

Upotreba smanjenog potiska polijetanja zrakoplova Airbus A320

Živko, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:411057>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ANTONIO ŽIVKO

UPOTREBA SMANJENOG POTISKA POLIJETANJA
ZRAKOPLOVA AIRBUS A320

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 3. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovna prijevozna sredstva**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5667

Pristupnik: **Antonio Živko (0135251271)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Upotreba smanjenog potiska polijetanja zrakoplova Airbus A320**

Opis zadatka:

U radu je potrebno definirati mogućnosti korištenja smanjenog potiska polijetanja (Reduced Takeoff Thrust) te smanjenog nominalnog potiska polijetanja (Derated Takeoff Thrust). Primjere određivanja i postavljanja obje vrste smanjenog potiska polijetanja prikazati za zrakoplov Airbus A320. Potrebno je objasniti zahtjeve zrakoplovnih propisa kojima je definirana upotreba smanjenog potiska polijetanja. Dodatno, potrebno je analizirati pozitivne učinke upotrebe smanjenog potiska na operacije i održavanje zrakoplova, odnosno zrakoplovnog motora.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

UPOTREBA SMANJENOG POTISKA POLIJETANJA
ZRAKOPLOVA AIRBUS A320
AIRBUS A320 OPERATION WITH REDUCED AND
DERATED TAKEOFF THRUST

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

Student: Antonio Živko

JMBAG: 0135251271

Zagreb, rujan 2020.

Sažetak

Korištenje smanjenog potiska polijetanja omogućuje zračnim prijevoznicima veću kontrolu korištenja performansi motora i smanjenje troškova vezanih uz održavanje zrakoplova. Također, korištenjem smanjenog potiska polijetanja smanjuje se emisija ispušnih plinova, količina buke proizvedena zrakoplovnim motorima i povećava se sigurnost operacija zrakoplova. Suprotno učestalom mišljenju, korištenjem smanjenog potiska tijekom polijetanja ne smanjuje se potrošnja goriva zbog produljenja faze polijetanja i penjanja.

U ovom završnom radu opisana je upotreba smanjenog potiska polijetanja zrakoplova Airbusa A320. Opisani su zahtjevi zrakoplovnih propisa za korištenje smanjenog potiska te dva načina upotrebe smanjenog potiska polijetanja. Prije primjene procedure smanjenog potiska, zračni prijevoznik mora osigurati da se procedura primjenjuje u skladu sa sigurnosnim propisima proizvođača Airbusa A320. Proizvođač zrakoplova izradio je procedure smanjenog potiska polijetanja u skladu sa zahtjevima od strane EASA-e koji se nalaze u dokumentu CS-25 i preporučio za korištenje tijekom eksploatacije zrakoplova. Prilikom primjene procedure, piloti moraju biti svjesni kako smanjenje potiska utječe na upravljivost zrakoplova i na propisane brzine prilikom polijetanja.

Ključne riječi: Zrakoplov; Airbus A320; Smanjeni nominalni potisak mlaznog motora; Smanjeni potisak polijetanja; CS-25; mlazni motor

Summary

The use of reduced takeoff thrust allows airlines greater control over the use of engine performance and reduced airplane maintenance costs. Also, using reduced takeoff thrust reduces exhaust emissions, the amount of noise produced by airplane engines and increases the safety of airplane operations. Contrary to popular belief, using reduced takeoff thrust does not reduce fuel consumption due to lengthening of the takeoff and climbing phase.

This final thesis describes the use of reduced takeoff thrust of an Airbus A320 airplane. The regulatory requirements for the use of reduced thrust and two ways of using reduced takeoff thrust are described. Before applying the reduced thrust procedure, the airline must

ensure that the procedure is applied in accordance with the safety regulations of the Airbus A320 manufacturer. The aircraft manufacturer has developed reduced takeoff thrust procedures in accordance with the requirements of EASA contained in document CS-25 and recommended for use during the operation of the aircraft. When applying the procedure, pilots must be aware of how the reduction in thrust affects the maneuverability of the aircraft and the prescribed takeoff speeds.

Key words: Airplane; Airbus A320; Reduced takeoff thrust; De-rated takeoff thrust; CS-25, Jet engine

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Zahtjevi zrakoplovnih propisa vezani uz polijetanje zrakoplova	2
2.1	Karakteristične brzine tijekom polijetanja	2
2.2	Propisani odnosi brzina tijekom polijetanja	8
2.3	Karakteristične duljine staze tijekom polijetanja	9
2.4	Propisani odnosi duljina tijekom polijetanja	10
3	Korištenje smanjenog potiska polijetanja zrakoplova Airbus A320	12
3.1	Potisak mlaznog motora	12
3.2	Upotreba smanjenog nominalnog potiska polijetanja	13
3.3	Upotreba smanjenog potiska polijetanja	16
3.4	Određivanje smanjenog potiska polijetanja.....	19
4	Utjecaj smanjenog potiska polijetanja na zrakoplov A320.....	23
4.1	Smanjeni troškovi održavanja zrakoplovnih motora.....	23
4.1.1	Margina temperature ispušnih plinova na turbini.....	24
4.1.2	Specifična potrošnja goriva.....	25
4.2	Povećana sigurnost tijekom leta	26
4.3	Smanjena buka prilikom polijetanju.....	26
4.4	Smanjena količina ispušnih plinova.....	27
5	Zaključak.....	29
	Popis kratica.....	30
	Literatura	31

1 Uvod

Procedure korištenja smanjenog potiska polijetanja primjenjuju se svakodnevno na zrakoplovima opremljenim za te procedure. Proizvođač zrakoplova propisuje uvjete koje zrakoplov mora zadovoljiti prije primjene smanjenog potiska polijetanja, nakon čega svaki zračni prijevoznik odlučuje kada i za koliko će piloti tijekom polijetanja moći smanjivati potisak. Airbus A320 je uskotrupni putnički zrakoplov koji ima dva mlazna motora, te posjeduje mogućnost smanjenja potiska polijetanja.

Završni rad opisuje procedure smanjenja potiska polijetanja zrakoplova Airbus A320. U radu su opisani uvjeti koji se moraju uzeti u obzir prije smanjenja potiska polijetanja, koja su dva načina smanjenja potiska prilikom polijetanja i koje prednosti donosi primjena procedure smanjenja potiska polijetanja. Svrha rada je povećati svjesnost pozitivnih utjecaja tih procedura, kako bi procedure postale obavezne za svakodnevnu primjenu zbog brojnih prednosti vezanih uz zaštitu okoliša i sigurnost zračne plovidbe.

Rad je podijeljen u pet poglavlja. Nakon uvoda, drugo poglavlje se bavi sigurnosnim zahtjevima koje zrakoplov mora zadovoljiti tijekom polijetanja. Opisane su brzine i karakteristične duljine uzletno-sletne staze koje pilot mora znati prije polijetanja i kako smanjenjem potiska utječe na njih. Treće poglavlje opisuje potisak mlaznog motora, procedure smanjenja nominalnog potiska motora i smanjenje potiska motora tijekom faze polijetanja zrakoplova Airbus A320. Također, prikazan je postupak pomoću kojeg piloti Airbus-a A320 iz tablica mogu izračunati ili iščitati maksimalno smanjenje potiska prilikom polijetanja. Četvrto poglavlje se fokusira na pozitivne utjecaje procedura smanjenog potiska. Opisano je kako primjena procedure smanjuje emisiju ispušnih plinova motora, povećava sigurnost letenja, smanjuje razinu buke i smanjuje troškove održavanja zrakoplova. U zaključku su dana zaključna razmatranja o temi.

2 Zahtjevi zrakoplovnih propisa vezani uz polijetanje zrakoplova

Sigurnost u zrakoplovstvu je uvijek na prvom mjestu. Prije nego se počne primjenjivati procedura korištenja smanjenog potiska polijetanja, piloti se trebaju uvjeriti da nisu narušili sigurnost tijekom polijetanja i je li zrakoplov zadovoljava sve propisane uvjete polijetanja s tim smanjenim potiskom. Uvjeti koje zrakoplov Airbus A320 i ostali veliki zrakoplovi moraju zadovoljiti tijekom polijetanja, propisani su od strane Europske agencije za sigurnost zračnog prometa (eng. *European Aviation Safety Agency - EASA*) koji se nalaze u dokumentu CS-25. U slučaju da uvjeti nisu zadovoljeni, smanjenje potiska može proizvesti neželjene situacije. Ako su uvjeti zadovoljeni, tada je dopušteno korištenje procedura smanjenja potiska uz ograničenja propisana od strane proizvođaču zrakoplova i EASA-e.

2.1 Karakteristične brzine tijekom polijetanja

Polijetanje, uz slijetanje, je jedno od dvije kritične faza leta u kojoj su se dogodile mnogobrojne nesreće. Kako bi se smanjili rizici tijekom polijetanja, piloti moraju znati pri kojim brzinama smiju napraviti određenu radnju. Brzine prilikom polijetanja značajno ovise o potisku zrakoplova, raspoloživoj stazi za uzlijetanja (duljini i uvjetima staze) i masi zrakoplova.

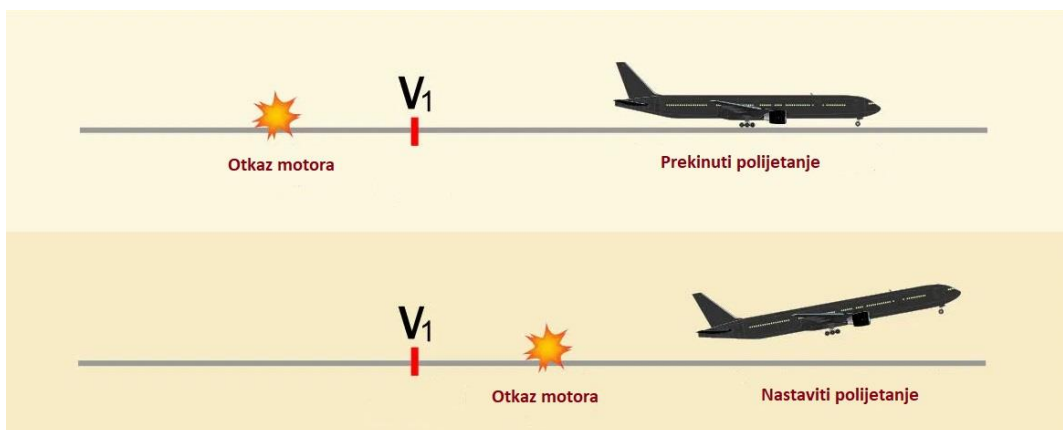
Početak odlijepljena zrakoplova, pilot može započeti tek kada sila uzgona, generirana od strane zrakoplova, postane veća od njegove težine. Pilot također mora uzeti u obzir situaciju da otkaže jedan ili više motora tijekom zaleta. Ako otkaže motor/i, pilot mora imati ili dovoljno staze kako bi sigurno zaustavio zrakoplov ili mora imati dovoljno potiska s preostalim ispravnim motorom/ima, kako bi sigurno i kontrolirano poletio. Svaka od tih veličina koju pilot mora znati, treba biti izračunata prije leta. Nakon što izračunaju ili odrede informacije potrebne za polijetanje, piloti ih, prije polaska s parkirne pozicije (eng. *Gate*), trebaju unijeti u višenamjensko upravljačko računalo (eng. *Multipurpose Control Display Unit – MCDU*), prikazano na slici 1 [1].



Slika 1. Prikaz mjesta unosa brzina u MCDU u Airbusu A320

Izvor: [2]

Brzina odluke (eng. *Decision speed - V_1*) je definirana brzina preko koje se polijetanje više ne smije prekinuti. U slučaju otkaza motora ili većih problema na zrakoplovu (npr. požar, puknuće oplata zrakoplova ili većih kvarovi), prije nego zrakoplov dostigne brzinu odluke, pilot mora prekinuti polijetanje i primijeniti sva potreba sredstva, kao što su zračne kočnice, kočnice ili obrnuti potisak, kako bi sigurno zaustavio zrakoplov. Ako se taj kvar dogodi nakon što je zrakoplov dostigao brzinu odluke, pilot mora nastaviti polijetanje. To je obveza svakog pilota jer postoji mogućnost da neće imati dovoljno uzletno-sletne staze za sigurno zaustavljanje zrakoplova i to može prouzročiti veliku štetu, te ugrozu ljudskih života i tereta. Odluke pilota ovisno o kvaru prije ili nakon brzine odluke su prikazane na slici 2 [3].



Slika 2. Pilotska reakcija ovisno o brzini odluke V_1

Izvor: [3]

Brzina rotacije (eng. *Rotation speed* – V_R) je definirana brzina pri kojoj pilot počinje povlačiti palicu na sebe, kako bi podigao nos zrakoplova. Točnije, brzina rotacije je brzina pri kojoj pilot podiže nosni kotač s zemlje kao što je prikazano na slici 3. Rotacija zrakoplova traje sve dok svi kotači nisu u zraku i tada je to brzina polijetanja (eng. *Lift-off speed* - V_{LOF}) [3].

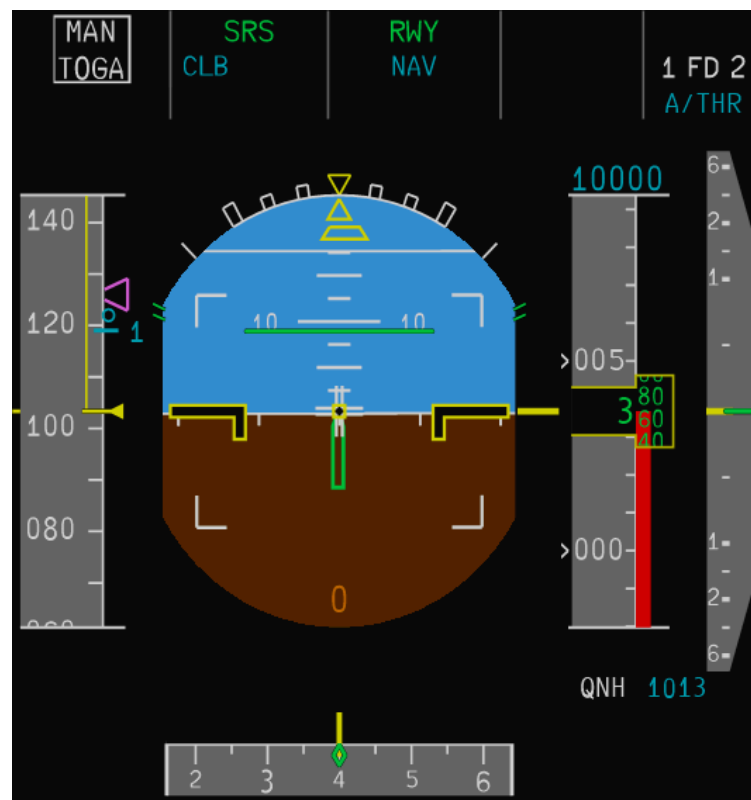


Slika 3. Prikaz rotacije zrakoplova Airbus A320

Izvor: [4]

Sigurnosna brzina pri polijetanju (eng. *Take-off Safety Speed* - V_2) je definirana brzina kojom zrakoplov može sigurno penjati u slučaju otkaza jednog ili više motora. Sigurnosna brzina pri polijetanju mora biti dostignuta do 35 stopa (eng. *Feet* – ft) iznad površine uzletno-sletne staze. U slučaju otkaza jednog motora, zrakoplov mora biti u stanju penjati s minimalno 200 ft/min [3].

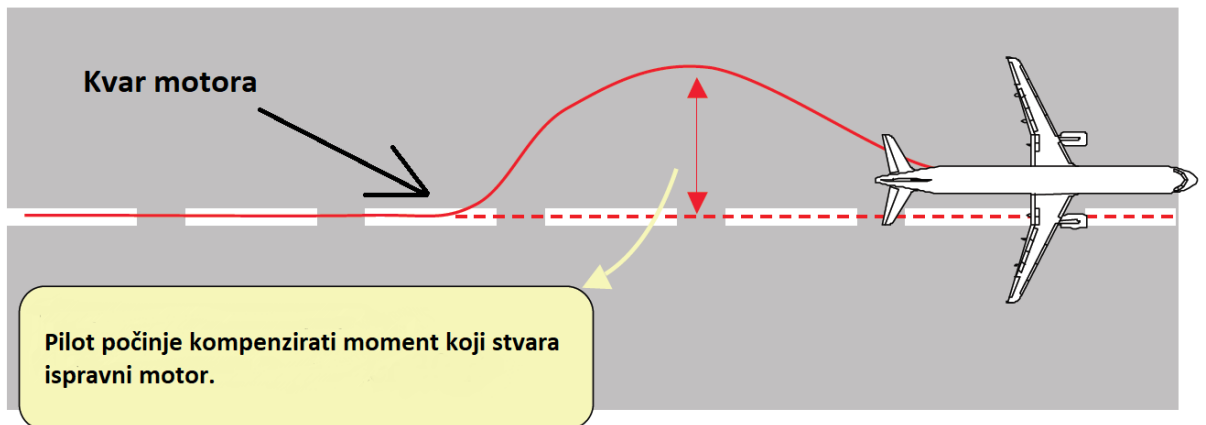
Na zrakoplovu Airbus A320 informacije o brzinama, pilotu su prikazane na Primarnom prikazniku za letenje (eng. *Primary Flight Display* - PFD). Brzine V_1 i V_2 pilotu su prikazane na lijevoj strani prikaznika, na dijelu koji prikazuje brzinu zrakoplova. Brzina V_1 je označena kao „1“, svijetlo plave boje i u proizvoljnom primjeru na slici 4. iznosi 119 čvorova (eng. *Knots* - kt). Brzina V_2 prikazana je trokutom u magenta boji i na slici 4. iznosi 126 čvorova. Brzina V_R nije prikazana na PFD-u, nego samo pod „*Takeoff*“ opcijom, kojoj pilot može pristupiti pritiskom gumba PERF (eng. *Performanse*) na MCDU-u. To znači da posada Airbusa A320 mora znati brzinu V_R napamet tijekom polijetanja [1].



Slika 4. Prikaz PFD Airbusa A320 tijekom zaleta

Izvor: [2]

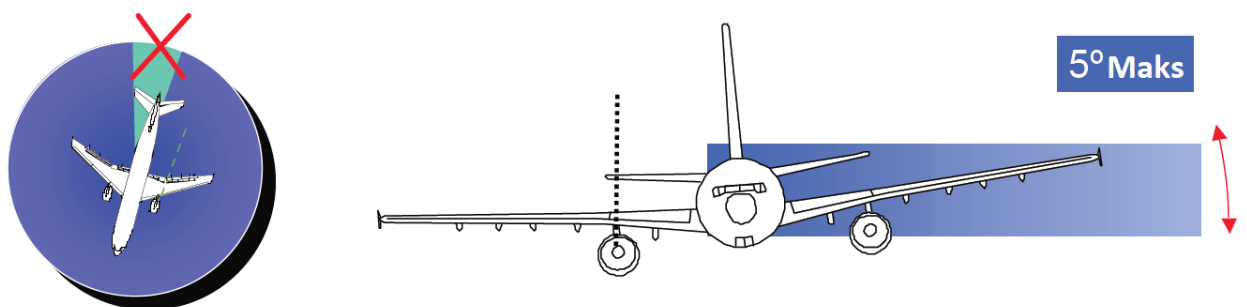
Minimalna brzina upravljanja na zemlji (eng. *Minimum control speed on ground* - V_{MCG}) je definirana kao najmanja brzina tijekom zaleta, pri kojoj se može održati direkcionalnu kontrolu zrakoplova na zemlji u slučaju otkaza motora, dok je ispravni motor/i i dalje na postavci snage za polijetanje. Direkcionalnu kontrolu zrakoplova u tom slučaju pilot održava pomoću kormila smjera, kompenzirajući novonastali moment proizveden od strane ispravnog/ih motor/i kao što je prikazano na slici 5 [5].



Slika 5. Prikaz kompenziranja momenta neispravnog motora tijekom zaleta

Izvor: [6]

Kompenzirajuća sila koju kormilo smjera može proizvesti, ovisi o površini kormila smjera i konstanta je. U slučaju da je zrakoplov opremljen motorima koji imaju opciju smanjenog potiska polijetanja, smanjeni potiska rezultirat će smanjenjem momenta koji proizvodi ispravni motor. Budući da je površina kormila i otklon kormila smjera konstantan, količina sile potrebna za kompenziranje momenta ispravnog motora, u slučaju smanjenog potiska, je manja. To rezultira smanjenim V_{MCG} i potencijalno smanjenim V_1 [5].



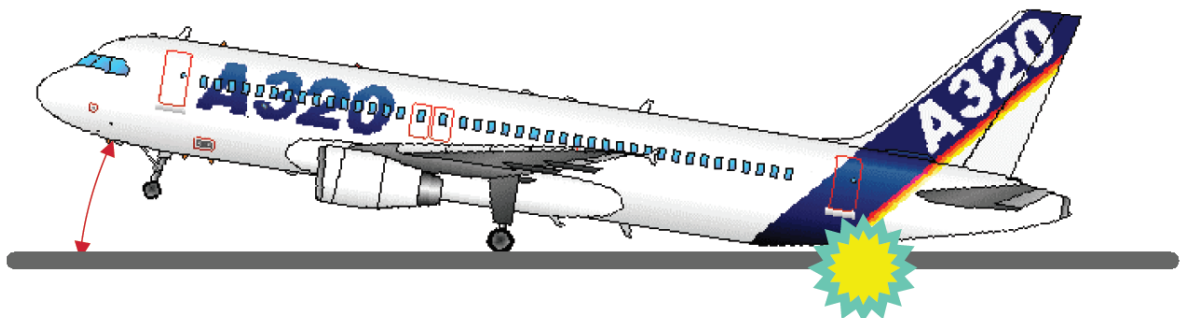
Slika 6. Uvjeti minimalne brzine upravljanja u zraku

Izvor: [6]

Minimalna brzina upravljanja u zraku (eng. *Minimum control speed in the air* - V_{MCA}) je definirana kao minimalna brzina tijekom polijetanja, pri kojoj pilot može održati kontrolu nad zrakoplovom u zraku, ako jedan motor ili više otkáže, a ostali su na postavci snage za polijetanja. Smatra se da je zrakoplov kontroliran ako može održati uzlijetanje s najviše 5 stupnjeva naginjanja ili bez skretanja, kao što je prikazano na slici 6 [7].

Kompenzirajuća sila koju kormilo smjera može proizvesti, ovisi o površini kormila smjera i konstanta je. U slučaju da je zrakoplov opremljen motorima koji imaju opciju smanjenog potiska polijetanja, smanjeni potiska rezultirat će smanjenjem momenta koji proizvodi ispravni motor. Budući da je površina kormila i otklon kormila smjera konstantan, količina sile potrebna za kompenziranje momenta ispravnog motora, u slučaju smanjenog potiska, je manja. To rezultira smanjenim V_{MCA} [7].

Minimalna brzina odljepljenja (eng. *Minimum unstick speed* - V_{MU}) je minimalna kalibrirana brzina zrakoplova iznad koje zrakoplov počinje sigurno uzlijetanje. Ako zrakoplov počne uzlijetati prije nego je dostigao minimalnu brzinu odljepljenja, može se dogoditi da zrakoplov repnim dijelom dođe u kontakt s uzletno-sletnom stazom, kao što je prikazano na slici 7. Ta pojava je pro izazvana manjkom sile uzgona, koju pilot pokušava kompenzirati većim napadnim kutom [6].



Slika 7. Udarac zrakoplova zbog prevelikog napadnog kuta

Izvor: [6]

Maksimalna količina apsorpcije kinetičke energije kočnica (eng. *Maximum brake energy speed* - V_{MBE}) je maksimalna brzina pri kojoj, u slučaju prekinutog polijetanja, zrakoplovne kočnice mogu sigurno zakočiti zrakoplov. Svake kočnice na zrakoplovima imaju konstrukcijski maksimum kinetičke energije koje mogu apsorbirati. Što je veća masa zrakoplova, to je brzina pri kojima kočnice mogu sigurno zakočiti manja. Svaka masa kojom će zrakoplov ići na polijetanje, mora biti u skladu s maksimalnom brzinom kočnica [1].

2.2 Propisani odnosi brzina tijekom polijetanja

Brzine koje su definirane u prošlom pod poglavlju, postoje kako bi piloti ispravno znali postupiti za vrijeme polijetanja. Bez tih brzina, sigurnost zrakoplova tijekom polijetanje bi uvelike ovisila o pilotskom iskustvu. Čak i piloti s veoma puno iskustva su skloni pogreškama, tako da su te brzine obavezne. Odnosi tih brzina točno su propisani u CS-25 pod dijelom CS 25.107 i moraju se strogo poštivati. Odnos tih brzina prikazan je na slici 8 [8].

Odnos brzine V_1 [8]:

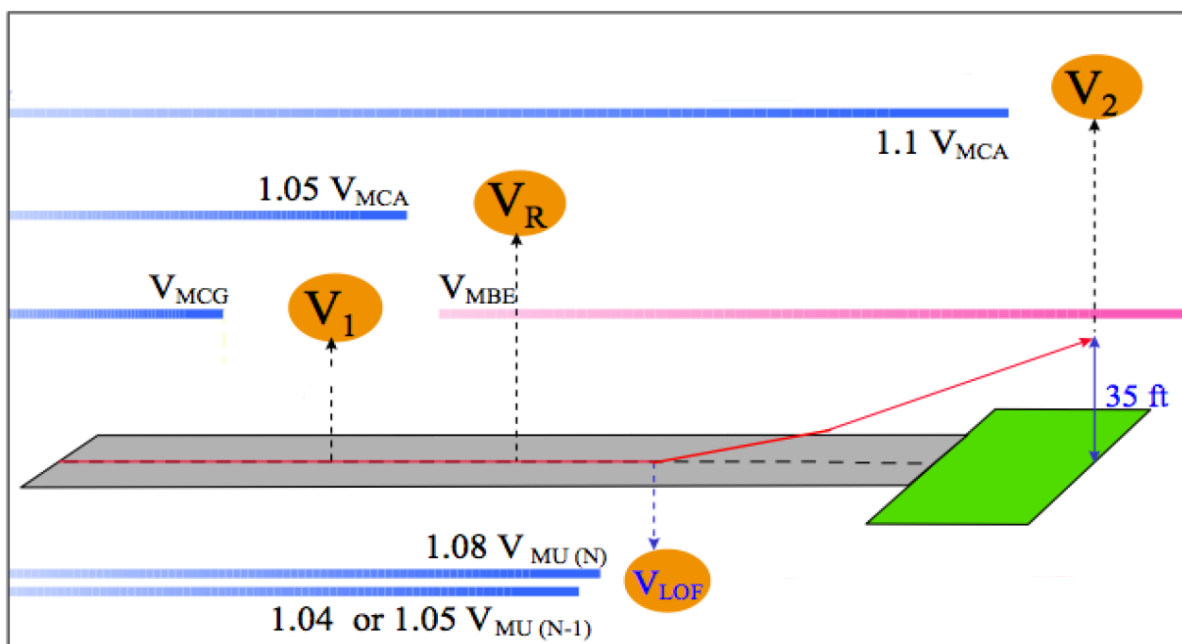
- Ne smije biti veća od V_R ,
- Ne smije biti veća od V_{MBE} ,
- Ne smije biti manja od V_{MCG} .

V_R ne smije biti manja od [8]:

- V_1 ,
- $1,05 V_{MC}$,
- Brzine da se dostigne V_2 prije 35 ft.

V_2 ne smije biti manja od [8]:

- $1,1 V_{MCA}$ i
- V_R plus brzina da se dostigne do 35 ft.



Slika 8. Propisani odnos brzina prilikom polijetanja zrakoplova

Izvor: [6]

2.3 Karakteristične duljine staze tijekom polijetanja

Smanjivanje potiska, degradiraju se performanse zrakoplova. Performanse zrakoplova utječu na karakteristične duljine staze tijekom polijetanja. Piloti moraju znati koje su to karakteristične duljine, kako bi znali jesu li one zadovoljene. Slika 9 prikazuje karakteristične duljine i njihove međusobne odnose [1].

Raspoloživa duljina za zalet (eng. *Take-off Run Available* - TORA) je definirana duljina uzletno-sletne staze (eng. *Runway* - RWY) korištena za normalne operacije, koja je prikladna za zalet zrakoplova koji je u polijetanju [9].

Raspoloživa duljina za uzlijetanje (eng. *Take-off Distance Available* - TODA) je definirana duljina koja se dobiva zbrajanjem duljine piste i duljine čistine (eng. *Clearway* - CWY). Čistina je područje izvan piste ne manje od 152 m široko, centralno smješteno oko proširene središnje linije piste i pod nadzorom zračne luke. Čistina je izražena kao ravnina koja se proteže od kraja piste s nagibom prema gore koji ne prelazi 1,25% iznad kojeg nijedan predmet ili teren ne strše, osim svjetla praga montirana na lako lomljivim nosačima [9].

Raspoloživa duljina za ubrzavanje i zaustavljanje (eng. *Accelerate-Stop Distance Available* - ASDA) je definirana duljina koja se dobiva zbrajanjem raspoložive duljine za zalet i raspoložive duljine staze za zaustavljanje (eng. *Stopway* - SWY) [9].



Slika 9. Prikaz karakterističnih duljina staze

Izvor: [10]

2.4 Propisani odnosi duljina tijekom polijetanja

Duljina za uzlijetanje (suha uzletno-sletna staza) [8]:

- udaljenost od početka zaleta, sve dok zrakoplov ne dostigne visinu od 35 ft, u slučaju otkaza kritičnog motora,
- 115% udaljenosti od početka zaleta, sve dok zrakoplov ne dostigne visinu od 35 ft, u slučaju da svi motori ispravno rade.

Duljina za uzlijetanje (mokra uzletno-sletna staza) [8]:

- udaljenost od početka zaleta, sve dok zrakoplov ne dostigne visinu od 15 ft iznad površine uzletno-sletne staze, ako će dostići brzinu V_2 prije visine od 35 ft, u slučaju otkaza motora,

- 115% udaljenosti od početka zaleta, sve dok zrakoplov ne dostigne visinu od 35 ft, u slučaju da svi motori ispravno rade.

Duljina za ubrzavanje i zaustavljanje (suha uzletno-sletna staza) [8]:

- suma udaljenosti potrebne da zrakoplov ubrza od stanja mirovanja do brzine V_1 , ubrzavajući slijedeće 2 sekunde i udaljenost da se zrakoplov zaustavi nakon te 2 sekunde (svi motori ispravno rade)
- suma udaljenosti potrebne da zrakoplov ubrza od stanja mirovanja do brzine otkaza motora, nastavi ubrzavati do brzine V_1 , ubrzavajući slijedeće 2 sekunde i udaljenost da se zrakoplov zaustavi nakon te 2 sekunde (otkazao motora).

3 Korištenje smanjenog potiska polijetanja zrakoplova Airbus A320

Airbus A320 je uskotrupni putnički zrakoplov doleta do 3 790 NM (6 100 km). Broj sjedećih mjesta u kabini A320 ovisi o zahtjevima zračnog prijevoznika, ali obično iznosi 150. Zrakoplov A320 spada u srednju kategoriju zrakoplova gledano po maksimalnoj masi polijetanja. Maksimalna masa polijetanja je 171 960 lb (78 t). Najčešće se koristi za kratke do srednje udaljenosti, pri visinama krstarenja od 36 000 ft. Zrakoplov A320 može biti pogonjen s 2 motora *CFM International CFM56-5* serije, od kojih svaki motor ima nominalni potisak 26 978 lbf (120 kN) [11].

3.1 Potisak mlaznog motora

Proizvođači motora moraju za svaki tip motora deklarirati potisak motora u točno propisanim uvjetima. Postoje dva zrakoplovna propisa, ovisno o državi u kojoj se proizvođač nalazi, koje proizvođač mora zadovoljiti kako bi certificirao motor. U Sjedinjenim Američkim Državama proizvođači moraju zadovoljiti propis koji nosi oznaku FAR Part 33 [12]. U Europi proizvođači moraju zadovoljiti propis od EASA-e koji nosi oznaku CS-E [13].

Propis CS-E definira dva obvezna režima rada motora koji se deklariraju kao Snaga i/ili Potisak polijetanja (eng. *Take-off Power and/or Thrust*) i Maksimalna kontinuirana Snaga i/ili Potisak (eng. *Maximum Continuous Power and/or Thrust*) [13].

Prema [13] potisak ili potisna sila F_T , jednaka je:

$$F_T = \dot{m}_0 \cdot (v_5 - v_0) + A_n \cdot (p_5 - p_0)$$

gdje oznake imaju slijedeće značenje:

F_T - sila potiska

\dot{m}_0 – maseni protok zraka na uvodniku mlaznog motora

v_5 – brzina ispušnih plinova na ispuhu/mlazniku mlaznog motora

v_0 – brzina strujanja zraka na uvodniku mlaznog motora

A_n – površina poprečnog presjeka mlaznika

p_5 – tlak ispušnih plinova na izlazu iz mlaznika

p_0 – tlak zraka na uvodniku

Za potpunu ekspanziju ispušnih plinova u mlazniku, tj. kada je p_5 jednako p_0 , može se pisati [13]:

$$F_T = \dot{m}_0 \cdot (v_5 - v_0)$$

Svi suvremeni zrakoplovi u svakodnevnim uvjetima eksploatacije imaju visoku sigurnosnu granicu u pogledu veličine potiska za polijetanje. Visoka sigurnosna granica tijekom polijetanja, proizlazi iz činjenice da se potisak polijetanja određuje za najstrože uvjete kao što su maksimalna masa polijetanja, visoka vanjska temperatura zraka, velika nadmorska visina aerodroma itd. Zbog toga se u uobičajenim uvjetima može koristiti i manji potisak polijetanja od maksimalnog, a da i dalje sigurnost ne bude narušena [13].

Smanjeni potisak polijetanja može se realizirati na dva načina: pomoću smanjivanja nominalnog potiska polijetanja (eng. *Derated Thrust*) i/ili pomoću smanjenog potiska polijetanja (eng. *Reduced Takeoff Thrust*). Smanjivanjem nominalnog potiska smanjuje se potisak motora i tada taj potisak predstavlja operativno ograničenje zrakoplova. Smanjenje potiska polijetanja, smanjuje se potisak motora tijekom polijetanja. Podatak o dopuštenom smanjenju potiska dobiva se proračunom parametara polijetanja kao što su vjetar, tlak, temperatura, stanje uzletno-sletne staze itd. [13].

3.2 Upotreba smanjenog nominalnog potiska polijetanja

Upotreba smanjenog nominalnog potiska polijetanja (eng. *Derated TakeOff Thrust*) zrakoplova ima isti efekt kao da je na zrakoplovu ugrađen motor manjeg nominalnog potiska. Kada se koristi smanjeni nominalni potisak polijetanja, taj potisak polijetanja je novi maksimalni potisak koji se ne smije prekoračiti. Tim postupkom degradiraju se performanse zrakoplova za vrijeme cijele upotrebe [1].

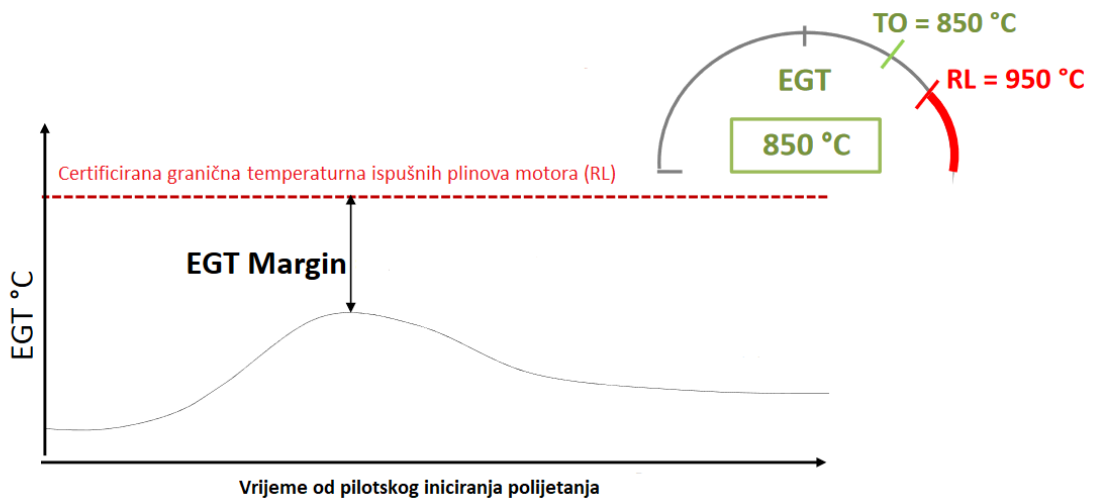
U nastavku se navodi primjer korištenja smanjenog nominalnog potiska polijetanja za zrakoplov Airbus A320. Zrakoplovi Airbus A319, A320 i A321 dizajnirani su kako bi mogli koristiti isti motor, primjerice CFM56-5B. Zrakoplov A319 ima maksimalnu masu polijetanja od 165 346 lb (75,5 t), A320 ima 171 960 lb (78 t), dok zrakoplov A321 ima maksimalnu masu polijetanja od 206 132 lb (93,5 t). Pošto zrakoplov A321 ima 34 171 lb (15,5 t) veću maksimalnu masu polijetanja naspram zrakoplova A320, zrakoplov A321 mora imati veći potisak tijekom polijetanja.

Ako ta dva zrakoplova imaju mogućnost korištenja istog motora, tada je motor CFM56-5B „presnažan“ za zrakoplov A320. Ako se koristi motor koji može razviti veći potisak nego što je zrakoplovu potrebno, tada takav motor troši više goriva nego što je potrebno. Kako bi se ta situacija izbjegla, proizvođač motora omogućava postavljanje elektronske blokade u računalo pomoću sustava za upravljanje s potpunom digitalnom kontrolom motora (eng. *Full Authority Digital Engine Control* – FADEC), koja smanjuje količinu potisaka koji takav motor može proizvesti. Zbog toga motor CFM56-5B na zrakoplovu A321 ima nominalni potisak od 33 046 lbf (147 kN), dok na zrakoplovu A320 ima 26 977 lbf (120 kN) [11].

Takav sustav omogućava veću fleksibilnost zračnim prijevoznicima koji koriste više zrakoplova obitelji Airbus A320. U rujnu 2019. godine, bilo je 331 različitih zračnih prijevoznika koji u floti koriste zrakoplove iz obitelji Airbus A320 [14]. Uštede koje pruža korištenje smanjenog nominalnog potiska zrakoplova, povećavaju se skupa s povećanjem flote zračnog prijevoznika. To znači da i proizvođač zrakoplova ima koristi od takvog načina korištenja motora, zbog povećane kupovine istog zrakoplova.

Jedan primjer takvog zračnog prijevoznika jest *easyJet*, čija floti ima 318 zrakoplova obitelji Airbus A320. Flota *easyJet*-a sastoji se od 126 zrakoplova tipa Airbus A319, 168 zrakoplova Airbus A320, 20 zrakoplova tipa Airbus A320 s novom opcijom motora (eng. *New Engine Option* - NEO) i 4 zrakoplova Airbus A321NEO [15].

Zrakoplovi iz obitelji Airbus A320 zračnog prijevoznika *easyJet* opremljeni su sa dva mlazna motora tipa CFM LEAP-1A. Za flotu od 318 zrakoplova, *easyJet* minimalno mora imati 636 motora. Svaki od tih 636 mlaznih motora ima vijek trajanja, koji se određuje pomoću temperature ispušnih plinova (eng. *Exhaust Gas Temperature* - EGT). EGT je temperatura ispušnih plinova koja se mjeri na ulazu turbine mlaznog motora. Ako je temperatura viša od temperature propisane od strane proizvođača motora, može doći do toplinske deformacije dijelova motora i uništenja samog motora. To bi rezultiralo velikom materijalnom štetom i povećanom mogućnosti za nesreću zrakoplova. To nije dopustivo, tako da proizvođači motora propisuju EGT sigurnosnu granicu (eng. *EGT Margin*). Sigurnosna granica EGT je razlika između certificirane granične temperature ispušnih plinova motora (eng. *Redline* - RL) i najveće temperature ispušnih plinova tijekom polijetanja (označeno na slici 10. s TO) [16].



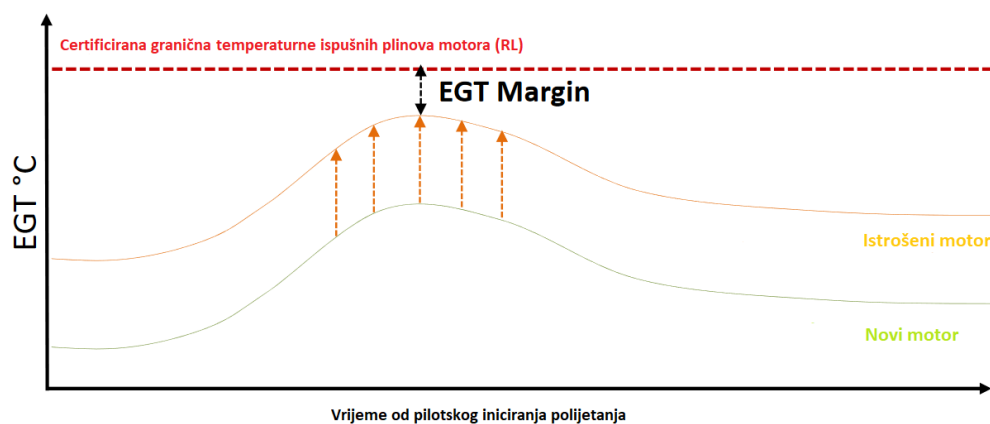
Slika 10. Prikaz EGT sigurnosne granice

Izvor: [16]

Ako je certificirana granična temperatura ispušnih plinova motora 950 °C, a najveća temperatura ispušnih plinova tijekom polijetanja je 850 °C, tada jednadžba za EGT sigurnosnu granicu je [16]:

$$\text{EGT Margin } ^\circ\text{C} = \text{EGT RL} - \text{EGT TO} \Rightarrow \text{EGT Margin } ^\circ\text{C} = 950 \text{ } ^\circ\text{C} - 850 \text{ } ^\circ\text{C} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kao što je prikazano na slici broj 11 EGT sigurnosna granica se smanjuje s korištenjem motora, jer komponente motora postaju istrošenije. Prosječnim korištenjem motora, EGT sigurnosna granica će se smanjiti 21% nakon 10 godina. Smanjenjem EGT granice od 21% izračunato je povećanje cijene korištenja takvog motora za 257 000 dolara godišnje [17].



Slika 11. Odnos EGT sigurnosne granice novog i istrošenog motora

Izvor: [16]

Zračnim prijevoznicima je u interesu imati što manje troškove, a dokazano je da istrošeni motor predstavlja veći trošak. Cilj kompanije je povećati EGT sigurnosnu granicu, a to se može samo na dva načina. Prvi način je kupiti novi motor, što je veoma skupa investicija, a drugi je smanjiti nominalni potisak motora, čime se povećava EGT sigurnosna granica. Pošto zrakoplovu A321 treba punu potisak CFM56-5B motora, kompanije kao što je *easyJet* skida motore s A321 i postavlja te iste motore na zrakoplove tipa A320/A319. Prilikom instalacije motora na A320/A319, stavlja se elektronska blokada u FADEC i tada taj mlazni motor ima smanjeni nominalni potisak, koji je i dalje dovoljan zbog smanjene mase polijetanja.

3.3 Upotreba smanjenog potiska polijetanja

Zrakoplovi su opremljeni motorima koji mogu osigurati dovoljno potiska pri maksimalnoj masi uzlijetanja tog zrakoplova. Ako zrakoplov ima manju masu od maksimalne mase polijetanja, to bi značilo da motori proizvode višak potiska. Primjer jednog takvog leta bio bi let Zagreb-Dubrovnik na kojem *Croatia Airlines* provodi operacije zrakoplovom Airbus A320. Maksimalni kapacitet iskoristivog goriva A320 iznosi 41 281 lb (18,725 t), a masa goriva koju zrakoplov treba imati za taj let na parkirnoj poziciji (eng. *Block Fuel*) je 13 404lb (6,080 t). To bi značilo da A320 na tom letu je lakši za 26 455 lb (12 t), ne uračunavajući putnike ni prtljagu. *Croatia Airlines* u ovom primjeru ima mogućnost smanjiti potisak motora, koji bi zadovoljio polijetanje znatno lakšeg zrakoplova.

Proizvođač zrakoplova tipa Airbus smanjeni potisak polijetanja (eng. *Reduced TakeOff Thrust*) naziva *Flexible takeoff* ili *Flex takeoff*. Taj potisak je definiran preko Flex temperature (T_{FLEX}), koji pilot izračuna ovisno o masi polijetanja zrakoplova i vanjskim uvjetima aerodroma kao što su vanjska temperatura (eng. *Outside Air Temperature* - OAT), vjetar, tlak zraka i drugi. Nakon što izračuna ili iščita T_{FLEX} , pilot tu temperaturu unosi u MCDU pod „*Take off*“ pritiskom na gumb PERF (eng. *Performanse*), pod dijelom „*Flex to Temp*“ kao što je prikazano na slici 12. MCDU će tu informaciju prosljediti FADEC-u, koji će automatski podesiti količinu potiska prilikom polijetanja [1].



Slika 12. Prikaz mjesta unosa T_{FLEX} u MCDU na zrakoplovu Airbus A320

Izvor: [2]

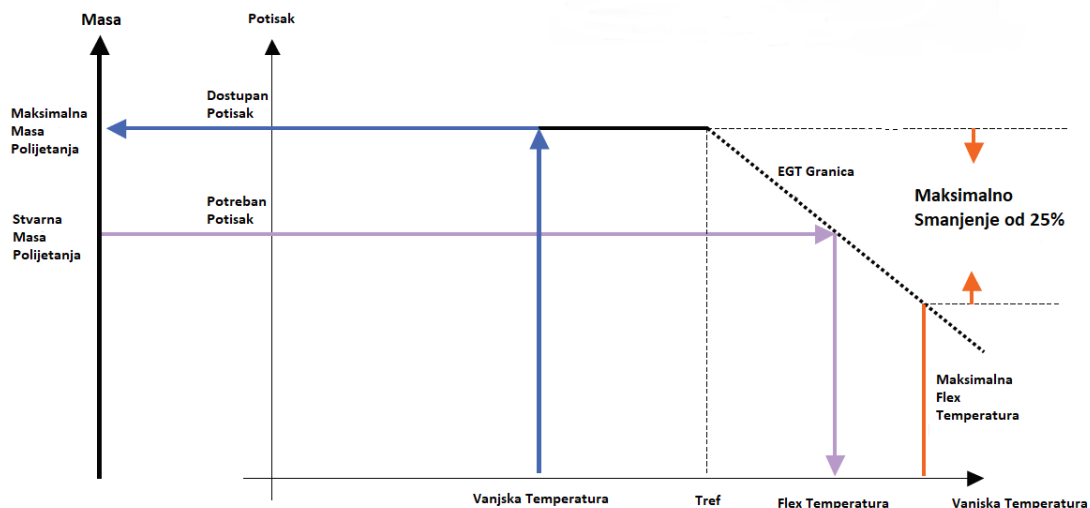
Smanjivanje potiska nije dozvoljeno u svim uvjetima, tako da postoje točno propisani uvjeti o kojima ovisi smije li se smanjiti potisak i za koliko će to smanjenje biti. Potisak se smije smanjiti u uvjetima ako je [1]:

$$T_{FLEX} > T_{REF},$$

$$T_{FLEX} > OAT \text{ i}$$

$$T_{FLEX} \leq T_{FLEXmax}.$$

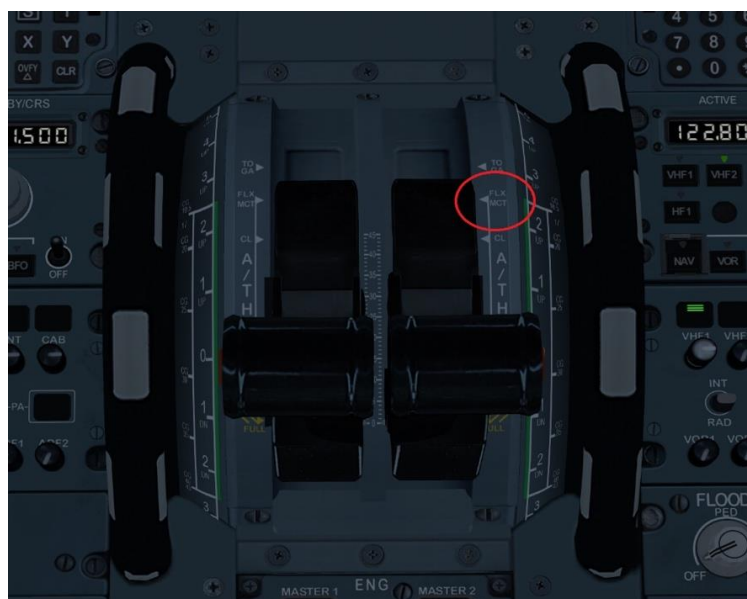
Temperatura T_{REF} je referentna temperatura potiska potrebna za polijetanje s određenog aerodroma i u određenim uvjetima. Smanjenjem potiska se degradiraju performanse zrakoplova, tako da pilot mora provjeriti jesu li sve sigurnosne mjere zadovoljene. Sigurnosne brzine će se povećati jer zrakoplovu treba više vremena da razvije brzinu s manjim potiskom, tako da pilot mora korigirati tu promjenu. Nakon korekcije brzine, piloti moraju uzeti u obzir duljinu i stanje uzletno-sletne staze. Ako su svi uvjeti zadovoljeni, piloti smanjuju potisak do maksimalno 75% maksimalnog potiska [1].



Slika 13. Grafički prikaz izračuna T_{FLEX}

Izvor: [6]

Slika 13 pokazuje grafički prikaz izračunavanja T_{FLEX} temperature. To je graf ovisnosti potiska o vanjskoj temperaturi na koji je nadodana masa zrakoplova. Piloti T_{FLEX} mogu odrediti ručno ili preko računala. Nakon što su piloti dobili T_{FLEX} temperaturu i upisali je u MCDU, sve što pilot treba napraviti tijekom polijetanja, kako bi smanjio potisak, jest staviti poluge potiska (eng. *Thrust Levers*) na „FLX MCT“, kao što je prikazano na slici 14. Računalo zrakoplova će preko toga podesiti potisak motora automatski [1].



Slika 14. Postavke poluge snage na zrakoplovu Airbus A320

Izvor: [2]

3.4 Određivanje smanjenog potiska polijetanja

Temperaturu smanjenog potiska polijetanja T_{FLEX} piloti mogu odrediti ručno, pomoću tablica ili preko računala. U pilotskom priručniku za letenje (eng. *Pilot Operating Handbook – POH*) postoje tablice preko kojih je moguće izračunati ili odrediti T_{FLEX} , ali piloti najčešće koriste vrijednosti izračunate preko računala. Računalo, ako su parametri dobro upisani, imaju puno manju mogućnost za pogrešku, naspram ručnog određivanja pomoću tablica. Uz to, tablice su limitirane na zaokružene vrijednosti vjetra, OAT, mase polijetanja zrakoplova, tlaka zraka i druge, dok se u računalo mogu upisati točni podaci. Korištenje određivanja T_{FLEX} preko računala povećava točnost tijekom izračuna i samim time se smanjuje mogućnost neželjene situacije. Ako pilot želi točno izračunati parametre kao što ih računa računalo, najčešće treba izvršiti interpolaciju, što povećava mogućnost pogreške. Još jedna velika mana tabličnog računanja temperature T_{FLEX} jest ta da svaki aerodrom i svaka uzletno-sletna staza mora imati zasebnu tablicu. Pošto neke posade zrakoplova lete više puta dnevno na različite aerodrome, morali bi imati veliku količinu takvih tablica. To nije niti praktična, niti ekonomski isplativa metoda [1].

Slika 15 prikazuje tablicu preko koje piloti mogu odrediti temperaturu smanjenog potiska polijetanja. Tablica vrijedi u slučajevima kada je tlak zraka 1013 hPa, uzletno-sletna staza je suha, oduzimanje zraka koji se koristi za sustave protiv zaleđivanja i sustave nadtlaćivanja kabine je isključen. U slučaju da ti parametri nisu isti kao što su u tablicu, tada pilot treba uzeti u obzir korekcije za određene parametre koji su prikazani u tablici na slici 16 [18].

Proizvoljno su odabrani parametri za 2 primjera, kako bi se pokazalo određivanje T_{FLEX} ručno, bez upotrebe računala.

1. Primjer:

- karakteristike aerodroma: uzletno-sletna staza: 15L, suha
- konfiguracija pretkrilca/zakrilca: 1+F
- masa polijetanja zrakoplova: 56 t
- vjetar: 10 kt, čeon
- tlak: 1013 hPa
- sustava oduzimanja zraka:

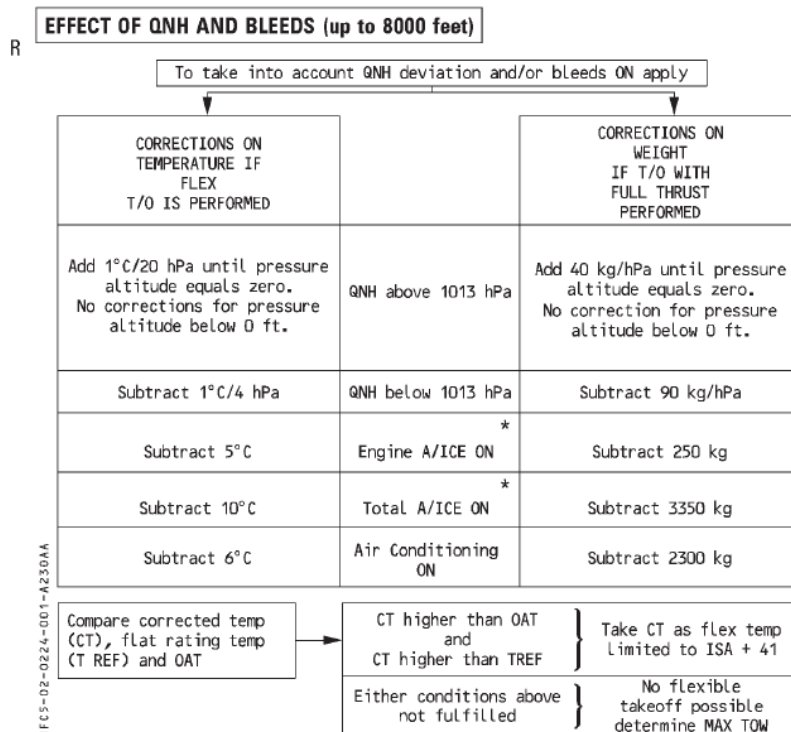
- o sustav za klimatizaciju: isključen
- o sustav protiv zaleđivanja: isključen

Za 1. primjer u tablici je crvenom bojom prikazan postupak dobivanja T_{FLEX} . Postupak se sastoji od očitavanja mase zrakoplova od 56 t i očitavanja čeonog vjetra koji iznosi 10 kt. Rezultat ovog primjera je T_{FLEX} koji iznosi 58°C i brzine od kojih je $V_1=111$ kt, $V_R=121$ kt i $V_2=124$ kt [18].

A319/A320/A321		TAKEOFF				2.02.16	P 6	
CROATIA AIRLINES		GENERAL (WEIGHT ENTRY)				SEQ 105	REV 25	
FLIGHT CREW OPERATING MANUAL								
A319XXX	ENGINES	AIRPORT NAME				VERSION DATE		
QNH	1013.00 HPA	Elevation	489 FT	TORA	3000 M	15L	AXXXXXXX V10	
Air cond.	AC OFF	Isa temp	14 C	TODA	3100 M			
Anti-icing	AI OFF	runway slope	.08 %	ASDA	3000 M	4 obstacles	DRY	
All reversers operating								
No reversers on dry runway								
WEIGHT 1000 KG	CONF 1+F			CONF 2				
	TAILWIND -10 KT	TAILWIND -5 KT	WIND 0 KT	HEADWIND 10 KT	TAILWIND -10 KT	TAILWIND -5 KT	WIND 0 KT	HEADWIND 10 KT
76	6 3/3 .0	25 3/3 .0	37 3/3 .0	38 3/3 .2	0 3/3 .1	18 3/3 .0	35 3/3 .0	37 3/3 .0
	148/52/55	149/53/56	151/54/57	154/57/60	150/53/56	150/54/57	152/56/58	155/58/60
72	40 3/3 .2	42 3/3 .5	44 3/3 .5	48 3/3 .1	40 3/3 .1	42 3/3 .1	43 3/3 .5	44 3/3 .4
	142/46/49	146/49/52	150/52/55	153/54/57	143/47/49	147/50/52	151/53/55	154/56/58
68	48 3/3 .3	50 3/3 .3	52 3/3 .2	53 3/3 .0	48 3/3 .1	49 3/3 .5	51 3/3 .1	51 2/3 .4
	141/43/46	145/47/49	149/50/52	153/53/55	142/44/46	146/48/50	151/52/53	153/54/56
64	56 3/3 .3	58 3/7 .0	58 3/7 .0	58 3/7 .0	56 3/3 .1	57 3/3 .2	57 2/3 .6	57 2/3 .6
	141/42/44	143/44/46	140/44/46	137/44/46	142/43/45	147/47/48	149/50/51	148/50/51
60	58 3/7 .0	* 58 3/7 .0	* 58 2/7 .0	* 58 2/7 .0	58 3/7 .0	* 58 3/7 .0	* 58 2/7 .0	* 58 2/7 .0
	118/30/33	* 113/30/33	* 111/30/33	* 111/30/33	117/30/32	* 113/31/32	* 111/31/32	* 111/31/32
56	58 7/9 .0	* 58 7/9 .0	* 58 7/9 .0	* 58 7/9 .0	58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0
	111/21/24	* 111/21/24	* 111/21/24	* 111/21/24	111/19/21	* 111/19/21	* 111/19/21	* 111/19/21
52	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0
	* 111/19/22	* 111/19/22	* 111/19/22	* 111/19/22	* 111/19/21	* 111/19/22	* 111/19/21	* 111/19/21
48	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	DO NOT USE FOR OPERATIONAL PURPOSE				* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0
	* 111/18/22	* 111/18/22					* 111/19/21	* 111/19/21
46	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0					* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0
	* 111/18/22	* 111/18/22	* 111/18/21	* 111/18/21				
40	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0	* 58 7/7 .0
	* 112/18/22	* 112/17/22	* 112/17/22	* 112/18/21	* 112/18/21	* 112/18/21	* 112/18/21	* 112/18/21
GRAD1/GRAD2 (KG/C)								
	40/****	40/****	40/ 400	40/ 400	40/****	40/****	30/****	30/ 410
INFLUENCE OF RUNWAY CONDITION								
WET	-5/ -2 -9/ -1/ -1 (+58)-5/ -2 -9/ 0/ 0	-5/ -1 -9/ -1/ -1 (+58)-5/ -1 -9/ 0/ 0	-5/ -1 -8/ -1/ -1 (+58)-5/ -1 -8/ 0/ 0	-3/ -1 -6/ 0/ 0 (+58)-3/ -1 -6/ 0/ 0	-7/ -2 -11/ -1/ -1 (+58)-7/ -2 -11/ 0/ 0	-6/ -2 -10/ -1/ -1 (+58)-6/ -2 -10/ 0/ 0	-4/ -1 -7/ 0/ 0 (+58)-4/ -1 -7/ 0/ 0	-1/ -1 -4/ 0/ 0 (+58)-3/ -1 -4/ 0/ 0
INFLUENCE OF DELTA PRESSURE								
D QNH HPA								
-10	-9/ -2 0/ 0/ 0 (+54)-9/ -2 0/ 0/ 0	-5/ -1 0/ 0/ 0 (+54)-5/ -1 0/ 0/ 0	-6/ -2 -1/ -1/ -1 (+54)-6/ -2 -1/ 0/ 0	-5/ -1 -1/ -1/ -1 (+54)-5/ -1 -1/ 0/ 0	-5/ -1 -1/ 0/ 0 (+54)-5/ -1 -1/ 0/ 0	-6/ -2 -2/ -1/ -1 (+54)-6/ -2 -2/ 0/ 0	-6/ -2 -1/ -1/ -1 (+54)-6/ -2 -1/ 0/ 0	-5/ -1 -1/ 0/ 0 (+54)-5/ -1 -1/ 0/ 0
+10	+3/ 0 +1/ +1/ +1 (+58)+3/ 0 +1/ +1/ +1	+2/ 0 +1/ +1/ +1 (+58)+2/ 0 +1/ +1/ +1	0/ 0/ 0 0/ 0/ 0 (+58)0/ 0 0/ 0/ 0	0/ 0/ 0 0/ +1/ +1 (+58)0/ 0 0/ +1/ +1	0/ 0/ 0 +1/ 0 (+58)+1/ 0 0/ 0/ 0	+1/ 0 0/ 0/ 0 (+58)+1/ 0 0/ 0/ 0	+2/ 0 0/ 0/ 0 (+58)+2/ 0 0/ 0/ 0	+2/ 0 0/ 0/ 0 (+58)0/ 0 0/ 0/ 0
LABEL FOR INFLUENCE	OAT C DW CODES		VMC	Tref (OAT) = 36 C	Min acc height 515 FT		Min QNH alt 1011 FT	
DW (1000 KG) DTFLEX	V1min/VRV2 (kt)		LIMITATION	Tmax (OAT) = 54 C	Max acc height 1725 FT		Max QNH alt 2220 FT	
DV1-DVR-DV2 (KT)	LIMITATION CODES :							
(TYMC OAT C)	1=1st segment 2=2nd segment 3=runway length 4=obstacles							
DW (1000 KG) DTFLEX	5=tire speed 6=brake energy 7=mass weight 8=final take-off 9=VMU							
DV1-DVR-DV2 (KT)			Min V1/VR/V2 = 111/16/21 CHECK VMU LIMITATION Correct. V1/VR/V2 = 1.0 KT/1000 KG					

Slika 15. Tablica iz pilotskog priručnika za letenje

Izvor: [18]



Slika 16. Prikaz tablice korekcije vanjskog tlaka i sustava oduzimanja zraka

Izvor: [18]

Slika 16 prikazuje tablice korekcije vanjskog tlaka i sustava oduzimanja zraka i koristi se u slučaju da ulazni parametri odstupaju od onih za koje je tablica na slici 15 izračunata.

2. Primjer:

- karakteristike aerodroma: uzletno-sletna staza: 15L, mokra
- konfiguracija pretkriilca/zakrilca: 2
- masa polijetanja zrakoplova: 62 t
- vjetar: 10 kt, čeoni
- tlak: 1009 hPa
- sustava oduzimanja zraka:
 - sustav za klimatizaciju: uključen
 - sustav protiv zaleđivanja: isključen

Rješenje 2. primjera se ne može iščitati direktno iz tablice nego se mora izvršiti korekcija i interpolacija zadanih parametara u tablici. U tablici je ovaj primjer označen plavom bojom.

Temperaturu T_{FLEX} dobiva se pomoću slijedećeg postupka:

$$64t - 60t = 4t = X$$

$$62t - 60t = 2t = Y$$

$$57^{\circ}\text{C} - 58^{\circ}\text{C} = -1^{\circ}\text{C} = Z$$

$$Y/X * Z + \text{podatak} = 2t/4t * (-1^{\circ}\text{C}) + 58^{\circ}\text{C} = 57,5^{\circ}\text{C}$$

Dobivenu temperaturu se treba korigirati zbog ulaznih parametara koristeći tablicu na slici 16. Korekcija vezana uz tlak zraka je -1°C , korekcija zbog uključenog sustava klimatizacije je -6°C i korekcija zbog mokre uzletno-sletne staze je -1°C .

$$57,5^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C} = 49,5^{\circ}\text{C}$$

Temperatura T_{FLEX} u ovom primjeru iznosi $49,5^{\circ}\text{C}$. Isti postupak se izvodi i kod izračunavanja brzina tijekom polijetanja.

$$148kt - 111kt = 37kt = Z$$

$$Y/X * Z + \text{podatak} = 2t/4t * 37kt + 111 = 129,5kt$$

Brzina V_I iznosi 129,5kt.

$$150kt - 131kt = 19kt = Z$$

$$Y/X * Z + \text{podatak} = 2t/4t * 19kt + 131 = 140kt$$

Brzina V_R iznosi 140kt.

$$151kt - 132kt = 19kt = Z$$

$$Y/X * Z + \text{podatak} = 2t/4t * 19kt + 132 = 141,5kt$$

Brzina V_2 iznosi 141,5kt.

U slučaju da vanjski uvjeti nisu istu kao što su zadani u tablici, pilot mora ručno računati te podatke. Tim ručnim računanjem se drastično povećava vjerojatnost pogreške, tako da taj postupak provodi računalo.

4 Utjecaj smanjenog potiska polijetanja na zrakoplov A320

Korištenje smanjenog potiska polijetanja u zrakoplovnim operacijama je standardan postupak. Dapače, određeni aerodromi novčano potiču zračne prijevoznike da koriste zrakoplove koji manje zagađuju okoliš i proizvode manje buke. Proizvođači zrakoplova kao što su Airbus i Boeing, imaju implementiranu tu tehnologiju u većini zrakoplova. Računalna tehnologija je veoma napredovala u odnosu na računalnu tehnologiju iz 20. stoljeća. Zajedno s njom, napredovala je efikasnost i sigurnost procedura korištenja smanjenog potiska polijetanja. Pozitivni učinci primjene procedura smanjenog potiska su [1]:

1. Smanjenje troškova održavanja zrakoplovnih motora,
2. Povećavanje sigurnosti tijekom leta,
3. Smanjenje buke prilikom polijetanju,
4. Smanjenje količine ispušnih plinova .

Procedura smanjenog potiska polijetanja ne pridonosi smanjenju potrošnje goriva. Zrakoplov će zbog sporijeg penjanja kompenzirati manji protok goriva stvoren smanjenjem potiska na polijetanju. Airbus A320 će, ovisno o konfiguraciji polijetanja, potrošiti od 2,20 lb do 11,02 lb (1-5 kg) goriva više [19].

4.1 Smanjeni troškovi održavanja zrakoplovnih motora

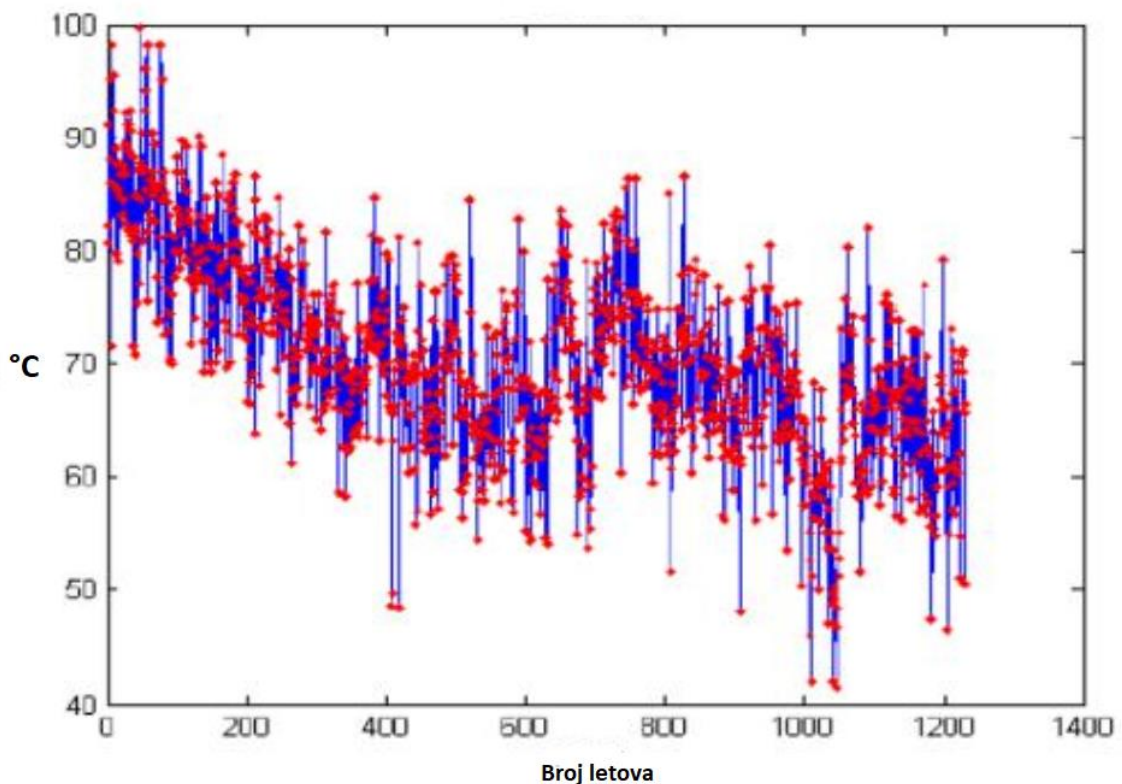
Korištenjem postupaka smanjenja potiska mlaznog motora smanjuje se mehaničko i toplinsko opterećenje motora. Tijekom normalnog rada svi će motori biti izloženi velikom mehaničkom i toplinskom opterećenju, mehaničkom trošenju dijelova motora, nakupljanju nečistoća, usisavanju predmeta i slično. To će rezultirati degradacijom performansi motora tijekom godina korištenja [1].

Dva su tipična pokazatelja performansi motora [1]:

1. Margina temperature ispušnih plinova na turbini
2. Specifična potrošnja goriva

4.1.1 Margina temperature ispušnih plinova na turbini

Kao što je prije navedeno, EGT margina je razlika između certificirane granične temperature ispušnih plinova motora i najveće temperature ispušnih plinova tijekom polijetanja. Temperatura ispušnih plinova se povećava s kontinuiranim korištenjem motora. Ako se aktualna temperatura ispušnih plinova na turbini povećava, to znači da se EGT margina smanjuje, kao što je prikazano na slici 17. Dijagram na slici 17. predstavlja ovisnost smanjenja sigurnosne margine (prikazane u stupnjevima Celzijusa - °C) u ovisnosti o broju letova zrakoplova. S većim smanjenjem sigurnosne margine, troškovi održavanja motora rastu, jer motor mora sve češće odlaziti na održavanje, što povećava troškove zračnog prijevoznika. Prilikom polijetanja mlazni motor proizvodi maksimalni potisak. To bi značilo da je motor najviše mehanički i toplinski opterećen u fazi polijetanja. Kontinuiranim smanjenjem potiska u toj fazi leta, usporava se smanjenje EGT margine. Ako će se smanjit degradacija EGT margine, tada motor rjeđe mora na održavanje, što predstavlja veliku uštedu zračnim prijevoznicima [20].



Slika 17. Degradacija EGT margine s povećanjem broja letova

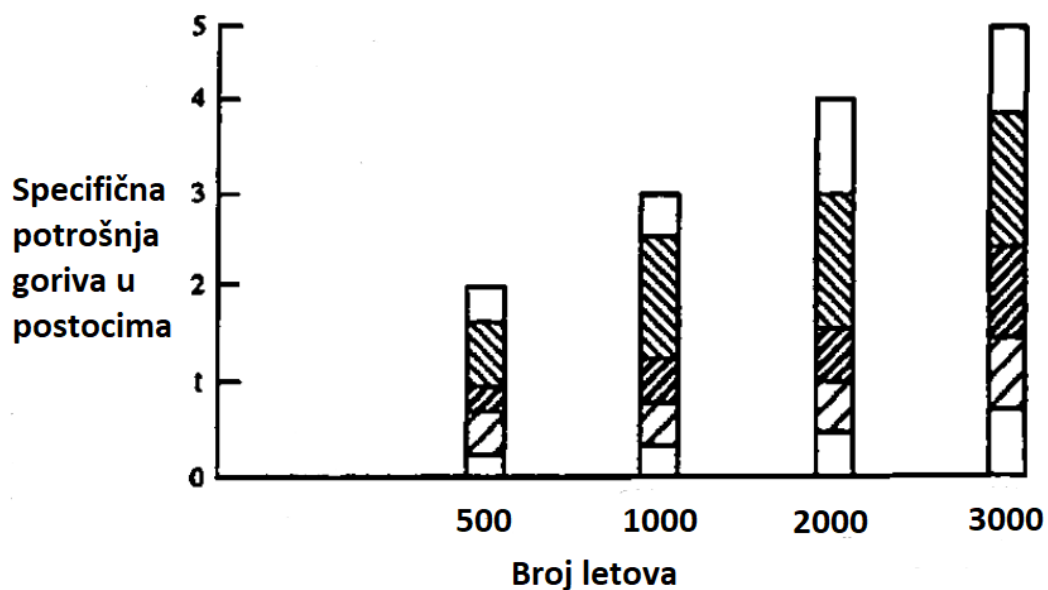
Izvor: [21]

4.1.2 Specifična potrošnja goriva

Kao što je prije navedeno, kontinuiranim korištenjem mlaznog motora, performanse motora postaju degradirane. Rabljeni motor može proizvesti manje potiska nego što bi mogao proizvesti novi motor. To znači da korišteni motor troši više goriva kako bi proizveo istu količinu potiska naspram novog motora za istu tu količinu potiska. Svako povećanje EGT za 10°C povećava specifičnu potrošnju goriva za 0,7% [13].

Specifična potrošnja goriva motora raste s povećanjem broja letova, kao što je prikazano na slici 18. Ako specifična potrošnja goriva raste, tada se smanjuje dolet zrakoplova, a povećava se onečišćenje okoliša ispušnim plinovima motora [20].

Korištenjem postupka smanjenja potiska polijetanja zrakoplova omogućuje se usporavanje degradacije performansi motora. Ako se uspori degradacija performansi motora, tada će se usporiti rast specifične potrošnje goriva tijekom godina, a s time i smanjena emisija ispušnih plinova [20].



Slika 18. Degradacija specifične potrošnje goriva

Izvor: [20]

4.2 Povećana sigurnost tijekom leta

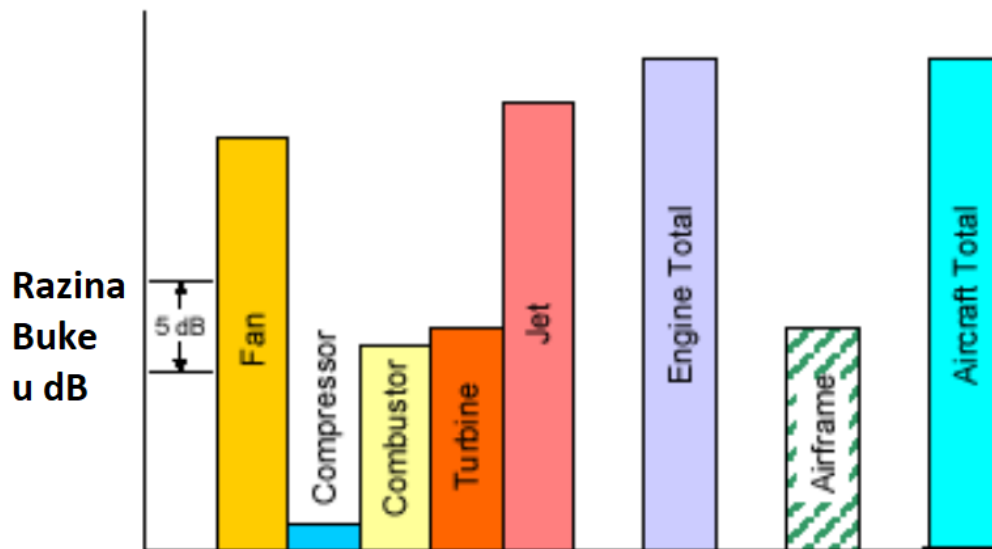
Korištenje smanjenog potiska polijetanja zrakoplova doprinosi sigurnosti zračne plovidbe. Kao što prije već navedeno, procedura smanjenog potiska polijetanja smanjuje toplinsko i mehaničko naprezanje motora. Ako je motor manje opterećen, rizik otkaza motora se smanjuje. U slučaju otkaza jednog motora tijekom polijetanja, u kojem se koristi procedura smanjenog potiska, moment koji je nastao radi nesimetričnosti potiska, manji je od momenta koji bi nastao korištenjem punog potiska. Ako je moment zanošenja manji, tada pilot ima veću upravljivost zrakoplova [1].

4.3 Smanjena buka prilikom polijetanju

Buka u suvremenim zrakoplovnim operacijama predstavlja veoma važan faktor prilikom projektiranja zrakoplova. Sve više aerodroma je okruženo naseljima, tako da upravitelji aerodroma moraju razmišljati o utjecaju aerodroma na lokalno stanovništvo. Buka koju zrakoplov proizvodi sastoji se od buke koju proizvodi zrakoplovni motor i buka koju proizvodi trup zrakoplova zbog svog oblika (eng. *Airframe*) [22].

Buka zrakoplova koju zrakoplov proizvodi zbog oblika je buka koja bi se čula u letu kada motori ne bi radili. Ta buka veoma ovisi o konfiguraciji zrakoplova. Ako zrakoplov ima spuštenu podvozje i zakrilca, buka proizvedena zbog oblika zrakoplova je veća. To je pogotovo izraženo tijekom slijetanja zrakoplova, kada zrakoplov stvara najveći otpor struji zraka, a motori rade pri malom potisku [22].

Neki dijelovi motora proizvode više buke nego drugi. Izmjerene su količine buke proizvedene na lopaticama ventilatora (eng. *Fan*), kompresoru (eng. *Compressor*), komori za izgaranje (eng. *Combustor*), turbini (eng. *Turbine*) i ispuhu motora (eng. *Jet*). Na slici 19 prikazani su odnosi buke koju proizvodi mlazni motor (eng. *Engine Total*) i buke koju proizvodi zrakoplov iz obitelji A320 zbog oblika [22].



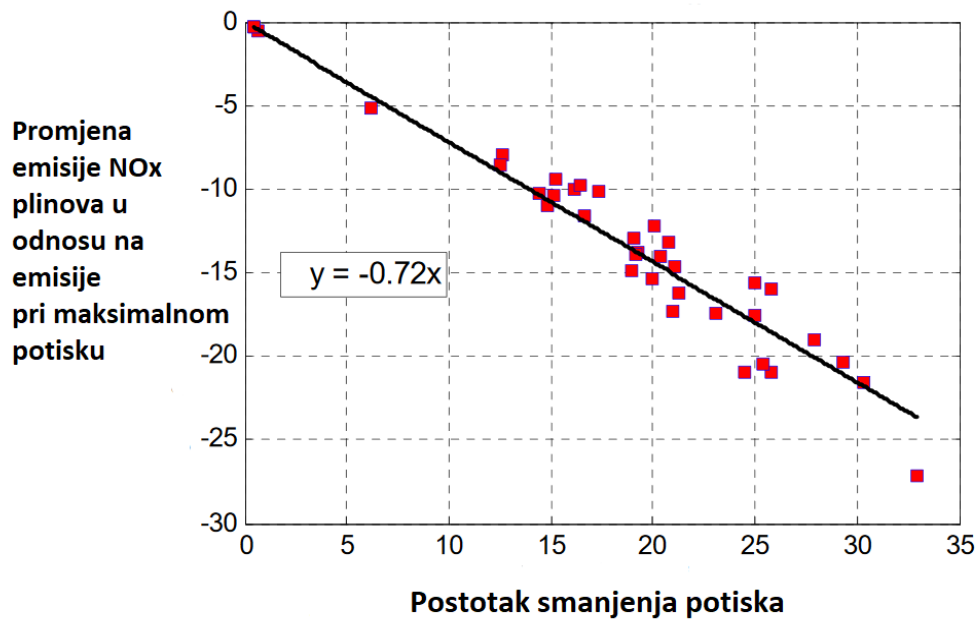
Slika 19. Razine buke različitih dijelova zrakoplova iz obitelji Airbus A320

Izvor: [22]

Zrakoplovni motor tijekom polijetanja proizvodi najveću količinu buke zbog velike postavke potiska za polijetanje. Buka koju mlazni motor proizvodi može se smanjiti smanjenjem potiska. Ako se smanji potisak tijekom polijetanja, tada će se promijeniti oblik obrisa buke koju zrakoplov proizvodi tijekom polijetanja. Smanjuje se buka iza početka uzletno-sletne staze i u njejoj okolini, ali će se povećati buka pri samom penjanju neposredno nakon uzlijetanja. To se događa jer zrakoplovu treba duže da dostigne određenu visinu sa smanjenim potiskom, što rezultira dužim zadržavanjem na manjim visinama [1].

4.4 Smanjena količina ispušnih plinova

Kao produkt izgaranja smjese goriva i zraka u motoru, nastaju plinovi dušikovog oksida (eng. *Nitrogen oxides* - NO_x). Takvi plinovi nisu jedini produkti izgaranja, ali su oni izraženi prilikom polijetanja zrakoplova. NO_x i produkti izgaranja uzrokuju onečišćenje zraka kao što su smog, kisele kiše i stvaranje ozonskih rupa. Takvi plinovi nisu poželjni, tako da se nastoji maksimalno smanjiti njihova emisija u atmosferu [23].



Slika 20. Odnos emisije NO_x plinova u odnosu na postotak smanjenja potiska

Izvor: [24]

Kao što je prikazano na slici 20, smanjenjem potiska linearno se smanjuje emisija ispušnih plinova. Devijacije prikazane na grafu magenta bojom uzrokovane su promjenama kao što su vjetar, temperatura, masa polijetanja i druge. Prosječno smanjenjem potiska polijetanja, rezultirat će smanjenjem emisije NO_x za 14,5% i smanjenje emisije ugljikovog-monoksida za 20% prilikom svakog polijetanja [24]. Maksimalni potisak motora ostvaruje se tijekom polijetanja, tako da u toj fazi leta naviše može primijetiti smanjenje emisije ispušnih plinova.

5 Zaključak

Korištenje smanjenog potiska polijetanja predstavlja uobičajenu proceduru koju primjenjuju zračni prijevoznici kod korištenja zrakoplova, ako to dopuštaju zahtjevi propisani u zrakoplovnim propisima. Zbog složenosti faze polijetanja, postoje brzine preko kojih pilot može bolje donositi odluke u nepredviđenim situacijama. Također, uz te brzine postoje propisani odnosi duljina uzletno-sletnih staza, koje zrakoplov mora zadovoljiti prilikom svakog polijetanja. Prije nego letačka posada zrakoplova odluči smanjiti potisak, moraju se uvjeriti da su propisane duljine uzletno-sletne staze zadovoljene. Ako su duljine zadovoljene i smanji se potisak, letačka posada također mora korigirati sve brzine prilikom polijetanja zrakoplova.

Airbus A320 ima mogućnost smanjenja nominalnog potiska, isto kao što ima mogućnost smanjenja potiska prije polijetanja. Te procedure postaju sve efikasnije zbog implementacije novih tehnologija i procedura. Zračni prijevoznici koji koriste više zrakoplova iz obitelji Airbus A320 imaju mogućnost produljenja životnog vijeka motora, u slučaju da se motoru smanji nominalni potisak i postavi se taj motor na zrakoplov manje poletne mase. Mogućnost smanjenja potiska prilikom polijetanja omogućava zračnim prijevoznicima uštede vezane uz servisiranje motora. Zračni prijevoznici kontinuirano koriste smanjenje nominalnog potiska i/ili smanjenje potiska prilikom polijetanja, što im omogućava velike uštede prilikom održavanja zrakoplova.

U današnjem vrijeme sve više i više se primjećuju posljedice promjene klimatskih uvjeta, tako da zrakoplovi moraju početi sve manje zagađivati okoliš. Smanjenje potiska motora doprinosi zaštiti okoliša jer smanjuje emisije štetnih plinova u atmosferu. Te procedure povećavaju sigurnost i smanjuju utjecaj buke na okoliš.

Popis kratica

MCDU	(Multipurpose Control Display Unit) Višenamjenski upravljački zaslon
V_1	(Decision speed) Brzina odluke
V_R	(Rotate speed) Brzina rotacije
V_{LOF}	(Lift-off speed) Brzina polijetanja
V_2	(Take-off safety speed) Sigurnosna brzina pri polijetanju
PFD	(Primary Flight Display) Primarni prikaznik za letenje
V_{MCG}	(Minimum control speed on ground) Minimalna brzina upravljanja na zemlji
V_{MCA}	(Minimum control speed in the air) Minimalna brzina upravljanja u zraku
V_{MU}	(Minimum unstick speed) Minimalna brzina odlijepljena
V_{MBE}	(Maximum brake energy speed) Maksimalna brzina zrakoplovnih kočnica
TORA	(Take-off Run Available) Raspoloživa duljina za zalet
RWY	(Runway) Uzletno-sletna pista
TODA	(Take-off Distance Available) Raspoloživa duljina za uzlijetanje
CWY	(Clearway) Čistina
ASDA	(Accelerate-Stop Distance Available) Raspoloživa duljina za ubrzavanje i zaustavljanje
SWY	(Stopway) Zaustavna staza
FADEC	(Full Authority Digital Engine Control) Sustav potpuno digitalnog upravljanja motorom
NEO	(New Engine Option) Nova opcija motora
NO_x	(Nitrogen oxides) Dušikov-oksidi

Literatura

- [1] Pavlaković G. Upotreba smanjenog potiska polijetanja u eksploataciji zrakoplova. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2012.
- [2] Lockheed Martin, *Prepar3d simulator*, 2019.
- [3] EASA. *Did You Know about Aircraft Take-off Speeds: V1, Vr and V2?* Preuzeto s: <https://www.baatraining.com/did-you-know-about-aircraft-take-off-speeds-v1-vr-and-v2/> [Pristupljeno: 27. ožujka 2020.]
- [4] Depositphotos. *EuroWings Airbus A320 take-off*. Preuzeto s: <https://depositphotos.com/195240730/stock-photo-eurowings-airbus-a320-take-off.html> [Pristupljeno: 29. ožujka 2020.]
- [4] SKYbrary. *Velocity, Minimum Control (ground) (Vmcg)*. Preuzeto s: [https://www.skybrary.aero/index.php/Velocity, Minimum Control \(ground\) \(Vmcg\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Velocity, Minimum Control (ground) (Vmcg)) [Pristupljeno: 29. ožujka 2020.]
- [6] Airbus. *A318/A319/A320/A321 PERFORMANCE TRAINING MANUAL*. Preuzeto s: https://www.cockpitseeker.com/wp-content/uploads/goodies/ac/a320/pdf/Print_Only/PTM%20with%20airbus%20doc/pdf/UOS2SPO-L.pdf [Pristupljeno: 25. ožujka 2020.]
- [7] SKYbrary. *Velocity, Minimum Control (air) (Vmca)*. Preuzeto s: [https://www.skybrary.aero/index.php/Velocity - Minimum Control \(air\) \(Vmca\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Velocity - Minimum Control (air) (Vmca)) [Pristupljeno: 29. ožujka 2020.]
- [8] Franjković D. ACFTB 7. Airplane Performance, Autorizirana predavanja, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu: 2020.
- [9] Pavlin S. Aerodromi 1. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu; 2006.
- [10] Picuki. *Distances*. Preuzeto s: <https://www.picuki.com/media/2245727635782873949> [Pristupljeno: 26. ožujka 2020.]
- [11] Modern Airlines. *Airbus A320 Specs – What is behind one of the most popular short-haul airlines?* Preuzeto s: <https://modernairliners.com/airbus-a320-introduction/airbus-a320-specs/> [Pristupljeno: 4. travnja 2020.]
- [12] Federal Aviation Administration. *14 CFR Parts Applicable to Engines & Propellers*. Preuzeto s: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/engine_prop/engine_prop_regs/reg/ [Pristupljeno: 10. kolovoza 2020.]
- [13] Bazijanac E. Zrakoplovni mlazni motori, Autorizirana predavanja, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu: 2008.

- [14] PlanespottersNet. *Airbus A320 Family (A318/A319/A320/A321) Operators*. Preuzeto s: <https://www.planespotters.net/operators/Airbus/A320Family?p=&refresh=1> [Pristupljeno: 5. travnja 2020.]
- [15] easyJet. *Our fleet*. Preuzeto s: <http://www.easyjet.com/en/help/boarding-and-flying/our-fleet> [Pristupljeno: 7. travnja 2020.]
- [16] Jackson Square Aviation. *EngineMaintenanceManagement*. Preuzeto s: http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_management_madrid_may-12_2015.pdf [Pristupljeno: 7. travnja 2020.]
- [17] CFM. *EGT margin*. Preuzeto s: http://www.smartcockpit.com/docs/EGT_Margin_by_CFM.pdf [Pristupljeno: 7. travnja 2020.]
- [18] Airbus. *A319/A320/A321 Flight Crew Operation Manual*. Preuzeto s: <https://www.pdfdrive.com/airbus-a318a319a320a321-flight-crew-operating-manual-part-2-flight-preparation-e161214985.html> [Pristupljeno: 7. travnja 2020.]
- [19] Airbus. *Getting to grips with fuel economy*. Preuzeto s: <https://ansperformance.eu/library/airbus-fuel-economy.pdf> [Pristupljeno: 15. ožujka 2020.]
- [20] Airbus. *Getting to grips with A320 family performance retention and fuel savings*. Preuzeto s: <https://www.cockpitseeker.com/wp-content/uploads/goodies/ac/a320/pdf/data/GTGA320PerfoRetentionIssue2.pdf> [Pristupljeno: 15. ožujka 2020.]
- [21] Jurjević I. Utjecaj održavanja na performanse zrakoplova mlaznog motora. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2018.
- [22] Airbus. *Getting to grips with aircraft noise*. Preuzeto s: <http://www.smartcockpit.com/docs/getting-to-grips-to-aircraft-noise.pdf> [Pristupljeno: 10. travnja 2020.]
- [23] Bosch. *Handbook of diesel engines*. Preuzeto s: https://books.google.hr/books?id=1zykqE-UN2QC&lpg=PA446&pg=PA445&redir_esc=y&hl=hr#v=onepage [Pristupljeno: 11. travnja 2020.]
- [24] King D, prof. Waitz I. A. *Assessment of the effects of operational procedures and derated thrust on American Airlines B777 emissions from London's Heathrow and Gatwick airports*. Preuzeto s: <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/drate-rpt.pdf> [Pristupljeno: 10. travnja 2020.]



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada

pod naslovom **UPOTREBA SMANJENOG POTISKA POLIJETANJA**

ZRAKOPLOVA AIRBUS A320

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

Student:

U Zagrebu, _____ 1.9.2020. _____

Živka

(potpis)