih ispušnih plinova od 1990. godine [3]	3
Slika 1.4. Detonacija u cilindru Ottovog motora [1]	7
Slika 2.1. Shematski prikaz različitih faza leta [8]	9
Slika 2.2. Zrakoplov Cessna 172N Skyhawk koji se koristio u istraživanju (9A-DMB) (Izvor: iz vlastitog albuma)	10
Slika 2.3. Motor zrakoplova Cessna 172N Skyhawk Lycoming O-320-H2AD (Izvor: iz vlastitog albuma)	11
Slika 2.4. Brzinska karakteristika motora pri punom opterećenju [1]	12
Slika 2.5. Utjecaj faktora zraka na efektivnu snagu P_e i specifičnu potrošnju goriva g_c [1]....	13
Slika 2.6. Faktor zraka u različitim područjima rada Otto motora s rasplinjačem [1]	13
Slika 2.7. Utjecaj faktora zraka λ na emisiju štetnih ispušnih plinova, snagu i specifičnu potrošnju goriva, te na potreban oktanski broj [1]	14
Slika 2.8. Shematski prikaz toka snage u motoru [1]	15
Slika 2.9. Motor priključen na mjernu kočnicu [13]	15
Slika 2.10. Prikaz radne točke motora [1]	16
Slika 2.11. Pogon propelera promjenjive karakteristike (1-teški propeler, 2-propeler koji iskorištava najveću snagu motora, 3-lagani propeler)	17
Slika 2.12. Promjena snage i specifične potrošnje goriva [1]	18
Slika 2.13. Dijagram performansi motora na razini mora (dole) i na visini (gore) [11]	19
Slika 2.14. Izgled uređaja EDM 900 [14]	20
Slika 2.15. Dio prikaza zabilježenih mjerenja EDM uređaja u programu Microsoft Excel	21
Slika 3.1. Ulazni parametri od pokretanja motora do 12 sekundi. Broj 250,3 predstavlja radne sate do trenutnog leta od kad je na zrakoplovu instaliran uređaj EDM 900. Let traje 3592 sekundi odnosno 0:59:52	23
Slika 3.2. Satelitski prikaz aerodroma Lučko putem digitalne mrežne karte Google Maps	24
Slika 3.3. h-t dijagram rute koju je odvezio pilot učenik 11.08.2020. Dva netipična spuštanja su provedena iz razloga da se pilot pripremi na različite uvjete i potrebe tijekom leta.	27
Slika 3.4. M-n dijagram	32
Slika 3.5. Emisijski faktori motora Lycoming O-320 [20]	33
Slika 3.6. Više komponentni dijagramski prikaz performansi motora, visine i faze leta	41

Slika 3.7. Dijagramski prikaz kumulativne potrošnje goriva.....	42
Slika 3.8. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije CO ₂	42
Slika 3.9. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije NO _x	43
Slika 3.10. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije C _n H _m	43
Slika 3.11. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije CO.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Euro norme [4]	4
Tablica 2. U polju iznad tablice definirana je funkcija frequency koja računa vrijeme rada u pojedinom rasponu brzine vrtnje tako što zbraja broj polja u kojima je brzina vrtnje unutar raspona	25
Tablica 3. Raspon brzine vrtnje po fazama te vremenski udio pojedine faze u ukupnom letu	26
Tablica 4. U polju iznad tablice definirana je funkcija koja računa snagu motora, a argument funkcije je postotna snaga motora u svakom trenutku leta	28
Tablica 5. Raspon snage po fazama te vrijeme rada u pojedinoj fazi	29
Tablica 6. U polju iznad tablice definirana je funkcija koja računa moment motora, a argumenti funkcije su snaga i brzina vrtnje motora u svakom trenutku leta.....	30
Tablica 7. Raspon momenata po fazama te vrijeme rada u pojedinoj fazi.....	31
Tablica 8. U polju iznad tablice definirana je funkcija average, te su prikazani srednji maseni protoci goriva po fazama.....	34
Tablica 9. U polju iznad tablice je prikazan kod kojim se računa emisijski faktor NO_x za drugu fazu tj. taksiranje. Također prikazane su i ostale vrijednosti - konstante kao na slici 3.5. opisane gore navedenim postupkom, te emisijski faktor CO_2	35
Tablica 10. Dio koda sa if and naredbom koji određuje fazu leta (cijeli kod nalazi se ispod slike).....	36
Tablica 11. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase CO_2 u svakoj sekundi.....	37
Tablica 12. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase NO_x u svakoj sekundi, a u koloni „Q“ se nalazi kumulativna vrijednost koja se računa gore opisanom postupkom	38
Tablica 13. Tablica „Faze“ u kojoj je označena kolona „H“ u kojoj se nalaze vrijednosti emisijskih faktora po fazama za NO_x	38
Tablica 14. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase C_nH_m u svakoj sekundi....	39
Tablica 15. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase CO u svakoj sekundi.....	39
Tablica 16. Sumarni podaci o letu s utvrđenim rezultatima.....	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
n	okr/s	Brzina vrtnje motora
P_e	bhp	Snaga motora na kočnici (<i>Brake HorsePower</i>)
N_{cikl}	okr/cikl	Broj ciklusa motora
λ	-	Faktor (pretička ili viška) zraka
Z	kgz/kgG	Stvarna količina zraka s kojom izgara 1 kg goriva u cilindru
Z_0	kgz/kgG	Stehiometrijska količina zraka
P_e	W	Efektivna snaga motora
P_i	W	Indicirana snaga motora
P_m	W	Snaga mehaničkih gubitaka motora
z	-	Broj cilindara
V_H	m ³	Radni volumen cilindra
T	-	Broj taktova
M	Nm	Moment
f	s ⁻¹	Frekvencija ciklusa (broj radnih ciklusa u jedinici vremena u jednom cilindru)
g_e	kg/kWh	Specifična efektivna potrošnja goriva
\dot{G}	kgG/h	Potrošnja goriva u jednom satu
p_e	Pa	Srednji efektivni tlak
η_e	-	Efektivni stupanj korisnosti
λ_{pu}	-	Stupanj punjenja cilindra
$\rho_{z,0}$	kg/m ³	Gustoća zraka pri uvjetima standardne atmosfere
H_d	MJ/kgG	Donja ogrijevna vrijednost goriva
m	kg	Masa svježe usisane radne tvari u cilindru
m_{ref}	kg	Masa radne tvari koja bi stala u V_H kad bi u njemu vladalo stanje standardne atmosfere
η_i	-	Indicirani stupanj korisnosti
η_m	-	Mehanički stupanj korisnosti
p_i	Pa	Srednji indicirani tlak
p_m	Pa	Srednji tlak mehaničkih gubitaka
\dot{Q}_1	kW	Dovedeni toplinski tok
g_i	kg/kWh	Specifična indicirana potrošnja goriva
P_h	kW	Snaga motora na visini
P_0	kW	Snaga motora na razini mora
p	Pa	Tlak na visini leta
p_0	Pa	Tlak na razini mora
T	K	Temperatura na visini leta
T_0	K	Temperatura na razini mora

y	m	Visina u traženoj točki
y_1	m	Početna visina
y_2	m	Krajnja visina
x	s	Vrijeme u traženoj točki
x_1	s	Početno vrijeme
x_2	s	Krajnje vrijeme
P_{max}	HP	Maksimalna deklarirana snaga motora
P (%)	%	Postotna snaga motora
ω	s ⁻¹	Brzina vrtnje
r^2	-	Srednje kvadratno odstupanje
R^2	-	Srednje kvadratno odstupanje aritmetičke sredine
ρ_g	kg/m ³	Gustoća goriva (benzina)
m_g	kg	Masa goriva
m_C	kg _c	Masa ugljika u gorivu

SAŽETAK

Globalni cilj svijeta je smanjenje kako štetnih emisija tako i emisija CO₂. To predstavlja jedan od ključnih zadataka ljudske vrste. U ovom radu cilj je izraditi model koji će proračunati emisije zrakoplovnog klipnog motora, a pri tome će uzeti u obzir parametre kao što su: trenutna snaga motora, režim rada motora, faktor zraka i emisijski faktori ispušnih plinova. U radu će se posebno obraditi prazni hod motora, taksiranje, polijetanje i penjanje, krstarenje, spuštanje i slijetanje, te će se pratiti emisije motora i potrošnja goriva po fazama leta. Značaj modela računalnog alata je u tome što je jeftiniji od mjerenja, a poprilično dobro se poklapa s rezultatima mjerenja u čak 96 % stvarnih izmjerenih rezultata u odnosu na modelske rezultate.

Ključne riječi: proračun emisija zrakoplovnog klipnog motora, režim rada motora, emisijski faktori ispušnih plinova

SUMMARY

The global goal of the world is to reduce pollutatn emissions and CO2 emissions. This is one of the key tasks of the human species. In this final paper, the aim is to develop a model that will calculate the emissions of an aircraft piston engine, taking into account parameters such as: current engine power, engine mode, air-fuel ratio (AFR) and exhaust emission factors. The final paper will deal specifically with engine idle, taxiing, take-off and climbing, cruising, descent and landing, and will monitor engine emissions and fuel consumption by flight phases. The significance of the computer tool model is that it is cheaper than measuring, and it matches quite well with the measurement results in as many as 96% of the actual measured results compared to the model results.

Key words: aircraft piston engine emission calculation, engine operation mode, exhaust emission factors

1. UVOD

Emisije motora zadnjih godina imaju značajan utjecaj u njihovom plasiranju na tržištu zbog strogih regulativa koje moraju ispoštovati. Pojedini plinovi koji nastaju izgaranjem u motorima su staklenički plinovi koji pridonose efektu staklenika (ako se u atmosferi nalaze vodena para (H_2O), ugljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4), didušikov oksid (N_2O) i ozon (O_3) oni upijaju energiju infracrvenog zračenja te je emitiraju prema površini zemlje) što dovodi do globalnog zatopljenja, a ostali plinovi su štetni za zdravlje ljudi te uzrokuju primjerice respiratorne probleme. Izgaranje je kemijski proces kod kojeg dolazi do oksidacije gorivih sastojaka nekog goriva.

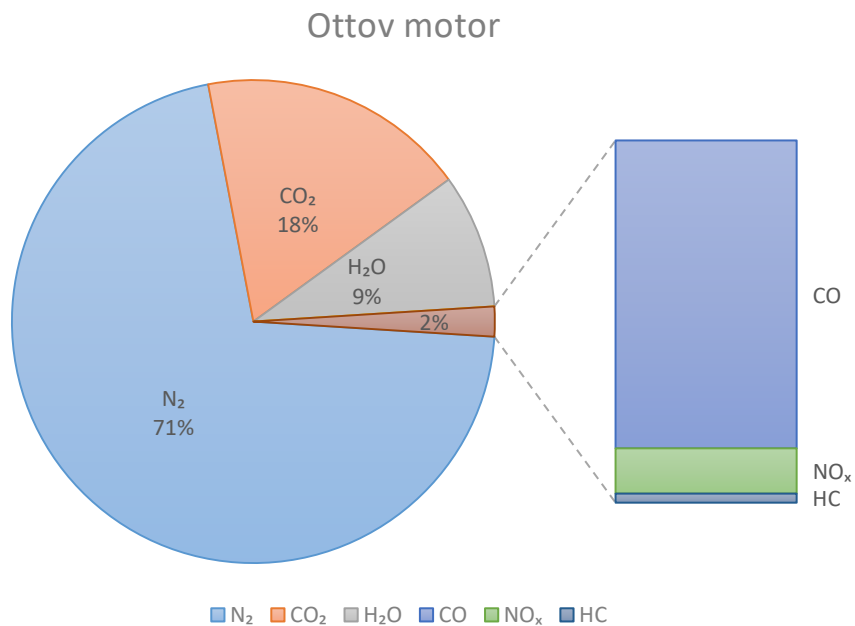
U ovom radu prate se emisije štetnih ispušnih plinova u određenom vremenskom periodu s frekvencijom 1 Hz.

Kod izgaranja razlikuje se potpuno i nepotpuno izgaranje.

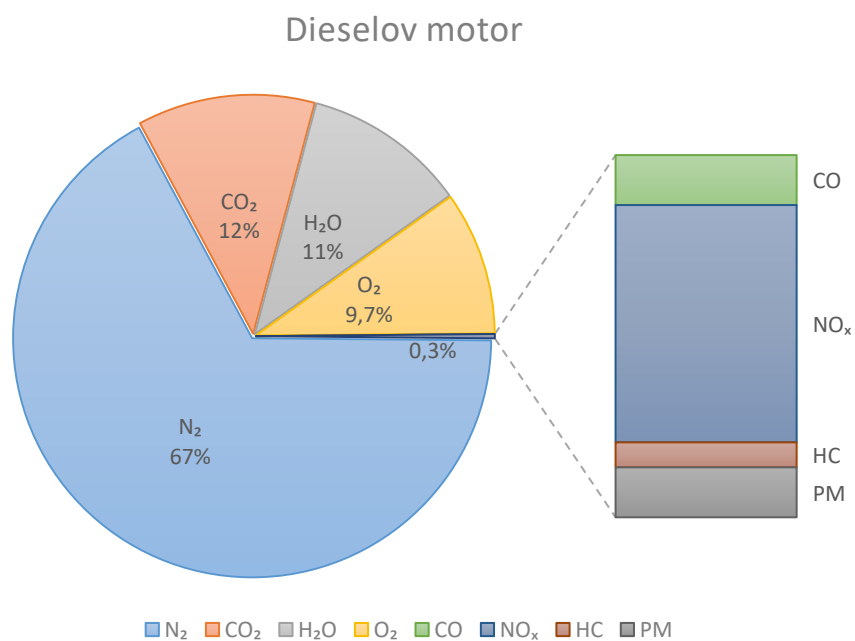
Prilikom potpunog izgaranja ispušni plinovi se sastoje od kisika (O_2), dušika (N_2), ugljikovog dioksida (CO_2), vodene pare (H_2O) i sumporovog dioksida (SO_2) (pojavljuje se kod brodova, jer oni za svoj pogon koriste tzv. teško gorivo (engl. *Heavy Fuel Oil* - HFO) koje nije rafinirano i koje u sebi sadrži značajan udio sumpora). Kisik i dušik se dovode u cilindar iz zraka u kojem se nalaze (za teorijske potrebe proračuna) u količinskom omjeru $21\% \frac{kmol O_2}{kmol Z}$ i $79\% \frac{kmol N_2}{kmol Z}$. Potpuno izgaranje podrazumijeva idealnu izmiješanost smjese goriva i zraka u cilindru koja se postiže intenzivnim vrtložnim strujanjem u cilindru (*swirl* ili vrtlog oko uzdužne osi cilindra i *tumble* ili vrtlog oko poprečne osi cilindra, koji se postižu u ovisnosti o obliku usisnog kanala) te što manjim volumenom kapljica. Idealna izmiješanost smjese goriva i zraka osigurava da se tijekom oksidacije (izgaranja) svaka molekula goriva veže za molekulu kisika iz zraka, a da pri tome stehiometrijske jednačbe budu zadovoljene. Stehiometrijska količina zraka za zrakoplovne klipne motore koji koriste gorivo AVGAS 100 LL iznosi $14,7 \frac{kg_Z}{kg_G}$ [1].

Nepotpuno izgaranje je takvo izgaranje pri kojem nakon završetka procesa izgaranja dio gorivih elemenata nije izgorio te se ispušni plinovi sastoje od gore navedenih ispušnih plinova pri potpunom izgaranju te ugljikovog monoksida (CO), neizgorjelih ugljikovodika (C_nH_m), vodika (H_2), sumporovih oksida (SO_x), dušikovih oksida (NO_x) i olova (Pb).

Volumni udjeli sudionika ispušnih plinova prikazani su na slici 1.1. za Ottov motor i slici 1.2. za Dieselov motor.



Slika 1.1. Prosječan sastav nepročišćenih ispušnih plinova Ottovog motora (prije katalizatora) [2]

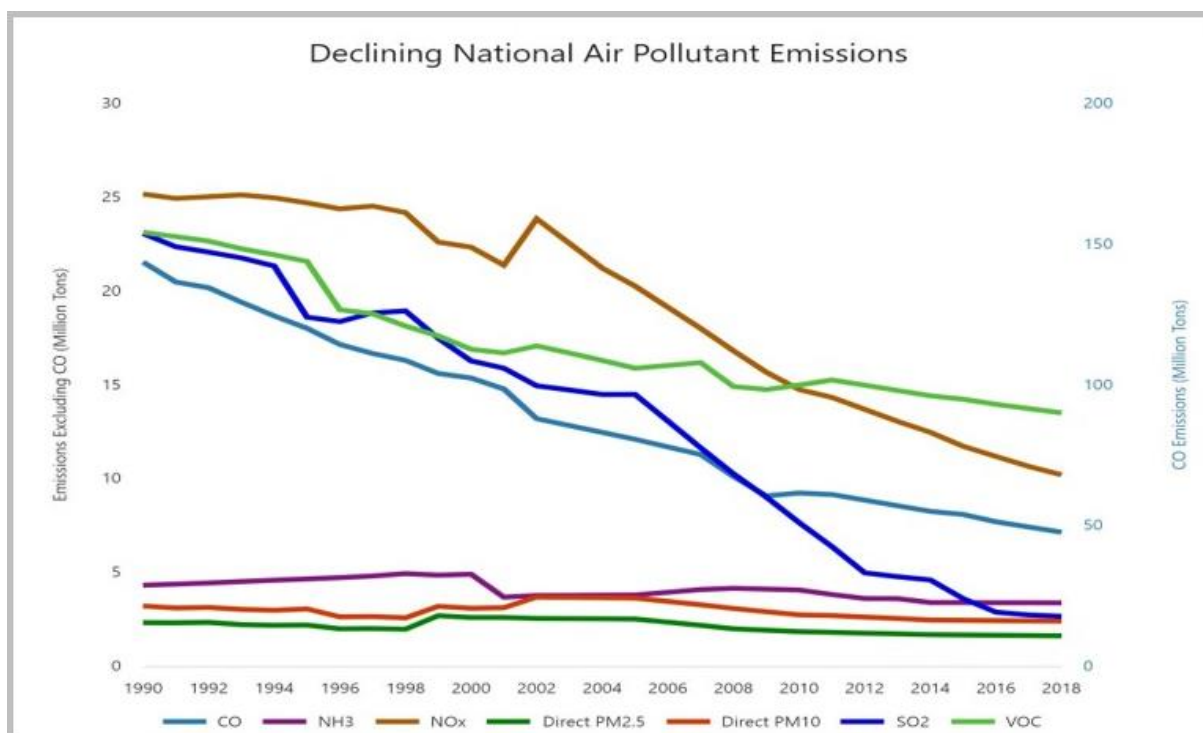


Slika 1.2. Prosječan sastav nepročišćenih ispušnih plinova Dieselovog motora (prije katalizatora) [2]

Do nepotpunog izgaranja dolazi u slučaju kada gornji uvjeti za potpuno izgaranje nisu ispunjeni, primjerice ako je faktor pretička zraka manji od jedan. Nepotpuno izgaranje je realan slučaj, a također je i posljedica dotrajalih dijelova motora. Uslijed nepotpunog izgaranja nastaju štetni ispušni plinovi.

Pri izradi ovog rada uzima se u obzir činjenica da se danas SO_x i olovo (Pb) praktički više ne spominju u prometu cestovnih vozila i zrakoplova. SO_x se pojavljuje još samo kod brodova.

Od 1990. godine dolazi do otprilike 50 % smanjenja emisije štetnih ispušnih plinova (slika 1.3.). Smanjenje emisija štetnih ispušnih plinova potaknuto je uvođenjem Euro standarda za smanjenje emisija štetnih ispušnih plinova koje su se tijekom godina pooštrevale. Smanjenje je postignuto uporabom: katalizatora (Euro 1 koja je postala obavezna za sva vozila od 1993. godine), smanjenjem potrošnje goriva primjerice ugradnjom turbokompresora na vozilima, izravnim elektronskim ubrizgavanjem goriva, smanjenjem radnog obujma motora (engl. *downsizing*), te korištenjem novih oblika goriva – biogoriva, obnovljivih izvora energije, električnih vozila te vozila na plin i vodik.



Slika 1.3. Promjena emisije štetnih ispušnih plinova od 1990. godine [3]

1992. godine u Europi uvode se europski ekološki propisi za motorna vozila (poznatiji kao Euro standardi iako to nisu standardi nego norme). To su pravila kojima se ograničava emisija dušičnih oksida (NO_x) u ispušnim plinovima Ottovih i Dieselovih motora te emisija krutih čestica (engl. *particulate matter* - PM) iz Dieselovih motora. Granice navedenih emisija se s godinama snizuju tj. postrožuju, a izražavaju se u g/km. Ova ograničenja su vrlo važna za nova vozila koja se uvoze u Europsku Uniju, jer bi prekoračenje ograničenja za bilo koju od ovih razina spriječilo registraciju automobila.

Posljednja norma točnije EU direktiva koja je na snazi za sva novo registrirana vozila od 1. rujna 2015. je EURO-6, a objavljena je godinu dana ranije. Prema toj EU direktivi vozila s Otto motorima ne bi smjela prijeći granicu od 0,06 g/km emisije dušičnih oksida, a vozila s Diesel motorima ne bi smjela prijeći 0,08 g/km emisije dušičnih oksida kao ni 0,0045 g/km krutih čestica.

Tablica 1. Euro standardi [4]

Euro standard	Introduction date		Emission limits		
	New approvals	All new registrations	Petrol NO_x	Diesel NO_x	Diesel PM
Euro-1	1 July 1992	31 December 1992	0.97g/km*	0.97g/km*	0.14g/km
Euro-2	1 January 1996	1 January 1997	0.5g/km*	0.9g/km* (direct injection)	0.1g/km
Euro-3	1 January 2000	1 January 2001	0.15g/km	0.5g/km	0.05g/km
Euro-4	1 January 2005	1 January 2006	0.08g/km	0.25g/km	0.025g/km
Euro-5	1 September 2009	1 January 2011	0.06g/km	0.18g/km	0.005g/km
Euro-6	1 September 2014	1 September 2015	0.06g/km	0.08g/km	0.0045g/km

Sljedeća norma koja je još u razvoju je Euro-7, a u budućnosti se očekuje da će navedene emisije biti dodatno reducirane, jer se teži ka nultoj emisiji navedenih ispušnih plinova.

1.1. Ugljikov monoksid

Ugljikov monoksid je plin bez boje, mirisa i okusa izuzetno otrovan. Nastaje nepotpunim izgaranjem ugljika kod motora sa unutarnjim izgaranjem i pri vulkanskim procesima.



Izloženost čovjeka tom plinu uzrokuje smanjeno vezivanje kisika za hemoglobin i mioglobin zbog toga što ugljikov monoksid ima 150 do 300 puta veći afinitet prema hemoglobinu od kisika te time dolazi do pojave glavobolje, vrtoglavica, tahikardije, gubitka svijesti i na kraju smrti. Ako je volumni udio ugljikovog monoksida u zraku 0,2 do 0,4 %, dolazi do gubitka svijesti, a nakon duljeg vremena i do smrti. Prva pomoć pri trovanju ugljikovim monoksidom je iznošenje otrovanoga na svjež zrak, umjetno disanje i udisanje kisika. Do sada nije poznato njegovo štetno djelovanje na okoliš.

1.2. Ugljikov dioksid

Ugljikov dioksid je plin bez boje, a pri većim koncentracijama ima miris (oštar, kiselkast) i okus te je u tom slučaju opasan po život. On je staklenički plin (glavni uzročnik efekta staklenika) što ima za posljedicu povišenje temperature atmosfere, a to je u korelaciji s globalnim zatopljenjem. Posljedice globalnog zatopljenja su mnogobrojne od povišene prosječne godišnje temperature do podizanja razine mora zbog otapanja ledenjaka. Uz vodenu paru glavni je sudionik ispušnih plinova koji nastaje prilikom izgaranja goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem.



Osim kod izgaranja oslobađa se i kod staničnog disanja, pri vulkanskim procesima i dr.

U travnju 2020. godine ugljikov dioksid u zemljinoj atmosferi bio je u koncentraciji od 0,041361 % u jednom metru kubnom zraka [5]. Ugljikov dioksid je otrovan u većim koncentracijama: 1 % CO₂ će učiniti neke ljude pospanim, a od 7 % do 10 %, javlja se nesvjestica, glavobolja, slabljenje vida i sluha, a gubljenje svijesti može biti od nekoliko minuta do nekoliko sati.

1.3. Neizgorjeli ugljikovodici

Neizgorjeli ugljikovodici se često pojavljuju u ispušnim plinovima, a znak su vrlo lošeg izgaranja. Otrovnici su i kancerogeni pa posljedično mogu biti i smrtonosni. Ugljikovodici onečišćuju atmosferu. U okoliš dospijevaju prilikom preradbe i uporabe nafte, izgaranja goriva, ugljena i dr. Posebno su štetni aromatski i klorirani ugljikovodici. Podaci o nekim ugljikovodicima kao što su etan i acetilen iz uzoraka ispušnih plinova zrakoplova preuzetih na sjeveru i jugu Tihog oceana pokazuju koncentracije od 0,5 do 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ za etan i od 0,05 do 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ za acetilen [6]. Ugljikovodici doprinose stvaranju prizemnog ozona i fotokemijskog smoga u atmosferi. Posljedice ozona su iritacija očiju, oštećenje pluća i respiratorni problemi.



1.4. Vodik

Vodik je neotrovni plin bez boje, mirisa i okusa. Vodik je u zemljinoj atmosferi rasprostranjen u raznim spojevima, ali u malim količinama svega 0,000055 %, dok u Svemiru čini 75 % njegove mase [7]. Prisutan je u atmosferi, zemnom plinu i vulkanskim plinovima. Također može biti i rezultat nepotpunog izgaranja što prikazuje jednadžba (1.4). Vodik je opasan kao plin praskavac u zraku, a osim toga, tekući vodik je opasan, jer je vrlo niske temperature ($-252,87^\circ\text{C}$), što prilikom dodira može dovesti do smrzotina na prstima. Vodik postaje tekuć ohlađivanjem na temperaturu vrelišta koja iznosi $-252,87^\circ\text{C}$ pri standardnom tlaku, a u praksi se proizvodi najčešće iz prirodnog plina.



1.5. Dušikovi oksidi

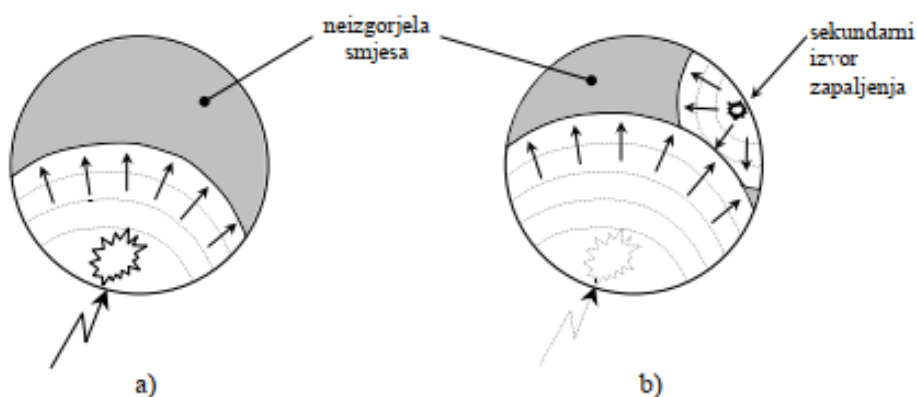
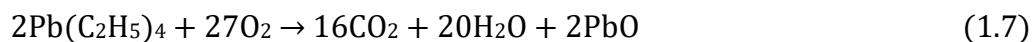
Dušikovi oksidi prisutni u ispušnim plinovima (nastaju zbog visoke temperature izgaranja) u manjoj su ili većoj mjeri otrovni te nadražuju ljudske dišne organe. Dušikovi oksidi mogu biti prisutni kao bezbojni i crvenkasto-smeđi dušični oksid (NO) te vrlo toksičan i reaktivan dušikov dioksid (NO_2). Oni su glavna komponenta zagađenja atmosfere, uključeni su u stvaranje kiselih kiša i fotokemijskoga smoga te stvaranje i razgradnju ozonskoga sloja u stratosferi. U prirodnom ciklusu dušika, dušikovi oksidi su bitna sastavnica nitrifikacije – proces kod kojeg dušične bakterije u tlu pretvaraju amonijak u nitrite, a potom u nitrate te se na taj način obogaćuje dušikom kojeg iskorištavaju biljke.



1.6. Olovo

Olovo se u ispušnim plinovima nalazi u obliku para i prašine u različitim spojevima. Izgaranjem tetraetil-olova ($Pb(C_2H_5)_4$) nastaje olovov monoksid (PbO) koji se udisanjem unosi u organizam. Olovo i njegovi spojevi su zagađivači atmosfere te su otrovni ako se unesu u organizam. Rizik od pojave simptoma prilikom trovanja povećava se kako raste koncentracija olova u krvi. U slučaju visoke koncentracije olova u krvi postoji veliki rizik od oštećenja mozga (rijetko kod odraslih, ali češće kod djece). Trajno povišena koncentracija olova u krvi, ali u manjoj mjeri, povećava rizik za nastanak mentalne retardacije kod djece. Kod djece i odraslih može se razviti i anemija.

Današnja benzinska goriva za cestovna vozila više ne sadrže olovne spojeve upravo zbog njegovog štetnog utjecaja te im se kao antidetonator dodaje metil-tert-butil eter ($(CH_3)_3COCH_3$), a kod zrakoplovnih klipnih motora olovni spojevi su još uvijek prisutni, ali u znatno smanjenim količinama u odnosu na nekad.



Slika 1.4. Detonacija u cilindru Ottovog motora [1]

2. EMISIJE MOTORA

Prilikom eksploatacije motora on prolazi kroz nekoliko režima rada, a možemo ih razlikovati prema tome radi li on na konstantnoj brzini vrtnje (stacionarno opterećenje) ili se brzina vrtnje mijenja u vremenu - povisuje ili snizuje (nestacionarno opterećenje). Proračun se oslanja na četverotaktne motore te se prema brzini vrtnje (n) može odrediti koliko se ciklusa u motoru odradilo. Motor radi prema Ottovu ciklusu.

$$N_{cicl} = \frac{n}{2} \quad (2.1)$$

U radu su režimi motora podijeljeni u četiri grupe u ovisnosti o fazi leta i jedna grupa u kojoj je prazni hod motora. Faze leta su: taksiranje, polijetanje, krstarenje i slijetanje, a prikazane su na slici 2.1.

Prazni hod (engl. *idle*) je stanje motora kada on ne isporučuje gotovo nikakvu snagu za pogon zrakoplova. Potisak pogonske elise je premalen da bi se zrakoplov pokrenuo. Svrha praznog hoda je zagrijavanje ulja u motoru kako bi mu se povećala fluidnost te postepeno zagrijavanje motora zbog intenziteta toplinskih naprežanja.

Taksiranje je svako kretanje zrakoplova po manevarskim površinama aerodroma. Ono može biti taksiranje ka pisti, taksiranje ka poziciji za polijetanje ili taksiranje od piste (nakon slijetanja, kada se avion uputi ka parking poziciji).

Polijetanje se odvija na poletnoj stazi. Pilot najprije povisuje snagu u nekim slučajevima i do maksimalne te otpušta kočnice i zrakoplov počinje ubrzavati. U nekom trenutku zrakoplov se odvaja od piste. Polijetanje se dalje nastavlja sve do postizanja predviđene visine krstarenja.

Krstarenje je faza u kojoj zrakoplov leti sa smanjenom snagom motora (oko 60 %) te održava željenu visinu i brzinu. Ako se sagleda vremenski u odnosu na ostale faze leta, ova faza ima daleko najveći udio u vremenu rada motora.

Faza slijetanja počinje kada zrakoplov počne prilaziti dolaznom aerodromu i kada krene postupno smanjivati visinu do trenutka kad mu se brzina ne smanji na onu potrebnu za taksiranje.

U radu su proračuni provedeni u odnosu na rutu koju je odvezio pilot učenik na zrakoplovu Cessna 172N Skyhawk 9A-DMB. Ruta (kao i svaki let) se sastoji od pokretanja motora, provjere sustava koju obavlja pilot, taksiranja do poletne staze, polijetanja i penjanja, krstarenja, spuštanja i slijetanja, te taksiranja do parkirnog mjesta.



Slika 2.1. Shematski prikaz različitih faza leta [8]

2.1. Zrakoplov i motor

Zrakoplov na kojemu su provedena istraživanja je Cessna 172N Skyhawk proizvedena 1977. godine koji je u vlasništvu Fakulteta prometnih znanosti s registracijom 9A-DMB (slika 2.2.). Cessna 172N Skyhawk je američki zrakoplov sa četiri sjedala, jednim klipnim motorom i visokom ugradnjom krila. Skyhawk označuje nadograđenu verziju modela 172 pretežno sa strane avionike zrakoplova. Zrakoplov koristi podvozje tipa tricikl s jednim kotačem ispod nosa zrakoplova, a preostala dva ispod krila. Krila su pravokutna. Zrakoplov je poznat prema svojoj dugovječnosti te je u toj kategoriji najbolji u povijesti. Cessna 172 je i danas prisutan u proizvodnji, a tijekom godina proizvedene su mnoge varijante navedenog modela 172. Cijena Cessne 172N Skyhawk je 1956. godine iznosila 8,700 USD, 1987. godine u SAD-u bila je 29.950 USD [9], a današnja cijena novih je 479.900 USD [10].



Slika 2.2. Zrakoplov Cessna 172N Skyhawk koji se koristio u istraživanju (9A-DMB)
(Izvor: iz vlastitog albuma)

U zrakoplov su ugrađivani različiti motori ovisno o proizvođaču (*Lycoming*, *Continental*) i snazi (145-210 bhp (108-157 kW)). Proizvođač motora navedenog zrakoplova je *Avco Lycoming*, a model je O-320-H2AD (slika 2.3.). Motor je četverotaktni (4T) atmosferski, zrakom hlađen, a snaga tj. moment se sa radilice direktno prenosi na propeler bez posrednika (sustav prijenosnika), ima četiri cilindra koji su smješteni horizontalno (Bokser motor) jedan nasuprot drugom ukupne zapremnine 5241cm^3 ($319,8\text{ in}^3$). Snaga motora je 160 bhp (119 kW) pri 2700 okr/min. Priprema smjese benzina i zraka odvija se u rasplinjaču.

Proizvođač propelera je *McCaughey Accessory Division*. Propeler ima jednu elisu s dva kraka nepromjenjivog koraka te promjera 190,5 cm (75 in).

Gorivo koje koristi ovaj motor je AVGAS 100LL (engl. *AViation GASoline 100 Low Lead*). Neki zrakoplovni klipni motori smiju koristiti benzin namijenjen za cestovna vozila, ali to gorivo je rijetko dostupno na aerodromima tako da većina zrakoplova koristi AVGAS 100LL. Iako sam naziv sugerira nisku razinu olova (engl. *Low Lead*) u gorivu, to gorivo i dalje sadrži velike količine olova u usporedbi sa suvremenim bezolovnim gorivima namijenjenim za cestovna vozila. Tetraetil-olovo ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) koji se dodaje benzinu teška je, otrovna, bezbojna, uljasta tekućina gotovo netopljiva u vodi. U benzin se dodaje kao antidetonator.

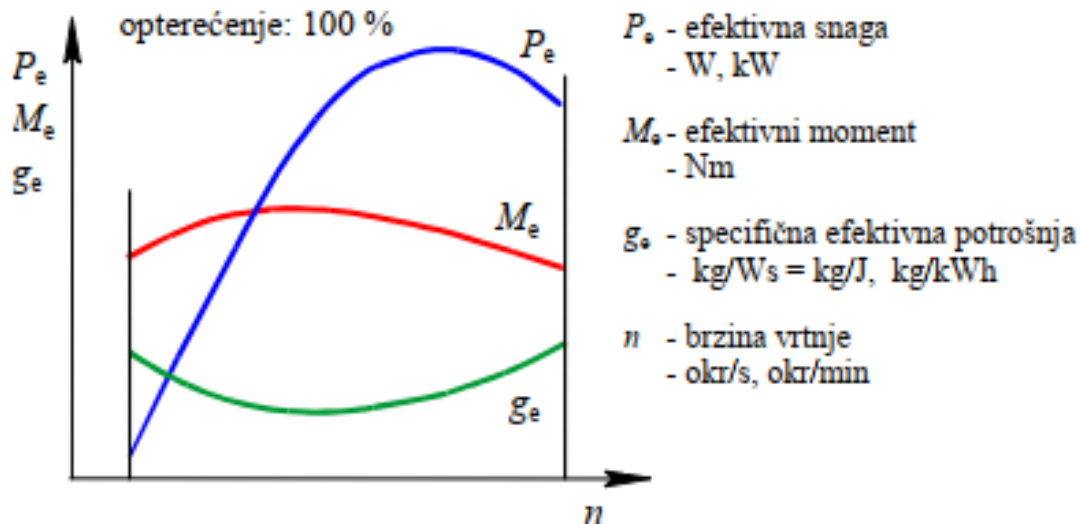
Naime kod većine zrakoplovnih klipnih motora svaki cilindar opremljen je sa dvije svjećeice zbog povećanja pouzdanosti (redundancija) te je zbog njihova rasporeda na samom rubu cilindra sklonost detonantnom izgaranju veća. Detonacija je pojava koju treba pod svaku cijenu izbjeći, jer ona može u kratkom vremenu uništiti motor. Do nje dolazi zbog toga što produkti izgaranja koji su nastali neposredno uz svjećicu ekspandiraju te time komprimiraju preostalu gorivu smjesu. Njoj raste tlak i temperatura te to ima za posljedicu pojavljivanje sekundarnih izvora upaljivanja na mjestima najviše temperature. Budući da je u tom slučaju temperatura u cilindru znatno viša od uobičajene, izlaganje motora takvom izgaranju do 15 minuta može prouzročiti znatne štete (progaranje klipa). Kod zrakoplovnih klipnih motora zbog navedenog se još uvijek koriste goriva koja u sebi sadrže olovo. Prema aktualnim normama, AVGAS 100LL gorivo smije sadržavati najviše 0,56 grama tetraetil-olova po litri goriva, a gustoća goriva je 0,720 kg/l (0,601 lb/gal).



Slika 2.3. Motor zrakoplova Cessna 172N Skyhawk Lycoming O-320-H2AD
(Izvor: iz vlastitog albuma)

2.2. Karakteristike motora

Glavne karakteristike motora koje se koriste pri analizi rada motora Lycoming O-320 H2AD su: efektivna snaga (P_e), efektivni moment (M_e), specifična efektivna potrošnja (g_e) i brzina vrtnje (n) koje se nazivaju brzinske karakteristike motora te faktor zraka (λ).

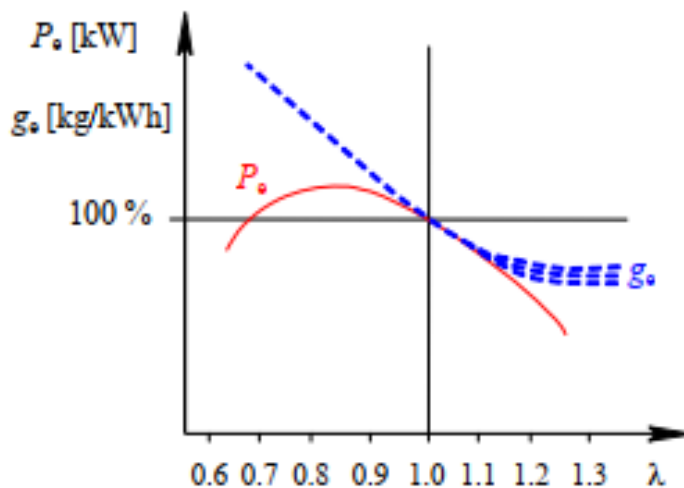


Slika 2.4. Brzinska karakteristika motora pri punom opterećenju [1]

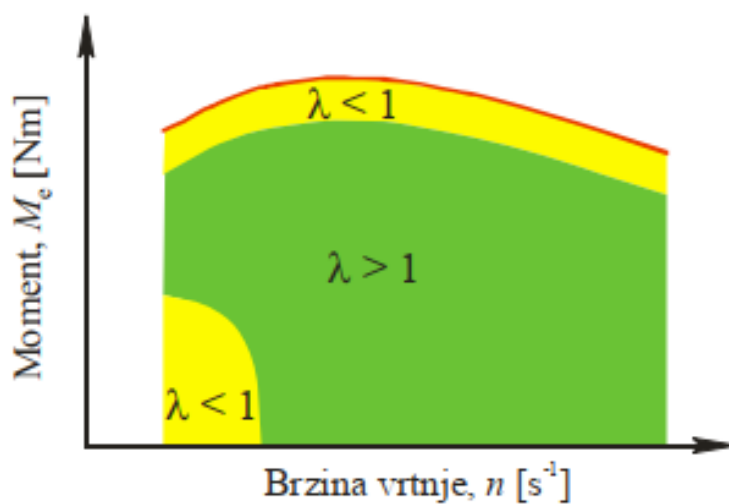
Pri analizi rada motora vrijednost faktora zraka biti će jednaka jedinici, a osim toga može biti veća ili manja od jedinice te takvu smjesu nazivamo siromašnom odnosno bogatom. Budući da je u ovoj analizi $\lambda=1$ znači da je smjesa stehiometrijska. To u teoriji znači da se svaka molekula goriva veže sa svakom molekulom kisika iz zraka, ali zbog brzine kojom se ti procesi odvijaju, obliku komore izgaranja te izmiješanosti dvaju medija uvjeti potpunog izgaranja su narušeni te je izgaranje nepotpuno, kao i kod svakog tipa motora.

Relacija za izračun faktora zraka predstavlja omjer stvarne i stehiometrijske količine zraka. Jedinica za količinu zraka u ovom slučaju je kgz/kgG .

$$\lambda = \frac{z}{z_0} \quad (2.2)$$

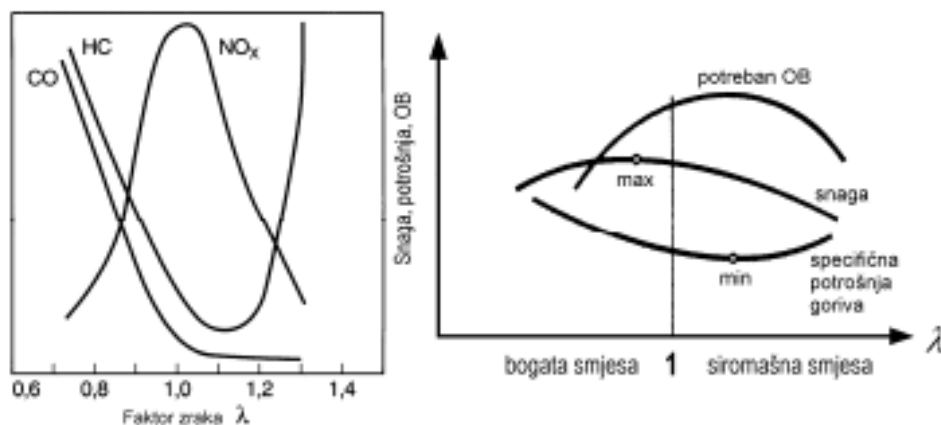


Slika 2.5. Utjecaj faktora zraka na efektivnu snagu P_e i specifičnu potrošnju goriva g_e [1]



Slika 2.6. Faktor zraka u različitim područjima rada Otto motora s rasplinjačem [1]

Za najveću snagu smjesa mora biti bogata tj. $\lambda \approx 0,85$, a za najmanju specifičnu potrošnju goriva ona mora biti siromašna kao što to prikazuje slika 2.5.



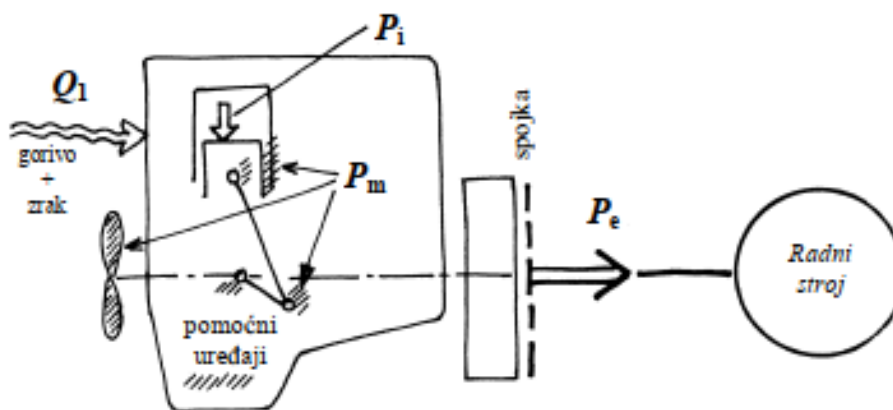
Slika 2.7. Utjecaj faktora zraka λ na emisiju štetnih ispušnih plinova, snagu i specifičnu potrošnju goriva, te na potreban oktanski broj [1]

Iz gore prikazanih dijagrama uočava se da je emisija štetnih dušikovih oksida najviša u okolini stehiometrijske smjese, emisija ugljikovodika raste sa osiromašivanjem ili obogaćivanjem smjese dok emisija ugljikovog monoksida raste sa obogaćivanjem smjese. Kao najbolje rješenje ovog problema u automobile se ugrađuje katalizator koji u sebi sadrže elemente (platina, paladij i rodij) koji omogućuju procese redukcije i oksidacije štetnih ispušnih plinova te na taj način reduciraju količinu štetnih ispušnih plinova.

Efektivna snaga je snaga koju motor predaje na spojci, a u ovom slučaju motor direktno prenosi snagu sa radilice na pogonsku elisu. Određujemo ju mjerenjem na kočnici u vatima (slika 2.9.). Ona predstavlja razliku indicirane snage (dobije se prilikom ekspanzije tj. na klip) i snage mehaničkih gubitaka (trenje, pogon pomoćnih uređaja).

$$P_e = P_i - P_m \quad (2.3)$$

$$P_{i,e,m} = z * V_H * p_{i,e,m} * \frac{2n}{T} \quad (2.4)$$



Slika 2.8. Shematski prikaz toka snage u motoru [1]



Slika 2.9. Motor priključen na mjernu kočnicu [13]

Efektivni moment je moment koji motor predaje na spojci, a u ovom slučaju motor direktno prenosi snagu sa radilice na pogonsku elisu.

Relacija koja povezuje snagu i moment je:

$$P = M * f = M * \frac{2\pi n}{60} \quad (2.5)$$

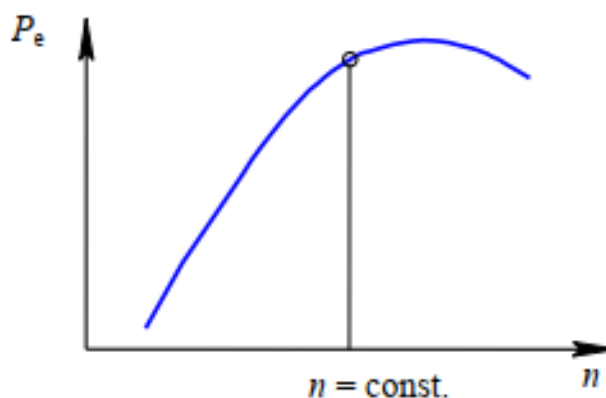
Frekvencija ciklusa (f) predstavlja broj radnih ciklusa u jedinici vremena u jednom cilindru. Specifična efektivna potrošnja goriva pokazuje koliko je goriva potrebno za proizvodnju jednog kWh. Ona predstavlja omjer potrošnje goriva i efektivne snage. Utvrđuje se mjerenjem na kočnici.

$$g_e = \frac{\dot{G}}{P_e} \quad (2.6)$$

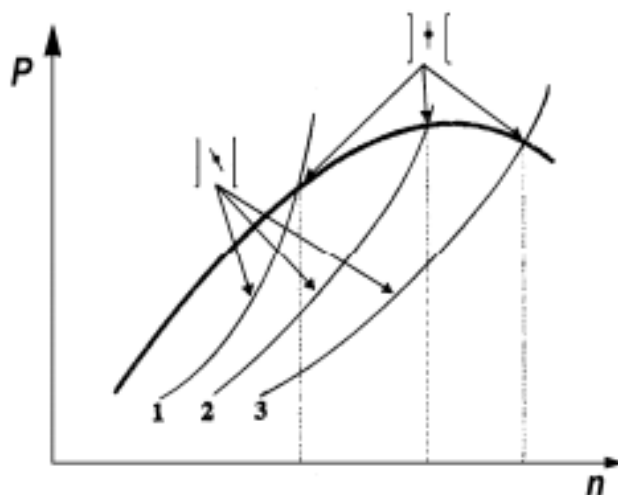
Potrošnja goriva ovisi o mnogim parametrima, a neki od njih su vrsta motora, goriva, nadmorska visina, kao i režimi letenja. Naravno ona je u korelaciji s emisijama motora.

Brzina vrtnje pokazuje koliko punih okretaja napravi radilica motora u jedinici vremena.

Radna točka pokazuje način rada motora. To je točka u dijagramu brzinskih karakteristika koja je određena brzinom vrtnje i snagom ili momentom motora.



Slika 2.10. Prikaz radne točke motora [1]



Slika 2.11. Pogon propelera promjenjive karakteristike (1-teški propeler, 2-propeler koji iskorištava najveću snagu motora, 3-lagani propeler)

Kod zrakoplova sa svakom vrstom motora (klipni, turbomlazni, nabojni) postoji problem promjene performansi motora zbog promjene stanja atmosfere sa visinom. Njih se iskazuje tzv. visinskim karakteristikama.

Izvod relacije za snagu s promjenom visine:

$$P_e = z * V_H * p_e * \frac{2n}{T} \quad (2.7)$$

$$p_e = \eta_e * \lambda_{pu} * \rho_{Z,0} * \frac{H_d}{1+\lambda Z_0} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{pu} = \frac{m}{m_{ref}} \quad (2.9)$$

$$\eta_e = \eta_i * \eta_m \quad (2.10)$$

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i} = \frac{p_i - p_m}{p_i} = 1 - \frac{p_m}{p_i} \quad (2.11)$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{\dot{Q}_1} \quad (2.12)$$

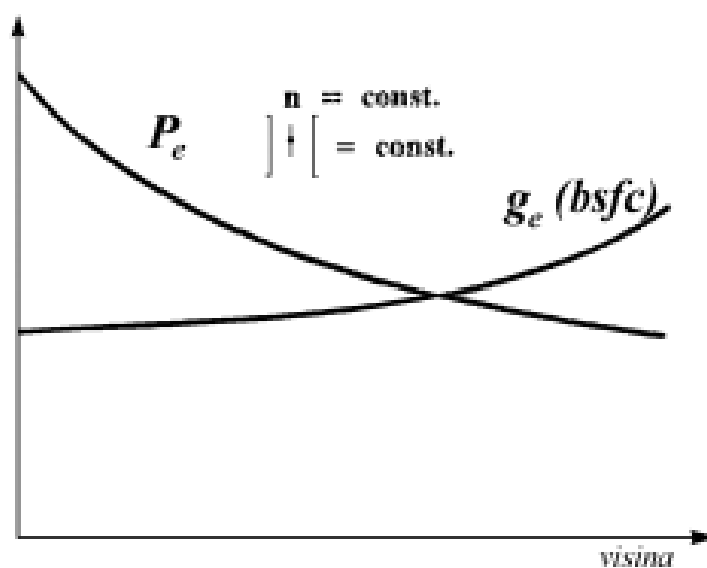
$$P_e = z * V_h * \eta_e * \lambda_{pu} * \rho_{Z,0} * \frac{H_d}{1+\lambda Z_0} * \frac{2n}{T} \quad (2.13)$$

U izrazu za snagu lako je uočljivo da su: z , V_H , H_d , Z_0 i T konstante. Uz nepromijenjenu brzinu vrtnje motora n i jednako bogatstvo smjese λ , pri povećanju visine leta h , na snagu utječe η_e i λ_{pu} . S povećanjem visine smanjuje se gustoća zraka te to ima za posljedicu smanjenje mase svježje usisane radne tvari u cilindar, što dovodi do proporcionalnog smanjenja stupnja punjenja i pada snage motora (slika 2.12.).

Također prema relaciji (2.11) uz istu brzinu vrtnje prosječni tlak mehaničkih gubitaka se ne mijenja, dok se prosječni indikatorski tlak smanjuje zbog pada snage motora (uslijed smanjenja stupnja punjenja), pa iz toga slijedi da se stupanj mehaničkog djelovanja smanjuje s visinom.

Uz pretpostavku da sastav smjese ostaje jednak, specifična efektivna potrošnja goriva se povećava s visinom zato što specifična indicirana potrošnja g_i (bsfci) približno ostaje jednaka, a smanjuje se stupanj mehaničkog djelovanja prema relaciji (2.14) (slika 2.12.).

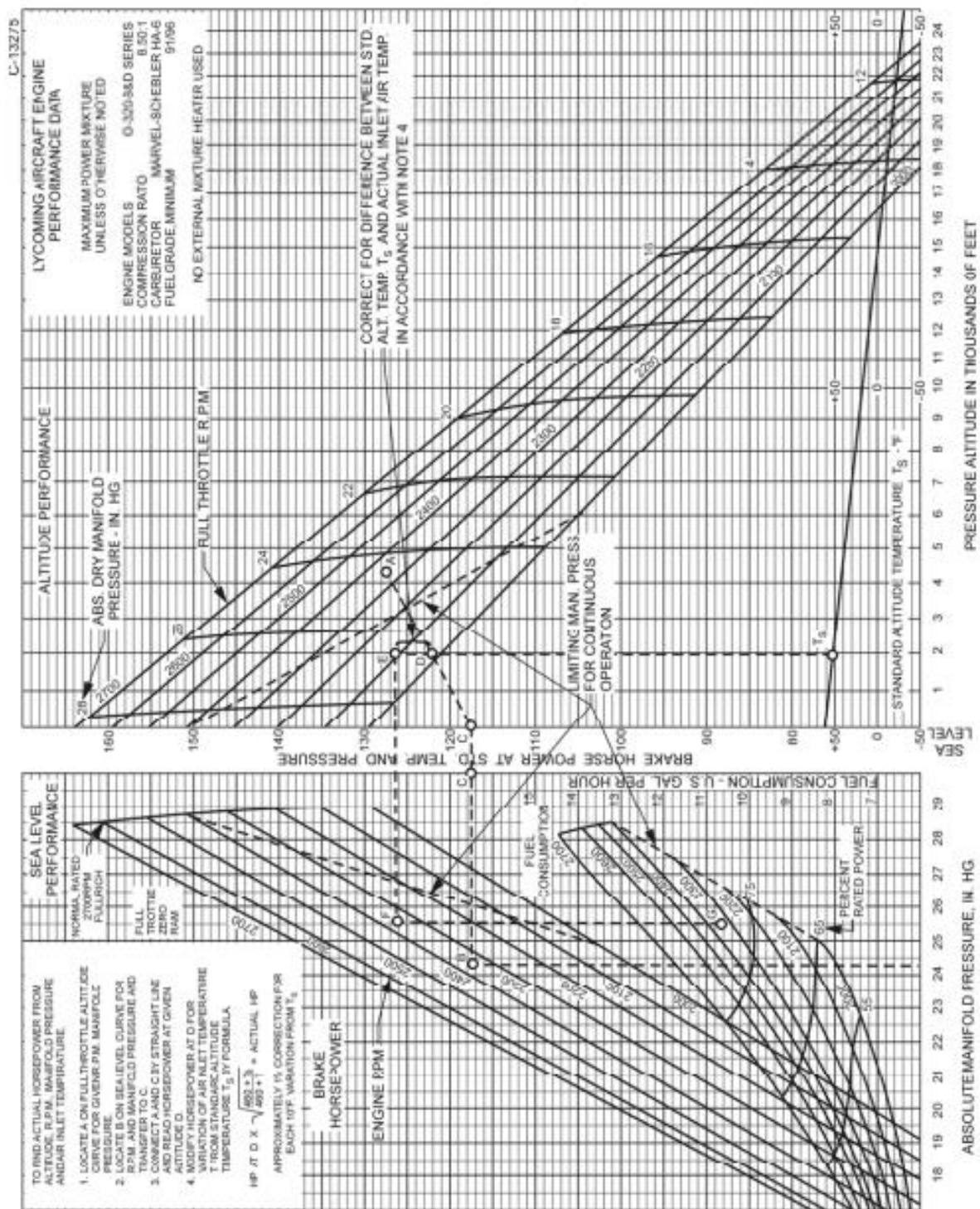
$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} \quad (2.14)$$



Slika 2.12. Promjena snage i specifične potrošnje goriva [1]

Približna relacija koja smanjuje broj mjerenja potrebnih za računanje snage motora na visini je:

$$P_h = P_0 * (1,11 * \frac{p}{p_0} * \sqrt{\frac{T_0}{T}} - 0,11) \quad (2.15)$$



Slika 2.13. Dijagram performansi motora na razini mora (dole) i na visini (gore) [11]

2.3. Uređaj za praćenje parametara motora EDM 900

EDM 900 je uređaj kojeg je razvila tvrtka J.P. Instruments [14]. Uz EDM 900 tvrtka u ponudi ima još 12 različitih uređaja koji su većinom podijeljeni u tzv. serije 700, 800 i 900 uz poneke iznimke. Danas je EDM 900 jedan od najnaprednijih uređaja za praćenje parametara rada klipnog motora na tržištu.

EDM 900 omogućio je uklanjanje starih analognih manometara te se te značajke zajedno sa mnoštvom ostalih parametara rada motora prikazuju na ekranu i dodatno bilježe u memoriji uređaja s frekvencijom do 3 Hz. Uređaj prati 24 parametra motora, a neki od njih su brzina vrtnje motora (RPM), apsolutni tlak u usisnoj grani (MAP), temperatura glave motora (CHT2), temperatura ulja (O-T), tlak ulja (O-P), temperatura ispušnih plinova (EGT2), postotna snaga motora (P (%)) itd.

Prednost ovog uređaja nad analognim je u tome što uređaj bilježi parametre motora, upozorava ako pojedini parametri prelaze dozvoljene granice te olakšava evidenciju o tome kad se koja komponenta motora treba podvrgnuti održavanju.



Slika 2.14. Izgled uređaja EDM 900 [14]

The screenshot displays a Microsoft Excel spreadsheet titled 'Ruta_11.08.klx - Excel (nelicencirani probvod)'. The spreadsheet contains a table of EDM measurement data. The columns are labeled as follows: A1, INDEXES, DATE, TIME, E1 (temp ispušnih plinova 1. cilindra), E2, E3, E4, CI (temp. glave 1. cilindra), C1, C2, C3, C4, OKT (vrenjska temp.), DIF, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, and LANG. The data rows start from row 1 and go down to row 46. The 'I' columns (I1-I16) contain numerical values, while the 'E' and 'C' columns contain text or numerical values. The 'DATE' column shows dates like '01.11.2020.' and '02.11.2020.'. The 'TIME' column shows times like '7:11:26' and '7:11:27'. The 'E1' column contains values like '696' and '714'. The 'E2' column contains values like '714' and '714'. The 'E3' column contains values like '714' and '714'. The 'E4' column contains values like '714' and '714'. The 'CI' column contains values like '714' and '714'. The 'C1' column contains values like '714' and '714'. The 'C2' column contains values like '714' and '714'. The 'C3' column contains values like '714' and '714'. The 'C4' column contains values like '714' and '714'. The 'OKT' column contains values like '714' and '714'. The 'DIF' column contains values like '714' and '714'. The 'L' column contains values like '714' and '714'. The 'M' column contains values like '714' and '714'. The 'N' column contains values like '714' and '714'. The 'O' column contains values like '714' and '714'. The 'P' column contains values like '714' and '714'. The 'Q' column contains values like '714' and '714'. The 'R' column contains values like '714' and '714'. The 'S' column contains values like '714' and '714'. The 'T' column contains values like '714' and '714'. The 'U' column contains values like '714' and '714'. The 'V' column contains values like '714' and '714'. The 'W' column contains values like '714' and '714'. The 'X' column contains values like '714' and '714'. The 'Y' column contains values like '714' and '714'. The 'Z' column contains values like '714' and '714'. The 'AA' column contains values like '714' and '714'. The 'AB' column contains values like '714' and '714'. The 'AC' column contains values like '714' and '714'. The 'AD' column contains values like '714' and '714'. The 'AE' column contains values like '714' and '714'. The 'AF' column contains values like '714' and '714'. The 'LANG' column contains values like '714' and '714'. The spreadsheet also features a ribbon with 'Ljepilo' and 'Lijepljenje' tabs, and a sidebar with 'Normalno', 'Dobro', 'Loše', and 'Izračun' buttons.

Slika 2.15. Dio prikaza zabilježenih mjerenja EDM uređaja u programu Microsoft Excel

2.4. Mjerni sustavi

Podaci dobiveni sa EDM uređaja zapisani su u standardnom ili engleskom sustavu mjera koji se koristi u SAD-u iz razloga što je sjedište tvrtke J.P. Instruments u Californiji.

U nastavku su navedene relacije koje su korištene pri pretvorbi jedinica iz standardnog sustava u SI sustav.

Veza između visine u metrima i u stopama je:

$$h(m) = \frac{1}{3,2808} * h(ft) \quad [15] \quad (2.16)$$

Veza između Celzijeve i Fahrenheitove temperaturne skale je:

$$\vartheta(^{\circ}C) = \frac{5}{9} * (\vartheta(^{\circ}F) - 32) \quad [16] \quad (2.17)$$

Veza između tlaka mjenom u barima i u visini stupca žive u inčima je:

$$p(\text{bar}) = \frac{1}{29,53} * p(\text{inHg}) \quad [17] \quad (2.18)$$

Veza između protoka goriva u litrama po sekundi i galona po satu je:

$$q_m \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 1282,051 * q_m \left(\frac{\text{gal}}{\text{hr}} \right) \quad [18] \quad (2.19)$$

Veza između mjerne jedinice za volumen goriva u litrama i galonima je:

$$V(l) = 0,2642 * V(\text{gal}) \quad [19] \quad (2.20)$$

Veza između snage mjerene u horsepower i konjskim snagama, i u kilovatima je:

$$P(\text{HP}) = 1,014 P(\text{KS}) = 0,7457 P(\text{kW}) \quad [1] \quad (2.21)$$

3. RAČUNALNI ALAT

Pri izradi računalnog alata za proračun emisija štetnih ispušnih plinova i potrošnje goriva iz motora Lycoming O-320-H2AD korišten je program za tablično računanje Microsoft Excel 2016.

Potrebni podaci sa EDM-a, koji su bilježeni sa frekvencijom 1 Hz i koji predstavljaju ulazne parametre pri analizi su:

- 1) VRIJEME (s) – od pokretanja motora do njegova zaustavljanja
- 2) VISINA (m) – mjerena od razine mora. Pretvorba iz standardnog sustava u SI sustav izvršena je pomoću relacije (2.7).
- 3) RPM (okr./min) – brzina vrtnje
- 4) HP (%) – udio iskorištene snage u odnosu na maksimalnu u postocima
- 5) FF (l/s) – za pretvorbu protoka goriva iz standardnog u SI sustav koristi se relacija (2.10)

	A	B	C	D	E	F	G	H
	VRIJEME [s]	VISINA [m]	VISINA [ft]	RPM [okr./min]	MAP [in hg]	HP [%]	FF(ptotok goriva) [GPH]	FF(ptotok goriva) [l/s]
1								
2	Engine - Tach Start = 250,3							
3	0	122	400	1059	16,6	20	3	0,003156
4	1	122	400	1071	16,5	20	3	0,003156
5	2	122	400	1098	16,1	20	3	0,003156
6	3	122	400	1095	15,8	20	2,8	0,0029456
7	4	122	400	1128	15,6	20	2,5	0,00263
8	5	122	400	1146	15,3	20	2,2	0,0023144
9	6	122	400	1162	15	20	2,1	0,0022092
10	7	122	400	1174	15	20	2,2	0,0023144
11	8	122	400	1192	14,9	20	2,4	0,0025248
12	9	122	400	1131	14,5	19	2,6	0,0027352
13	10	122	400	1138	14,3	19	2,6	0,0027352
14	11	122	400	1147	14,3	19	2,7	0,0028404
15	12	122	400	1145	14,3	19	2,7	0,0028404

Slika 3.1. Ulazni parametri od pokretanja motora do 12-te sekunde. Broj 250,3 predstavlja radne sate do trenutnog leta od kad je na zrakoplovu instaliran uređaj EDM 900. Let traje 3592 sekundi odnosno 0:59:52.

Nadmorska visina aerodroma Lučko je 123,46 m, ali se ona mijenja u rasponu ± 2 m.



Slika 3.2. Satelitski prikaz aerodroma Lučko putem digitalne mrežne karte Google Maps

Preliminarni proračun započinje određivanjem raspona pojedine faze leta u odnosu na postotak iskorištene snage u odnosu na maksimalnu. S obzirom da se let aviona može podijeliti u nekoliko faza to je primijenjeno i u radu. Uz četiri glavne faze koje su navedene u drugom poglavlju tu još postoje tri međufaze, a to su prazni hod, penjanje i spuštanje.

Motor prilikom pokretanja radi u praznom hodu iz razloga da bi se provele potrebne provjere te se zagrijavao sam motor i rasplinjač odnosno sustav za pripremu smjese iz razloga da materijal ne doživljava prevelike temperaturne šokove te da rasplinjač može usisavati struju toplog zraka kako ne bi došlo do nakupljanja kristalića leda unutar rasplinjača budući da je zrak vlažan, a benzin također ishlapljuje u struju zraka te postoji opasnost od začepjenja sapnice te zaustavljanja motora što dovodi do katastrofalnih posljedica. Zagrijavanje rasplinjača se izvodi na principu izmjene topline između ispušnih cijevi koje preko svojih stjenki predaju toplinu hladnoj struji zraka koja ulazi u rasplinjač.

Penjanje je faza pri kojoj se i dalje zrakoplov uspinje, ali pri tome više ne koristi punu snagu motora.

Spuštanje je faza pri kojoj se zrakoplov spušta, ali snaga motora je još uvijek nešto viša od snage motora potrebne za slijetanje, iz razloga što postoji mogućnost pojave zapreke slijetanju te da bi zrakoplov mogao lakše ubrzati.

3.1. Raspon brzine vrtnje po fazama

Za početak potrebno je postaviti gornje granice brzine vrtnje motora za pojedinu fazu (tablica 3.). Na temelju gornjih granica brzine vrtnje za svaku fazu određuje se raspon brzina vrtnje u toj fazi. Prilikom određivanja raspona brzina vrtnje faze polijetanja i penjanja su zajedno uklopljene iz razloga što pilot u vrlo malom postotku (cca 5 %) oduzima snagu motora pri penjanju u odnosu na polijetanje. Isto to vrijedi i za fazu krstarenja i spuštanja.

U tablici 3. faze leta prikazane su s obzirom na redoslijed odvijanja faza od pokretanja motora do njegovog zaustavljanja. Također za svaku fazu prikazano je vrijeme koje motor provodi u pojedinom režimu. Vrijeme rada u pojedinom režimu računa se pomoću funkcije *frequency* (tablica 2.).

Tablica 2. U polju iznad tablice definirana je funkcija *frequency* koja računa vrijeme rada u pojedinom rasponu brzine vrtnje tako što zbraja broj polja u kojima je brzina vrtnje unutar raspona

=FREQUENCY(D3:D3594;I3:I7)			
C	D	I	K
VISINA [ft]	RPM [okr./min]	Gornja granica brzine vrtnje za pojedinu fazu	Vrijeme rada u pojedinom području brzine vrtnje [s]
400	1113	1304	I3:I7)
400	1120	1656	176
400	1123	2700	1035
400	1128	2340	1683
400	1146	1917	156
400	1162		0
400	1174		3592
400	1192		
400	1131		
400	1138		
400	1147		
400	1145		
400	1158		
400	1140		
400	1086		
400	1097		
400	1093		
400	1100		
400	1103		
400	1105		
400	1114		

Razlog zbog kojeg je raspon brzine vrtnje prilikom polijetanja i penjanja razvučen je zato što pilot u tim dvjema fazama koristi 80-90 % snage motora, a ne 100 % kao što je u teoriji.

Maksimalna postignuta brzina vrtnje motora tijekom testnog leta je $2504 \frac{okr}{min}$.

Tablica 3. Raspon brzine vrtnje po fazama te vremenski udio pojedine faze u ukupnom letu

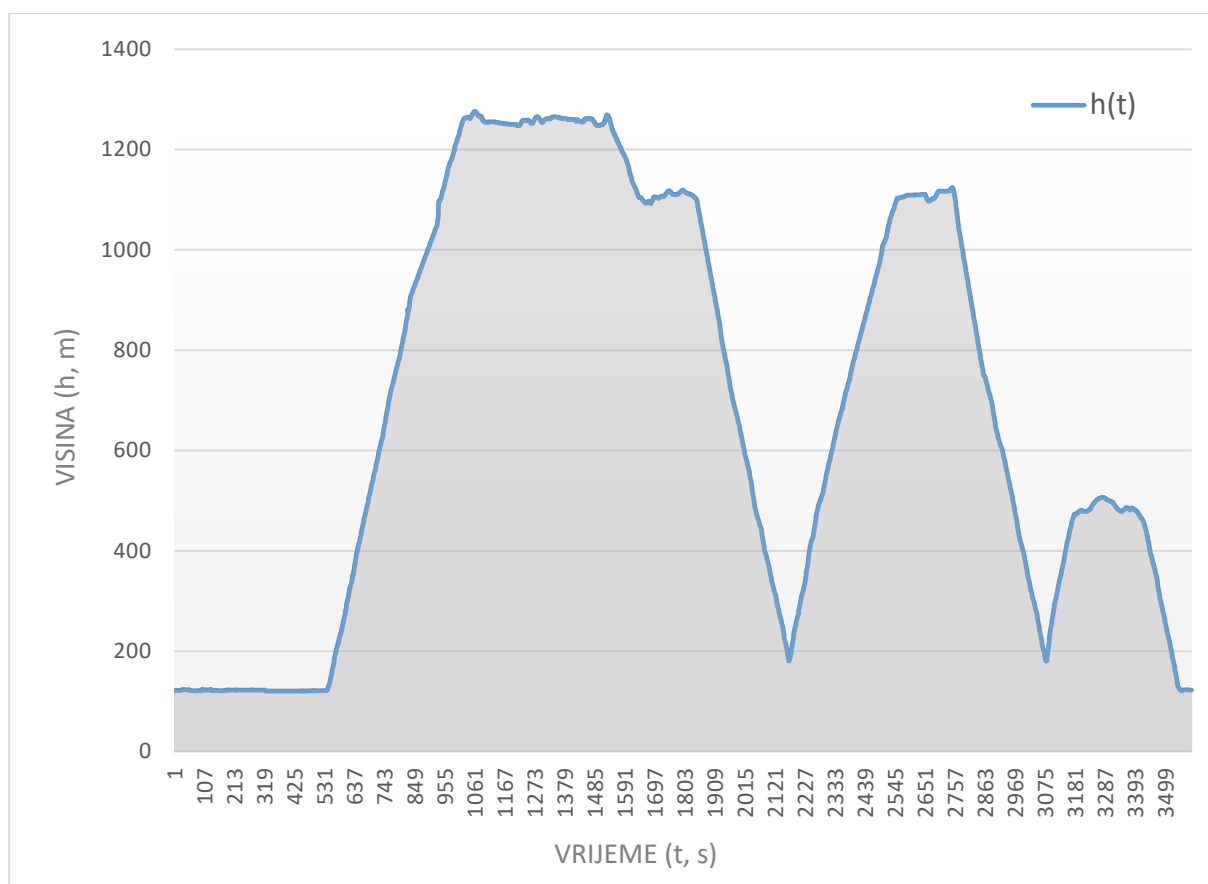
Gornja granica brzine vrtnje za pojedinu fazu	Raspon brzine vrtnje po fazama	Vrijeme rada u pojedinom području brzine vrtnje [s]	Udio
1304	0-1304 (Prazan hod)	542	0,15
1752	1305-1752 (Taksiranje)	188	0,05
2700	2341-2700 (Polijetanje, penjanje)	1035	0,29
2340	1918-2340 (Krstarenje, spuštanje)	1683	0,47
1917	1753-1917 (Slijetanje)	144	0,04
	>2700	0	0,00
	Ukupno	3592	1,00

3.2. *h-t* dijagram

Za provjeru pojedine faze leta napravljen je i dijagramski prikaz promjene visine u vremenu. Iz dijagrama se može vidjeti o kojem tipu leta se radi.

Tipovi leta mogu biti: ruta, zona ili školski krug.

Let u školskim krugovima i let na ruti su različiti u više segmenata, a oboje su važni za kvalitetno školovanje budućih pilota. U školskom krugu izvode se vježbe polijetanja i slijetanja kao i zaokreti pri različitim uvjetima. Između školskih krugova i rute je let u zoni, koji se sastoji od raznih elemenata, nekad sličnih letu u školskim krugovima, a nekad sličnih letu na ruti. Ruta se sastoji od određenog dužeg puta do nekog cilja i ponovnog vraćanja u matičnu zračnu luku, a pri tome se let odvija jednosmjerno (nema ponavljanja dijelova puta).



Slika 3.3. $h-t$ dijagram rute koju je odvezio pilot učenik 11.08.2020. Dva netipična spuštanja su provedena iz razloga da se pilot pripremi na različite uvjete i potrebe tijekom leta.

Prilikom izrade $h-t$ dijagrama pojedine trenutke očitavanja sa EDM uređaj trebalo je ispraviti budući da je visinomjer povremeno zbog šuma koji nastaje tijekom mjerenja ponekad pokazivao netočne vrijednosti za koje je očigledno da ne odgovaraju stvarnoj visini. Vrijednosti su ispravljene na način da je provedena linearna interpolacija između posljednje točne vrijednosti prije resetiranja visinomjera i vrijednosti nakon ponovnog pokretanja visinomjera.

Relacija za linearnu interpolaciju između dvije točke je:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) \quad (3.1)$$

3.3. Raspon snage po fazama

U ovom koraku određuju se snage motora u svakom trenutku te raspon snage ovisno o rasponu brzine vrtnje motora za pojedine faze iz tablice 3.

Relacija kojom je izvršena pretvorba postotne snage u snagu motora (HP) za svaki trenutak je:

$$P = P_{max} * P(\%) \quad (3.2)$$

Maksimalnu snagu motora definirao je proizvođač i ona iznosi 160 HP.

Tablica 4. U polju iznad tablice definirana je funkcija koja računa snagu motora, a argument funkcije je postotna snaga motora u svakom trenutku leta

✓ fx =160*(F3:F3731)/100		
F	N	O
HP [%]	Snaga [HP]	Gornja granica raspona snage [HP]
20	F3731)/100	32
20	32	49,6
20	32	160
20	32	109
20	32	60,8
20	32	
20	32	
20	32	
20	32	
19	30,4	
19	30,4	
19	30,4	
19	30,4	
19	30,4	
18	28,8	
17	27,2	
17	27,2	
17	27,2	
17	27,2	
17	27,2	
17	27,2	

U tablici 5. prikazani su rasponi snaga i vremena rada po fazama koja se moraju podudarati sa vremenima u tablici 3. budući da je postotna snaga u korelaciji sa brzinom vrtnje motora. Time je postignuto podudaranje snage pojedine faze sa brzinom vrtnje motora u pojedinoj fazi.

Tablica 5. Raspon snage po fazama te vrijeme rada u pojedinoj fazi

Gornja granica raspona snage [HP]	Raspon snage	Vrijeme rada u pojedinom rasponu snage [s]
32	0-32 (Prazan hod)	543
49,6	32,1-49,6 (Taksiranje)	188
160	109,1-160 (Polijetanje, penjanje)	1034
109	60,9-109 (Krstarenje, spuštanje)	1683
60,8	49,7-60,8 (Slijetanje)	144
	>160	0
	Ukupno	3592

3.4. Raspon momenta po fazama

Nakon što se odredi snaga motora lako se dobije i vrijednost momenta u svakom trenutku. Prema istom postupku određuju se i rasponi momenta.

Relacija koja povezuje moment i snagu je:

$$P = M * \omega = M * \frac{2n\pi}{60} \Rightarrow M = \frac{P*60}{2n\pi} \quad (3.3)$$

Time je određen moment motora u svakoj sekundi. Ovdje treba uzeti u obzir da EDM uređaj ne može registrirati promjenu snage za svaku brzinu vrtnje unutar tolerancije $\pm 10 \text{ okr/min}$ (npr. 1800, 1801, 1802, 1798). Iz tog razloga se za gornju granicu momenta uzima okvirna vrijednost zaokružena na prvu decimalu.

U tablici 6. prikazan je kod koji predstavlja gornju relaciju u obliku funkcije u Excelu.

Prilikom izračuna momenta treba obratiti pozornost na mjernu jedinicu snage (HP) te izvršiti njenu pretvorbu u vate pomoću relacije (2.21).

Tablica 6. U polju iznad tablice definirana je funkcija koja računa moment motora, a argumenti funkcije su snaga i brzina vrtnje motora u svakom trenutku leta

$$=(N3:N3731)*745,7*60/(2*PI()*(D3:D3731))$$

C	D	N	R
VISINA [ft]	RPM [okr./min]	Snaga [HP]	Moment [Nm]
400	1059	32	=(N3:N3731)*
400	1071	32	212,8
400	1098	32	207,5
400	1095	32	208,1
400	1128	32	202,0
400	1146	32	198,8
400	1162	32	196,1
400	1174	32	194,1
400	1192	32	191,2
400	1131	30,4	191,4
400	1138	30,4	190,2
400	1147	30,4	188,7
400	1145	30,4	189,1
400	1158	30,4	186,9
400	1140	28,8	179,9
400	1086	27,2	178,4
400	1097	27,2	176,6
400	1093	27,2	177,2
400	1100	27,2	176,1
400	1103	27,2	175,6
400	1105	27,2	175,3

U tablici 7. prikazani su rasponi momenata i vremena rada po fazama koja se moraju podudarati sa vremenima u tablici 5. budući da su te dvije tablice u korelaciji zbog gore navedene relacije. Time je postignuto podudaranje snage pojedine faze sa brzinom vrtnje u pojedinoj fazi.

Tablica 7. Raspon momenata po fazama te vrijeme rada u pojedinoj fazi

Gornja granica raspona momenta [Nm]	Raspon momenta	Vrijeme rada u pojedinom rasponu momenta [s]
189,2	0-189,2 (Prazan hod)	544
214,3	189,3-214,3 (Taksiranje)	188
422,0	335,1-422 (Polijetanje, penjanje)	1033
335,0	228,1-335 (Krstarenje, spuštanje)	1683
228,0	214,4-228 (Slijetanje)	144
	>422	0
	Ukupno	3592

3.5. M - n dijagram

Sada se može dijagramski prikazati ovisnost momenta M o brzini vrtnje motora n u M - n dijagramu (slika 3.4.). Za prikaz je odabran „raspršeni“ dijagram pri čemu narančaste točke u dijagramu predstavljaju vrijednost momenta za svaku brzinu vrtnje motora. Pomoću funkcije trenda u dijagramu može se izračunati i prikazati funkcija $M(n)$ kao polinom trećeg reda, a prikazana je krivuljom ljubičaste boje.

Polinom je:

$$M = 2 * 10^{-7}n^3 - 0,001n^2 + 1,5837n - 662,11 \quad (3.4)$$

te se pomoću njega može za svaku brzinu vrtnje izračunati moment.

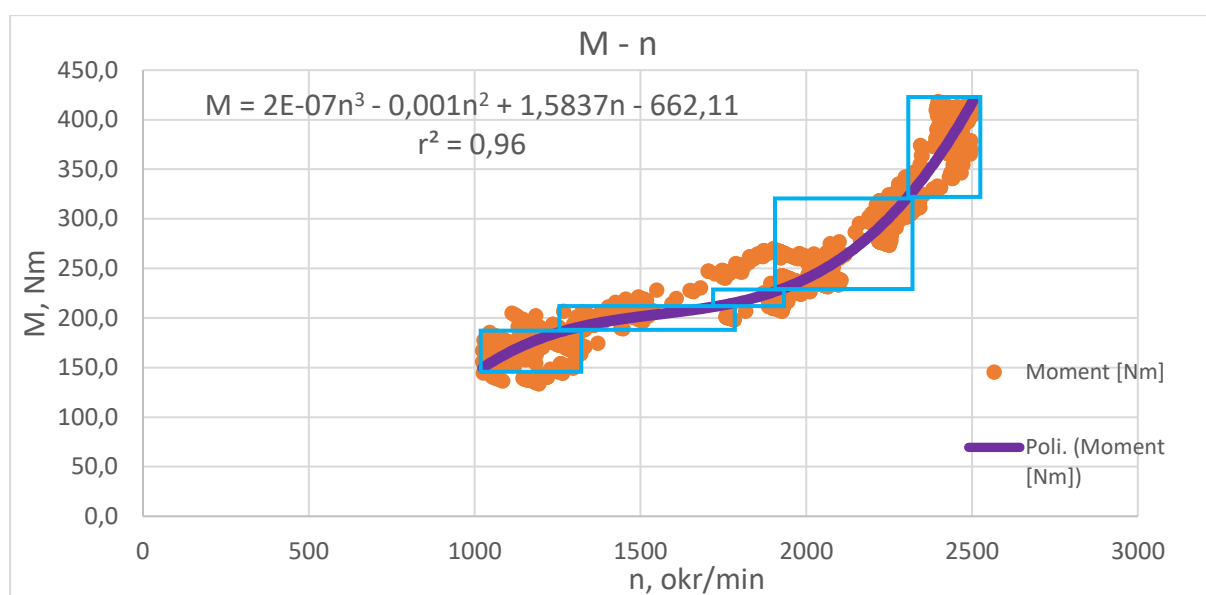
Srednje kvadratno odstupanje (r^2) iznosi 0,96 što znači da 96 % vrijednosti u potpunosti odgovara aproksimacijskom polinomu trećeg stupnja.

Srednje kvadratno odstupanje aritmetičke sredine računa se prema relaciji:

$$R^2 = \frac{r^2}{\sqrt{n}} = \frac{0,96}{\sqrt{3592}} = 0,016 \quad (3.5)$$

u kojoj n predstavlja ukupni broj mjerenja, a za ovaj slučaj mjerenja ima onoliko koliko je sekundi motor proveo u radu.

Srednje kvadratno odstupanje aritmetičke sredine je izrazito malo što potvrđuje visoku točnost polinomijalne aproksimacije trećeg stupnja.



Slika 3.4. M-n dijagram

Sad kad je prikazan dijagram mogu se odrediti i rasponi koji predstavljaju pojedinu fazu leta. Pet raspona su označena unutar svakog plavog pravokutnika u ovisnosti o rasponu momenta iz tablice 7. To znači da se prateći isključivo položaj radne točke u *M-n* dijagramu može znati u kojoj fazi leta je zrakoplov, a upravo su prema tim fazama empirijski dobiveni emisijski faktori.

3.6. Emisijski faktori i ukupne emisije ispušnih plinova te ukupna potrošnja goriva

Emisijski faktori preuzeti su od *Federal Office of Civil Aviation (FOCA)* sa sjedištem u Švicarskoj, a prikazani su na slici 3.5. Pomoću njih se može u svakom trenutku leta odrediti emisija ispušnih plinova. Vrijednosti u svakoj sekundi se sumiraju i time se dobije ukupna emisija pojedinog ispušnog plina za zadani let. Naravno, postoje razlike između režima rada motora za koje su izmjereni emisijski faktori u odnosu na režime rada motora testnog leta. Iz tog razloga emisijski faktori se određuju linearnom interpolacijom u ovisnosti o srednjem masenom protoku goriva. Pretvorba protoka goriva iz standardnog sustava u SI sustav određena je relacijom (2.19). Maksimalni srednji protok goriva pri fazi polijetanja i uspinjanja za testni let iznosi 0,0083 kg/s (tablica 8.) iz razloga što pilot leti s bogatom smjesom koja mu osigurava najveću snagu za svaki položaj zaklopke rasplinjača.



BAZL ENGINE EXHAUST EMISSIONS MEASUREMENT

PISTON ENGINES

ENGINE IDENT. Lycoming O-320-D3G
s/n: L-10988-39A

UNIQUE ID NUMBER BAZLP004

ENGINE TYPE Piston 4Zyl 4Stroke

PROPELLER TYPE Hoffmann HO4/23HM-170
s/n: 77901

CARBURETTOR MA-4SPA
s/n: CK48391

INJECTION NOZZLE -

RATED POWER (P₀₀) (HP) 160

DATA STATUS

x EMISSION INVENTORY
- PRE-REGULATION
- CERTIFICATION
- REVISED

TEST ENGINE STATUS

- NEWLY MANUFACTURED ENG.
x USED ENGINE
- DEDICATED TO PRODUCTION
- OTHER (SEE REMARKS)

MEASUREMENT STATUS

x GROUND BASED FIXED PITCH PROP
- GROUND BASED VARIABLE PITCH PROP

CURRENT ENGINE STATUS

x IN PRODUCTION
- OUT OF PRODUCTION
- OUT OF SERVICE

EMISSIONS STATUS

x DATA CORRECTED TO REFERENCE TEMPERATURE
- DATA CORRECTED TO REFERENCE (ANNEX 16 VOLUME II)
V3 CALCULATION METHODOLOGY VERSION NUMBER

MEASURED DATA

MODE	POWER SETTING (%M.F.F)	TIME (minutes)	FUEL FLOW (kg/s)	EI HC (g/kg)	EI CO (g/kg)	EI NOx (g/kg)	PM (...)
TAKE-OFF	100	0.3	0.0079	8.81	922.9	4.6	-
CLIMB OUT	85	2.5	0.0066	8.75	890.3	5.5	-
CRUISE	65	-	0.0055	11	795.1	8.6	-
APPROACH	45	3	0.0036	23.2	1159	1.6	-
TAXI	14	12	0.0022	18.6	654.9	5.4	-
CRUISE LEAN	65/54	-	0.0046	6.31	203.3	51	-
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)			3.3642	54.4	2801	15.7	-
NUMBER OF TESTED ENGINES			1	1	1	1	-
NUMBER OF TESTS			3	3	3	3	-

ATMOSPHERIC CONDITIONS

BAROMETER (hPa) 945
TEMPERATURE (K) 302
RELATIVE HUMIDITY 30

FUEL

SPEC AVGAS 100LL
HC C7H13

MANUFACTURER: Textron Lycoming
TEST ORGANIZATION: FOCA
TEST LOCATION: EDMO 1367 ft
TEST DATES: 22.07.2004

REFERENCE:

emmeasurement30.ground.V3.SEKEI.22072004

REMARKS:

Slika 3.5. Emisijski faktori motora Lycoming O-320 [20]

Srednji maseni protok goriva za pojedinu fazu određen je uporabom funkcije *average* tako da su unutar funkcije označena polja u kojima se zrakoplov nalazi u fazi za koju se traži vrijednost srednjeg masenog protoka te se pomnoži sa gustoćom goriva kako bi se volumni protok pretvorio u srednji maseni protok goriva.

Tablica 8. U polju iznad tablice definirana je funkcija *average*, te su prikazani srednji maseni protoci goriva po fazama

fx = =AVERAGE(H3:H258;H265:H415;H426:H474)*0,72			
G	H	AP	AU
FF(protok goriva) [GPH]	FF(protok goriva) [l/s]	REŽIMI LETA	SREDNJI MASENI PROTOK GORIVA [kg/s]
3	0,003156	Prazni hod	0,0019
3	0,003156	Taxiranje	0,0033
2,8	0,0029456	Polijetanje, uspinjanje	0,0083
2,5	0,00263	Krstarenje, spuštanje	0,0031
2,2	0,0023144	Slijetanje	0,0016
2,1	0,0022092	Ukupno	

Kad su određeni srednji maseni protoci goriva po fazama mogu se pomoću linearne interpolacije izračunati emisijski faktori tako da y , y_1 i y_2 varijable predstavljaju srednje masene protoke goriva iz tablice 8. (varijabla y) i sa slike 3.5. (varijable y_1 , y_2). Varijabla x predstavlja traženi emisijski faktor zadanog spoja u određenoj fazi, a varijable x_1 i x_2 su gornje i donje vrijednosti granica emisijskih faktora interpolacije sa slike 3.5. Takav postupak linearne interpolacije primijenjen je za izračun emisijskog faktora za svaki od sudionika u ispušnim plinovima i za svaku fazu leta.

Za vrijednosti srednjeg masenog protoka goriva koje su više od 0,0079 kg_G/s koriste se vrijednosti emisijskih faktora kao u slučaju za srednji maseni protok od 0,0079 kg_G/s, a takav pristup je korišten pri izračunu emisijskih faktora za fazu polijetanje, penjanja (tablica 9.).

Za vrijednosti srednjeg masenog protoka goriva koje su niže od 0,0022 kg_G/s koriste se vrijednosti emisijskih faktora kao u slučaju za srednji maseni protok od 0,0022 kg_G/s, a takav pristup je korišten pri izračunu emisijskih faktora za fazu praznog hoda i slijetanja (tablica 9.).

Emisijski faktor ugljikovog dioksida izračunat je na sljedeći način:

$$\rho_g = 0,72 \frac{kg}{l} \quad (3.6)$$

$$m_g = \rho_g * V = 0,72 kg \quad (3.7)$$

Benzini u pravilu sadrže približno 87 % ugljika u ugljikovodikovim spojevima, što znači da je masa ugljika u gorivu:

$$m_c = 0,87 * m_g = 0,626 kg_C \quad (3.8)$$

Da bi ugljik u potpunosti izgorio potrebno mu je dovesti odgovarajuću minimalnu masu kisika. Prema kemijskoj reakciji (1.2) za potpunu oksidaciju 1 kmol ugljika potrebno mu je dovesti 1 kmol kisika. Kemijska reakcija (1.2) napisana u masenom obliku glasi:



Kemijsku reakciju (3.9) svodimo na stvarnu masu ugljika u gorivu:



Iz (3.10) zaključujemo da je emisijski faktor u ugljikovog dioksida $2,295 kg_{CO_2}/kg_G$ (tablica 9.).

Tablica 9. U polju iznad tablice je prikazan kod kojim se računa emisijski faktor NO_x za drugu fazu tj. taksiranje. Također prikazane su i ostale vrijednosti - konstante kao na slici 3.5. opisane gore navedenim postupkom, te emisijski faktor CO_2

H3 : X ✓ f_x = (F3-0,0022)*(1,6-5,4)/(0,0036-0,0022)+5,4										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Faza leta	Faza leta - opis	n_{max}	P_{max}	M_{max}	SREDNJI PROTOK GORIVA [kg/s]	EF CO_2 , kg/kg	EF NO_x , g/kg	EF C_nH_m , g/kg	EF CO, g/kg
2	1	Prazan hod	1304	32,0	189,2	0,0019	2,295	5,400	14,600	654,900
3	2	Taksiranje	1752	49,6	214,3	0,0033	2,295	2,325	22,322	1062,766
4	3	Slijetanje	1917	60,8	228,0	0,0083	2,295	5,400	18,600	654,900
5	4	Krstarenje,spuštanje	2340	109,0	335,0	0,0031	2,295	3,077	21,412	963,099
6	5	Polijetanje, penjanje	2700	160,0	422,0	0,0016	2,295	4,600	8,810	922,900

Tablica 10. Dio koda sa if and naredbom koji određuje fazu leta (cijeli kod nalazi se ispod slike)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	VRIJEME [s]	VISINA [m]	VISINA [ft]	RPM [okr./min]	MAP [in hg]	HP [%]	FF (protok goriva) [GPH]	FF (protok goriva) [l/s]	maseni protok goriva, kg/s	Gorivo kumulativno	Snaga [HP]	Moment [Nm]	Faza leta
2	1	122	400	1113	16,6	20	3	0,003156	0,002272	0,002272	32,0	204,7	1
3	2	122	400	1117	16,1	20	3	0,003156	0,002272	0,004545	32,0	204,0	1
4	3	122	400	1120	16,1	20	3	0,003156	0,002272	0,006817	32,0	203,5	1
5	4	122	400	1123	15,8	20	2,8	0,002946	0,002121	0,008938	32,0	202,9	1
6	5	122	400	1128	15,6	20	2,5	0,002630	0,001894	0,010831	32,0	202,0	1
7	6	122	400	1146	15,3	20	2,2	0,002314	0,001666	0,012498	32,0	198,8	1
8	7	122	400	1162	15	20	2,1	0,002209	0,001591	0,014088	32,0	196,1	1
9	8	122	400	1174	15	20	2,2	0,002314	0,001666	0,015755	32,0	194,1	1
10	9	122	400	1192	14,9	20	2,4	0,002525	0,001818	0,017573	32,0	191,2	1
11	10	122	400	1131	14,5	19	2,6	0,002735	0,001969	0,019542	30,4	191,4	1
12	11	122	400	1138	14,3	19	2,6	0,002735	0,001969	0,021511	30,4	190,2	1
13	12	122	400	1147	14,3	19	2,7	0,002840	0,002045	0,023556	30,4	188,7	1
14	13	122	400	1145	14,3	19	2,7	0,002840	0,002045	0,025601	30,4	189,1	1
15	14	122	400	1158	14,2	19	2,8	0,002946	0,002121	0,027722	30,4	186,9	1
16	15	122	400	1140	14	18	2,9	0,003051	0,002197	0,029919	28,8	179,9	1
17	16	122	400	1086	13,7	17	2,9	0,003051	0,002197	0,032115	27,2	178,4	1
18	17	122	400	1097	13,6	17	2,9	0,003051	0,002197	0,034312	27,2	176,6	1
19	18	122	400	1093	13,5	17	2,9	0,003051	0,002197	0,036509	27,2	177,2	1
20	19	122	400	1100	13,5	17	2,9	0,003051	0,002197	0,038705	27,2	176,1	1
21	20	122	400	1103	13,4	17	2,9	0,003051	0,002197	0,040902	27,2	175,6	1
22	21	122	400	1105	13,3	17	2,8	0,002946	0,002121	0,043023	27,2	175,3	1
23	22	122	400	1114	13,3	17	2,8	0,002946	0,002121	0,045143	27,2	173,9	1
24	23	122	400	1107	13,3	17	2,8	0,002946	0,002121	0,047264	27,2	175,0	1
25	24	122	400	1106	13,2	17	2,8	0,002946	0,002121	0,049385	27,2	175,1	1
26	25	122	400	1111	13,2	17	2,8	0,002946	0,002121	0,051506	27,2	174,3	1
27	26	122	400	1115	13,2	17	2,8	0,002946	0,002121	0,053627	27,2	173,7	1
28	27	123	403	1114	13,2	17	2,7	0,002840	0,002045	0,055672	27,2	173,9	1
29	28	123	405	1124	13,2	17	2,8	0,002946	0,002121	0,057793	27,2	172,3	1
30	29	123	405	1122	13,2	17	2,7	0,002840	0,002045	0,059838	27,2	172,6	1
31	30	123	405	1128	13,2	17	2,8	0,002946	0,002121	0,061959	27,2	171,7	1
32	31	123	405	1128	13,1	17	2,8	0,002946	0,002121	0,064079	27,2	171,7	1
33	32	123	405	1136	13,1	17	2,9	0,003051	0,002197	0,066276	27,2	170,5	1
34	33	123	405	1136	13,1	17	2,9	0,003051	0,002197	0,068473	27,2	170,5	1
35	34	123	405	1123	13,4	17	2,8	0,002946	0,002121	0,070593	27,2	172,5	1
36	35	123	405	1130	13,4	17	2,8	0,002946	0,002121	0,072714	27,2	171,4	1
37	36	123	405	1140	13,1	17	2,7	0,002840	0,002045	0,074759	27,2	169,9	1
38	37	123	405	1133	13,1	17	2,7	0,002840	0,002045	0,076804	27,2	171,0	1
39	38	123	405	1145	13	17	2,6	0,002735	0,001969	0,078774	27,2	169,2	1
40	39	123	404	1141	13	17	2,6	0,002735	0,001969	0,080743	27,2	169,8	1
41	40	123	404	1137	13	17	2,6	0,002735	0,001969	0,082712	27,2	170,4	1
42	41	123	404	1147	13	17	2,6	0,002735	0,001969	0,084682	27,2	168,9	1
43	42	123	404	1145	13	17	2,6	0,002735	0,001969	0,086651	27,2	169,2	1
44	43	123	404	1138	13,3	17	2,6	0,002735	0,001969	0,088620	27,2	170,2	1

Kod za određivanje faze leta:

=IF(AND(D2>=0;D2<=Faze!\$C\$2);Faze!\$A\$2;

IF(AND(D2>Faze!\$C\$2;D2<=Faze!\$C\$3);Faze!\$A\$3;

IF(AND(D2>=Faze!\$C\$3;D2<=Faze!\$C\$4);Faze!\$A\$4;

IF(AND(D2>=Faze!\$C\$4;D2<=Faze!\$C\$5);Faze!\$A\$5;

IF(AND(D2>=Faze!\$C\$5;D2<=Faze!\$C\$6);Faze!\$A\$6;"GREŠKA!"))))

Kod je izveden pomoći *if and* naredbe koja radi na način da u prvoj petlji u stupcu „D“ (RPM) traži vrijednosti veće ili jednake 0, a manje od maksimalne vrijednosti za prvu fazu tj. prazni hod u kojoj je gornja vrijednost raspona 1304 što se vidi iz tablice 3. Ako je vrijednost unutar tog raspona znači da se radi o prvoj fazi te kod u ćeliji ispisuje 1. U slučaju da je vrijednost veća od 1304 provjerava se iduća petlja koja se odnosi na drugu fazu tj. taksiranje za koju je zadan raspon od 1305 do 1752. Ako je vrijednost unutar tog raspona u ćeliji stupca „M“ za redak u kojem se provjera RPM se ispisuje vrijednost 2 te se petlja završava i prelazi se na iduću vrijednost RPM (brzine vrtnje) te se postupak ponavlja, a ako je vrijednost RPM viša od 1752 provjera se iduća faza sve do faze pet tj. polijetanje, penjanje u kojoj je definirana maksimalna vrijednost RPM sa strane proizvođača koja iznosi 2700. Ako je vrijednost kojim slučajem viša od 2700 u ćeliji se ispisuje „GREŠKA!“, a postupak iteracije se nastavlja sve do zadnjeg trenutka leta.

Emisija CO₂ u svakoj sekundi se određuje tako da se pomnoži emisijski faktor CO₂ (iz tablice „Faze“) koji je konstantan i iznosi 2,295 kg_{CO₂}/kg_G (3.10) s masenim protokom goriva u svakoj sekundi (tablica 11.). U stupcu „O“ se nalazi suma vrijednosti (kumulativna vrijednost) mase CO₂ do traženog trenutka, a kod je oblika: „O_{X-1}“ + „N_X“, a X se kreće od 2 do 3594.

Tablica 11. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase CO₂ u svakoj sekundi

SUM								=I2*Faze!\$C\$11	
	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	FF (protok goriva) [GPH]	FF (protok goriva) [l/s]	maseni protok goriva, kg/s	Gorivo kumulativno	Snaga [HP]	Moment [Nm]	Faza leta	CO ₂ [kg/s]	CO ₂ [kg] kumulativno
2	3	0,003156	0,002272	0,002272	32,0	204,7	1	\$C\$11	0,005214974
3	3	0,003156	0,002272	0,004545	32,0	204,0	1	0,00521	0,010429949
4	3	0,003156	0,002272	0,006817	32,0	203,5	1	0,00521	0,015644923
5	2,8	0,002946	0,002121	0,008938	32,0	202,9	1	0,00487	0,020512233
6	2,5	0,002630	0,001894	0,010831	32,0	202,0	1	0,00435	0,024858045
7	2,2	0,002314	0,001666	0,012498	32,0	198,8	1	0,00382	0,028682359
8	2,1	0,002209	0,001591	0,014088	32,0	196,1	1	0,00365	0,032332841
9	2,2	0,002314	0,001666	0,015755	32,0	194,1	1	0,00382	0,036157156
10	2,4	0,002525	0,001818	0,017573	32,0	191,2	1	0,00417	0,040329135
11	2,6	0,002735	0,001969	0,019542	30,4	191,4	1	0,00452	0,04484878

Emisija NO_x u svakoj sekundi se određuje tako da se pomnoži maseni protok goriva u svakoj sekundi sa emisijskim faktorom u toj fazi leta koji se traži pomoću funkcije *vlookup* (tablica 12.). Funkcija *vlookup* radi tako što za pojedinu vrijednost (fazu leta) u stupcu „M“ traži odgovarajući emisijski faktor u osmom stupcu tablice „Faze“ („H“) (tablica 13.).

Tablica 12. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase NO_x u svakoj sekundi, a u stupcu „Q“ se nalazi kumulativna vrijednost koja se računa gore opisanom postupkom

=I2*VLOOKUP(M2;Faze!\$A\$2:\$J\$6;8;FALSE)											
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	FF (protok goriva) [GPH]	FF (protok goriva) [l/s]	maseni protok goriva, kg/s	Gorivo kumulativno	Snaga [HP]	Moment [Nm]	Faza leta	CO_2 [kg/s]	CO_2 [kg] kumulativno	NO_x [g/s]	NO_x [g] kumulativno
2	3	0,003156	0,002272	0,002272	32,0	204,7	1	0,00521	0,00521	0,01227	0,012270528
3	3	0,003156	0,002272	0,004545	32,0	204,0	1	0,00521	0,010429949	0,01227	0,024541056
4	3	0,003156	0,002272	0,006817	32,0	203,5	1	0,00521	0,015644923	0,01227	0,036811584
5	2,8	0,002946	0,002121	0,008938	32,0	202,9	1	0,00487	0,020512233	0,01145	0,048264077
6	2,5	0,002630	0,001894	0,010831	32,0	202,0	1	0,00435	0,024858045	0,01023	0,058489517
7	2,2	0,002314	0,001666	0,012498	32,0	198,8	1	0,00382	0,028682359	0,009	0,067487904
8	2,1	0,002209	0,001591	0,014088	32,0	196,1	1	0,00365	0,032332841	0,00859	0,076077274
9	2,2	0,002314	0,001666	0,015755	32,0	194,1	1	0,00382	0,036157156	0,009	0,085075661

Tablica 13. Tablica „Faze“ u kojoj je označen stupac „H“ u kojoj se nalaze vrijednosti emisijskih faktora po fazama za NO_x

EF NO_x , g/kg										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Faza leta	Faza leta - opis	n_{max}	P_{max}	M_{max}	SREDNJI PROTOK GORIVA [kg/s]	EF CO_2 , kg/kg	EF NO_x , g/kg	EF C_nH_m , g/kg	EF CO , g/kg
2	1	Prazan hod	1304	32,0	189,2	0,0019	2,295	5,400	14,600	654,900
3	2	Taksiranje	1752	49,6	214,3	0,0033	2,295	2,325	22,322	1062,766
4	3	Slijetanje	1917	60,8	228,0	0,0083	2,295	5,400	18,600	654,900
5	4	Krstarenje, spuštanje	2340	109,0	335,0	0,0031	2,295	3,077	21,412	963,099
6	5	Polijetanje, penjanje	2700	160,0	422,0	0,0016	2,295	4,600	8,810	922,900

Isti postupak kao za izračun emisije NO_x u svakoj sekundi pomoću funkcije *vlookup* se ponavlja i za izračun emisija C_nH_m i CO (tablica 14., tablica 15.).

Tablica 14. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase C_nH_m u svakoj sekundi

SUM													=I2*VLOOKUP(M2;Faze!\$A\$2:\$J\$6;9;FALSE)	
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	FF (protok goriva) [GPH]	FF (protok goriva) [l/s]	maseni protok goriva, kg/s	Gorivo kumulativno	Snaga [HP]	Moment [Nm]	Faza leta	CO ₂ [kg/s]	CO ₂ [kg] kumulativno	NOx [g/s]	NOx [g] kumulativno	CnHm [g/s]	CnHm [g] kumulativno	
2	3	0,003156	0,002272	0,002272	32,0	204,7	1	0,00521	0,005214974	0,01227	0,012270528	FALSE	0,033175872	
3	3	0,003156	0,002272	0,004545	32,0	204,0	1	0,00521	0,010429949	0,01227	0,024541056	0,03317587	0,066351744	
4	3	0,003156	0,002272	0,006817	32,0	203,5	1	0,00521	0,015644923	0,01227	0,036811584	0,03317587	0,099527616	
5	2,8	0,002946	0,002121	0,008938	32,0	202,9	1	0,00487	0,020512233	0,01145	0,048264077	0,03096415	0,130491763	
6	2,5	0,002630	0,001894	0,010831	32,0	202,0	1	0,00435	0,024858045	0,01023	0,058489517	0,02764656	0,158138323	
7	2,2	0,002314	0,001666	0,012498	32,0	198,8	1	0,00382	0,028682359	0,009	0,067487904	0,02432897	0,182467296	
8	2,1	0,002209	0,001591	0,014088	32,0	196,1	1	0,00365	0,032332841	0,00859	0,076077274	0,02322311	0,205690406	
9	2,2	0,002314	0,001666	0,015755	32,0	194,1	1	0,00382	0,036157156	0,009	0,085075661	0,02432897	0,230019379	

Tablica 15. U polju iznad tablice prikazan je kod za izračun mase CO u svakoj sekundi

T2													=I2*VLOOKUP(M2;Faze!\$A\$2:\$J\$6;10;FALSE)		
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	FF (protok goriva) [GPH]	FF (protok goriva) [l/s]	maseni protok goriva, kg/s	Gorivo kumulativno	Snaga [HP]	Moment [Nm]	Faza leta	CO ₂ [kg/s]	CO ₂ [kg] kumulativno	NOx [g/s]	NOx [g] kumulativno	CnHm [g/s]	CnHm [g] kumulativno	CO [g/s]	CO [g] kumulativno
2	3	0,003156	0,002272	0,002272	32,0	204,7	1	0,00521	0,005214974	0,01227	0,012270528	0,03317587	0,03317587	1,48814	1,488142368
3	3	0,003156	0,002272	0,004545	32,0	204,0	1	0,00521	0,010429949	0,01227	0,024541056	0,03317587	0,066351744	1,48814	2,976284736
4	3	0,003156	0,002272	0,006817	32,0	203,5	1	0,00521	0,015644923	0,01227	0,036811584	0,03317587	0,099527616	1,48814	4,464427104
5	2,8	0,002946	0,002121	0,008938	32,0	202,9	1	0,00487	0,020512233	0,01145	0,048264077	0,03096415	0,130491763	1,38893	5,853359981
6	2,5	0,002630	0,001894	0,010831	32,0	202,0	1	0,00435	0,024858045	0,01023	0,058489517	0,02764656	0,158138323	1,24012	7,093478621
7	2,2	0,002314	0,001666	0,012498	32,0	198,8	1	0,00382	0,028682359	0,009	0,067487904	0,02432897	0,182467296	1,0913	8,184783024
8	2,1	0,002209	0,001591	0,014088	32,0	196,1	1	0,00365	0,032332841	0,00859	0,076077274	0,02322311	0,205690406	1,0417	9,226482682
9	2,2	0,002314	0,001666	0,015755	32,0	194,1	1	0,00382	0,036157156	0,009	0,085075661	0,02432897	0,230019379	1,0913	10,31778708
10	2,4	0,002525	0,001818	0,017573	32,0	191,2	1	0,00417	0,040329135	0,00982	0,094892083	0,0265407	0,256560077	1,19051	11,50830098

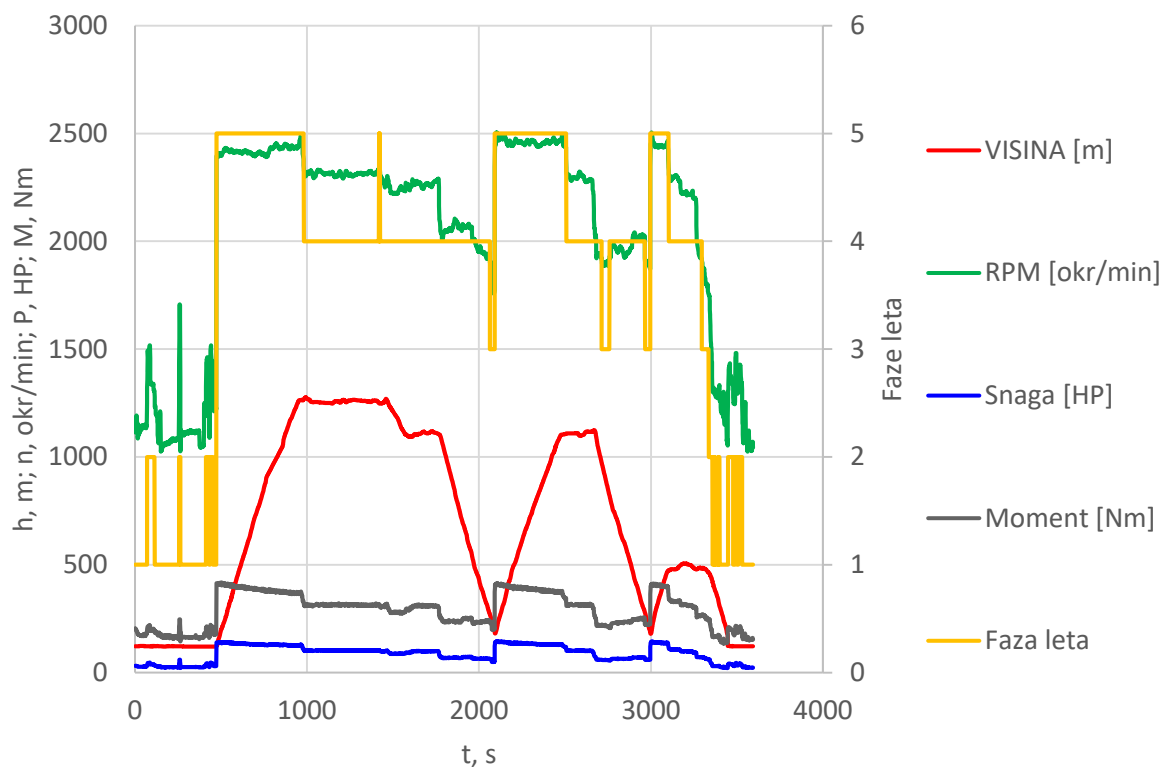
Sada se mogu prikazati ukupne emisije za testni let, a one se nalaze na kraju stupca u kojima su naznačene kumulativne vrijednosti tj. u 3594. retku (tablica 16.).

Tablica 16. Sumarni podaci o letu s utvrđenim rezultatima

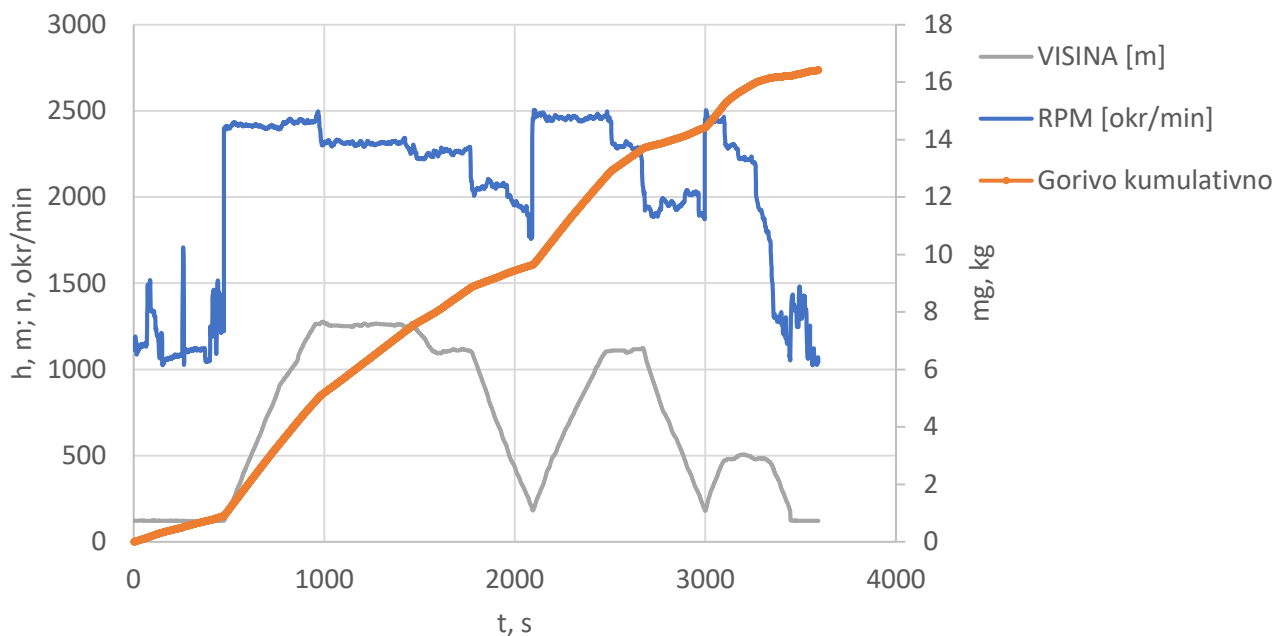
Sumarni podaci o letu s utvrđenim rezultatima		
Ukupno trajanje leta	3593	s
Ukupno trajanje leta	59,9	min
Maksimalna visina leta	1277	m
Najveća visinska razlika	1156	m
Prosječna brzina vrtnje	2046,9	min ⁻¹
Najveća brzina vrtnje	2504	min ⁻¹
Najmanja brzina vrtnje	1024	min ⁻¹
Prosječna snaga	88,2	HP
Najveća snaga	145,6	HP
Najmanja snaga	20,8	HP
Potrošnja goriva tijekom leta	16,42	kg
Emisija CO ₂	37,68	kg
Emisija NO _x	65,5	g
Emisija C _n H _m	240,3	g
Emisija CO	15173,6	g

3.7. Dijagramski prikazi emisija, potrošnje goriva i performansi zrakoplovnog klipnog motora

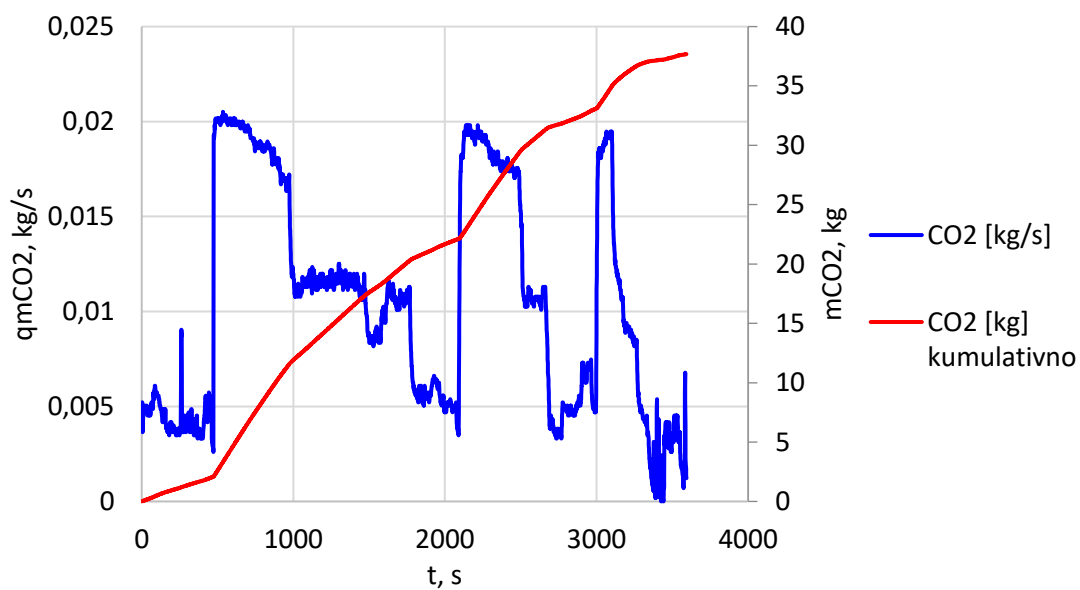
Sve izmjerene i izračunate vrijednosti za promatrani let mogu se prikazati i dijagramom koji daje daleko bolji uvid u promijene tijekom leta i omogućava lakše donošenje odluka.

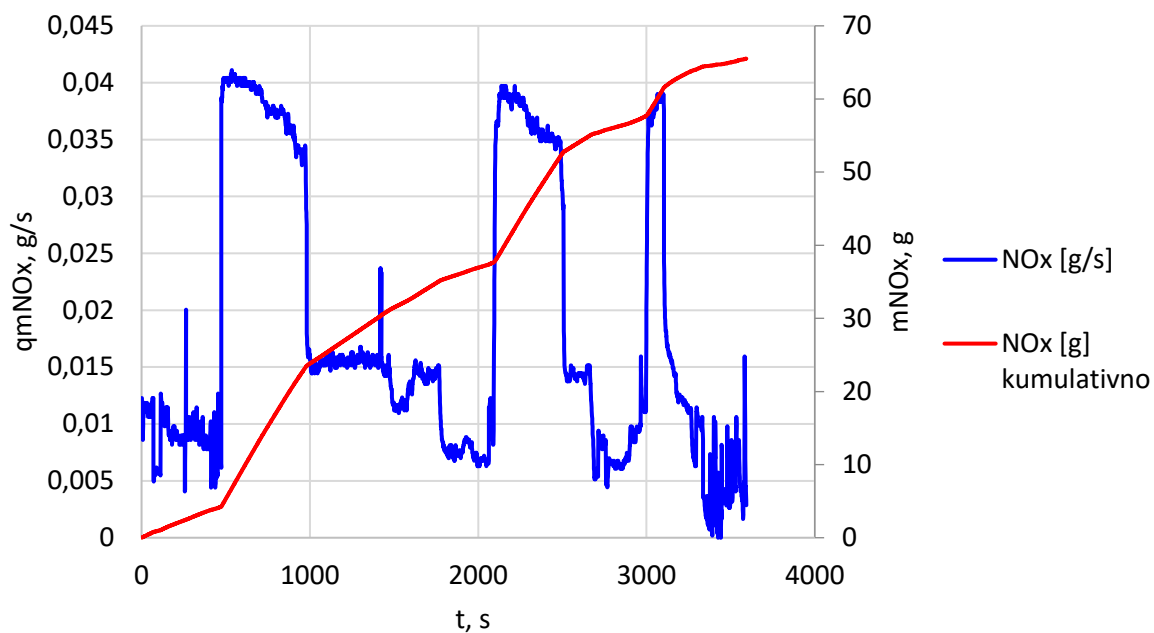


Slika 3.6. Više komponentni dijagramski prikaz performansi motora, visine i faze leta (faze leta su: 1 – prazni hod, 2 – taksiranje, 3 – slijetanje, 4 – krstarenje, spuštanje, 5 – polijetanje, penjanje)

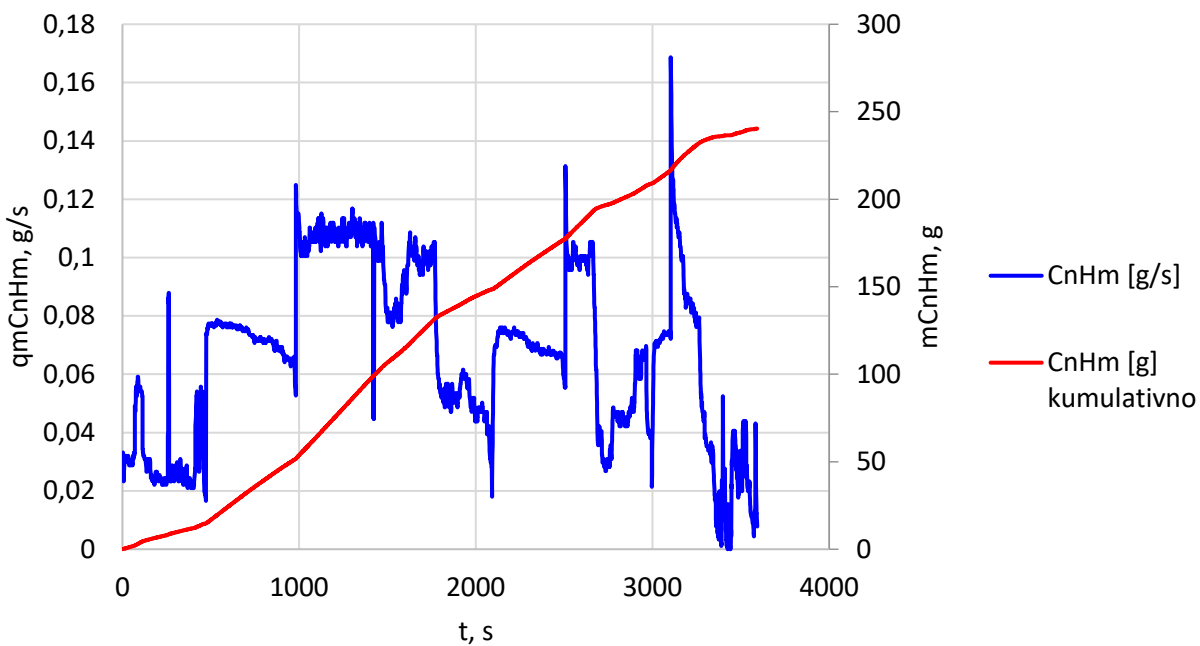


Slika 3.7. Dijagramski prikaz kumulativne potrošnje goriva

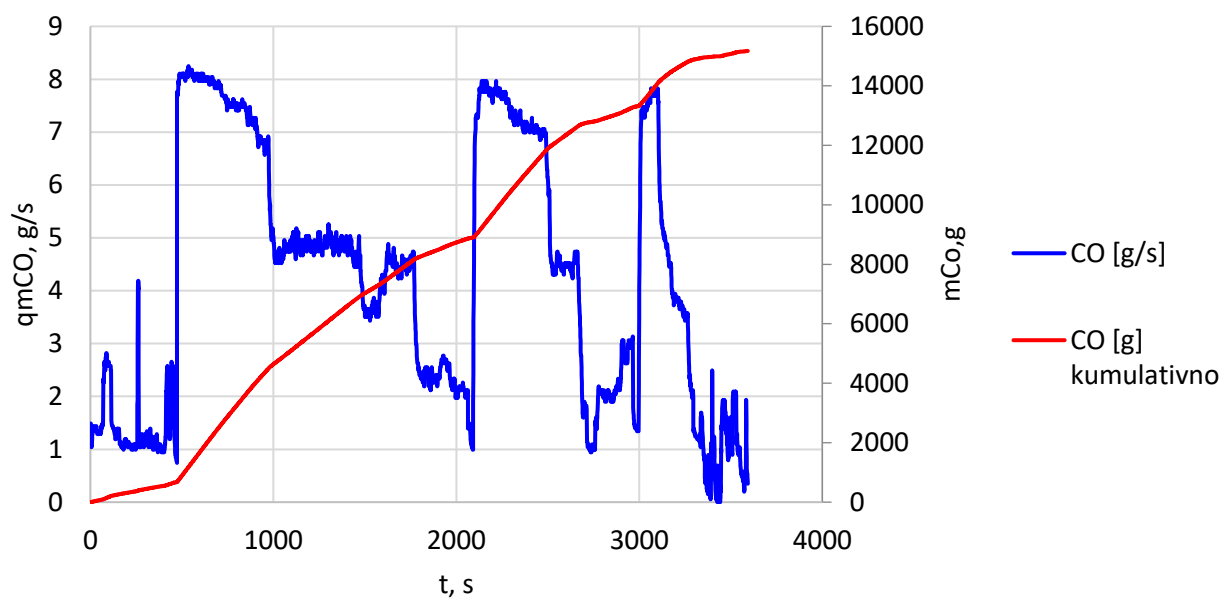
Slika 3.8. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije CO₂



Slika 3.9. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije NOx



Slika 3.10. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije C_nH_m



Slika 3.11. Dijagramski prikaz trenutne i kumulativne emisije CO

4. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada prikazan je model kojim se proračunavaju približne emisije ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora i potrošnja goriva tijekom leta. Uz to navedeni su i štetni utjecaji pojedinih sudionika ispušnih plinova kako za zdravlje ljudi tako i za okoliš.

Za okvirnu usporedbu sa EURO-6 direktivom koju moraju zadovoljavati sva današnja cestovna vozila emisija dušikovih oksida (NO_x) ne smije prijeći granicu od 0,06 g/km za Otto motore što znači ako bi prosječna okvirna brzina zrakoplova za čitav let iznosila:

$$\frac{2860 \cdot 210}{3592} \approx 167 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (4.1)$$

a zrakoplov leti jedan sat, u tom vremenu zrakoplov bi preletio put (duljina putanje između početnog i krajnjeg položaja predstavljena relacijom $s = \int_0^{t_k} v dt$ u kojoj s predstavlja prijeđeni put zrakoplova, v je brzina zrakoplova, a t_k je vrijeme trajanja leta) od ukupno 167 km. Broj 2860 (vrijeme u sekundama) predstavlja vrijeme zrakoplova u zraku dobiveno zbrojem četvrtog, petog i šestog retka u četvrtom stupcu tablice 3. Broj 210 (brzina u km/h) predstavlja prosječnu brzinu zrakoplova u zraku, a broj 3592 predstavlja ukupno trajanje leta u sekundama. Ako bi auto vozio tom istom brzinom u istom vremenu prema EURO-6 direktivi (u stvarnosti su emisije ispod izračunatog iznosa) on ne smije emitirati više od:

$$0,06 \cdot 167 = 10,02 g_{\text{NO}_x} \quad (4.2)$$

Ako se pogleda rezultat za ukupnu emisiju dušikovih oksida iz tablice 16., ona iznosi 65,52 g za zadani let u trajanju od jednog sata. To znači da testirani motor Lycoming O-320-H2AD ima 6,5 puta višu emisiju dušikovog oksida. Razlog niske emisije dušikovog oksida kod cestovnih vozila je uporaba katalizatora i izravnog elektronski reguliranog ubrizgavanja goriva.

Kao logično rješenje navedenog problema je ugradnja katalizatora na zrakoplovne klipne motore, ali to bi imalo za posljedicu potrebnu novu izvedbu motornog kućišta zrakoplova. Dodatni problem predstavlja i gorivo koje u sebi sadrži olovo koje se taloži na aktivne slojeve katalizatora te ga time čini neupotrebljivim te su iz tog razloga današnja automobilska goriva bezolovna.

Kao moguća poboljšanja prikazanog modela moguće je uzeti u obzir promjenu faktora zraka prema korisničkom priručniku (naravno ako pilot leti prema danim uputama). Također moguće je provesti vlastito eksperimentalno ispitivanje emisijskih faktora ispušnih plinova za zadani tip motora. Također navedeni model simulacije može poslužiti za razvoj aplikacije koja bi bila jednostavnija za korištenje krajnjim korisnicima.

LITERATURA

- [1] Lulić Z., Mahalec I., Kozarac D.: Klipni motori, interna skripta, ver. 5, FSB, listopad 2010.
- [2] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem, 2016.
- [3] Službena web stranica Američke agencije za zaštitu okoliša,
<https://www.epa.gov/clean-air-act-overview>, pristupljeno: 20.07.2020.
- [4] Web portal motoreu.com,
<https://motoreu.com/euro-emission-standards-and-their-meanings-blog>, pristupljeno: 21.07.2020.
- [5] Koncentracija ugljikova dioksida u zemljinoj atmosferi,
https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth, pristupljeno: 21.07.2020.
- [6] Koncentracija neizgorjelih ugljikovodika u zraku,
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01636892>, pristupljeno: 22.07.2020.
- [7] Postotna količina vodika u zemljinoj atmosferi,
<https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodik>, pristupljeno: 23.07.2020.
- [8] Faze leta zrakoplova,
<https://www.fp7-restarts.eu/index.php/home/root/state-of-the-art/objectives/2012-02-15-11-58-37/71-book-video/parti-principles-of-flight/126-4-phases-of-a-flight.html>, pristupljeno: 24.07.2020.
- [9] Opći podaci o zrakoplovu Cessna 172N Skyhawk,
https://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_172, pristupljeno: 25.07.2020.
- [10] Cjenik novih i polovnih modela Cessne 172N Skyhawk,
https://www.trade-a-plane.com/search?category_level1=Single+Engine+Piston&make=CESSNA&model=172S+SKYHAWK+SP&listing_id=2384870&s-type=aircraft, pristupljeno: 15.09.2020.
- [11] Korisnički priručnik za seriju motora Lycoming O-320,
<https://www.lycoming.com/sites/default/files/O-320%20Operator%20Manual%2060297-30.pdf>, pristupljeno: 25.07.2020.
- [12] Podaci o zrakoplovnom gorivu AVGAS,
https://en.wikipedia.org/wiki/Avgas#cite_note-FAAPHAk-1, pristupljeno: 25.07.2020.

- [13] Mjerna kočnica,
<http://www.protech-service-engineering.nl/power-test-dynamometer-1>, pristupljeno:
28.07.2020.
- [14] J.P. Instruments službena web stranica, <https://www.jp instruments.com/shop/edm-900-2/>, pristupljeno: 28.07.2020.
- [15] Web pretvornik mjernih jedinica za duljinu,
<https://www.metric-conversions.org/hr/duljina/stope-u-metri.htm>, pristupljeno:
29.07.2020.
- [16] Galović A.: Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [17] Web pretvornik mjernih jedinica za tlak,
<https://www.metric-conversions.org/pressure/inches-of-mercury-to-bar.htm>,
pristupljeno: 15.08.2020.
- [18] Web pretvornik mjernih jedinica za protok goriva,
<http://convert-to.com/conversion/flow/convert-gal-us-per-hr-flow-to-kg-per-sec-gasoline-flow.html>, pristupljeno: 02.09.2020.
- [19] Web pretvornik mjernih jedinica za obujam,
<https://www.metric-conversions.org/hr/volumen/galoni-u-litri.htm>, pristupljeno:
04.09.2020.
- [20] Službena stranica Saveznog ureda za civilno zrakoplovstvo (FOCA),
<https://www.bazl.admin.ch/bazl/en/home.html>, pristupljeno: 10.09.2020.