

Dr. ERNEST BAZIJANAC  
ANGELA MILANOVIĆ, dipl. inž.  
Fakultet prometnih znanosti  
Zagreb, Vukelićeva 4

Informatika u prometu  
Prethodno priopćenje  
UDK: 629.73.016 : 681.3  
Primljeno: 27. 10. 1993.  
Prihvaćeno: 16. 11. 1993.

# PRORAČUN TEORIJSKIH PERFORMANCI ZRAKOPLOVA S MLAZNIM MOTOROM PODRŽAN RAČUNALOM

## SAŽETAK

U radu se opisuje računalni program za proračun teorijskih performanci zrakoplova.

Osnovna namjena programa je nastavna. Program se temelji na jednostavnom matematičkom modelu, pisan je u Fortran 5.1. i apliciran na PC-u. Rezultati proračuna se prikazuju grafički i tekstualno. Dan je primjer proračuna teorijskih performanci za zrakoplov Cessna Citation 3.

## 1. UVOD

Na Fakultetu prometnih znanosti iz Zagreba, za potrebe nastave na Aeroprometnom smjeru razvijen je računalni program za proračun temeljnih teorijskih performanci zrakoplova s mlaznim motorom [1].

Pokazalo se da rješavanje numeričkih primjera u obliku programskih zadataka u tijeku nastavnog procesa doprinosi boljem razumijevanju teorijskoga gradiva, te omogućuje bolju pripremu studenata za primjenu teorijskih znanja u rješavanju konkretnih praktičnih problema.

Kako je računalo postalo obvezatan alat svakog inženjera zračnog prometa, to se već u tijeku studija student mora priviknuti na njegovo korištenje. Računalni program, koji se ovdje opisuje, studenti koriste za izradbu programskog zadatka iz predmeta Tehnika zračne plovidbe.

Osnovna namjena tog programa bila bi dakle primjena u nastavi, ali se smatra da bi mogao poslužiti i za neke brze usporedne analize performanci zrakoplova u teorijskim analizama.

## 2. MATEMATIČKI MODEL PRORAČUNA

Kao podlogu računalnog programa bilo je potrebno razviti matematički model koji bi zadovoljio dva kriterija:

- da bude relativno jednostavan, odnosno da se u proračunima koriste ona teorijska znanja koja studenti steknu na predavanjima i
- da proračun daje rješenja koja ne odstupaju znatno od realnih performanci za definirane uvjete.

### 2.1. Matematički model performanci mlaznog motora

Potisak ( $T$ ) mlaznog motora u najjednostavnijem se obliku može napisati kao funkcija od visine ( $h$ ), brzine zrakoplova ( $v$ ) i od režima rada motora ( $\Pi$ ) [2]:

$$T = T(h, v, \Pi) \text{ [N]}$$

Specifična potrošnja goriva ( $c_t$ ) također se može predočiti u obliku funkcije:

$$c_t = c_t(h, v, \Pi) \text{ [kg/N s]}$$

Ako se te značajke promatraju pri konstantnoj brzini, dobiva se:

$$1. T = T(h, \Pi)$$

$$2. c_t = c_t(h, \Pi)$$

Sljedeće pretpostavke o promjeni potiska i specifične potrošnje goriva u ovisnosti o visini koristit će se u matematičkom modelu pri proračunu teorijskih performanci zrakoplova:

a) Potisak mlaznog motora je razmjeran količini zraka koja prođe kroz motor. Kako se gustoća zraka mijenja promjenom visine, tako se mijenja i raspoloživi potisak motora, i to prema izrazu:

$$T_h = T_{sl} \cdot \left( \frac{\rho_h}{\rho_{sl}} \right)$$

gdje je:

$T_h$  - potisak na visini  $h$

$T_{sl}$  - potisak na ISA/SL<sup>1</sup> uvjetima

$\rho_h$  - gustoća zraka na visini  $h$

$\rho_{sl}$  - gustoća zraka na ISA/SL uvjetima

b) Specifična potrošnja goriva također ovisi o visini na kojoj motor radi, ali je utjecaj visine na  $c_t$  mali, pa se u ovom modelu pretpostavlja da je  $c_t$  konstantna promjenom visine.

### 2.2 Teorijski profil leta

Proračun se obavlja posebno za svaku fazu leta. Ukupni proces leta obuhvaćen je sljedećim fazama (sl. 1):

1. polijetanje,
2. penjanje,
3. krstarenje,
4. poniranje - planiranje i
5. slijetanje.



Slika 1. Faze leta

Teorijske performanse zadanog zrakoplova računaju se za standardne uvjete na razini mora (tzv. ISA/SL uvjeti) i na određenoj visini leta.

### 2.3. Polazni podaci i pretpostavke

Matematički model proračuna teorijskih performanci polazi od sljedećih podataka koji opisuju osnovne geometrijske i aerodinamičke značajke zrakoplova, te osnovne podatke o pogonskom motoru:

1. potisak motora,  $T$  [N],
2. specifična potrošnja goriva,  $c_t$  [g/kNh],
3. operativna težina zrakoplova,  $G$  [N],
4. kapacitet spremnika za gorivo,  $V_g$  [l],
5. razmak krila od razine PSS-e,  $h_k$  [m],
6. površina krila,  $S$  [m<sup>2</sup>],
7. koeficijent otpora profila,  $c_{x,0}$ ,
8. Oswaldov koeficijent,  $I$ ,
9. visina krila od razine PSS-e,  $h_k$  [m],
10. koeficijent otpora PSS-e pri slijetanju/polijetanju,  $\mu$ ,
11. vrijednost koeficijenta uzgona u konfiguraciji za slijetanje i polijetanje,  $c_{z,max}$ .

Model proračuna se temelji na teorijskim pretpostavkama koje vrijede isključivo za brzine u dozvučnom području.

## 3. STRUKTURA RAČUNALSKOG PROGRAMA

Program je napisan u programskom jeziku MS Fortran 5.1. i primijenjen na PC računalu. Struktura programa je prilagođena za nastavne potrebe. Rezultati proračuna se prikazuju grafički i numerički u tijeku same realizacije programa.

### 3.1. Osnovna struktura programa

Struktura glavnog programa predočena je na slici 2, a uočava se da se u glavnom programu obavlja [4]:

- a) unos ulaznih podataka,
- b) formiranje datoteka ulaznih i izlaznih podataka,
- c) pozivanje potprograma za rad u glavnom programu s pomoću kojih se obavlja proračun i
- d) grafički prikaz rezultata proračuna.

Proračun performanci realizira se s pomoću sljedećih potprograma:

#### SUBROUTINE EES

U ovom potprogramu daje se mogućnost izbora sustava mjernih jedinica SI ili EES.

#### SUBROUTINE GUSTOĆA

Zadatak ovog potprograma je da računa gustoću zraka u ovisnosti o visini  $h$ .

#### SUBROUTINE PRSB

U ovom potprogramu obavlja se proračun za:

- koeficijent uzgona,
- koeficijent otpora,
- finesu,
- potrebnu i raspoloživu potisnu silu i snagu za SL uvjete,
- potrebnu snagu na zadanoj visini  $h$ ,
- brzinu penjanja.

#### SUBROUTINE MBRLSL

Proračun minimalnih i maksimalnih brzina leta za SL uvjete.

#### SUBROUTINE MBLHO

Proračun minimalnih i maksimalnih brzina leta na određenoj visini  $h$ .

#### SUBROUTINE SNAGEH

Proračun potrebnih i raspoloživih snaga i brzine penjanja u ovisnosti o visini  $h$ .

#### SUBROUTINE PLAFL

Proračun "plafona" leta.

#### SUBROUTINE VRIJEME

Zadatak ovog potprograma je da na temelju izračunanih vrijednosti brzine penjanja u subroutine plafi odredi vrijeme penjanja zrakoplova do plafona leta.

#### SUBROUTINE DOLISTR

U ovom potprogramu obavlja se proračun za dolet i istrajnost.

#### SUBROUTINE MKPIDRP

Proračun vrijednosti minimalnoga kuta planiranja i doleta u režimu planiranja.

#### SUBROUTINE BPOLDPSS

Ovaj potprogram računa:

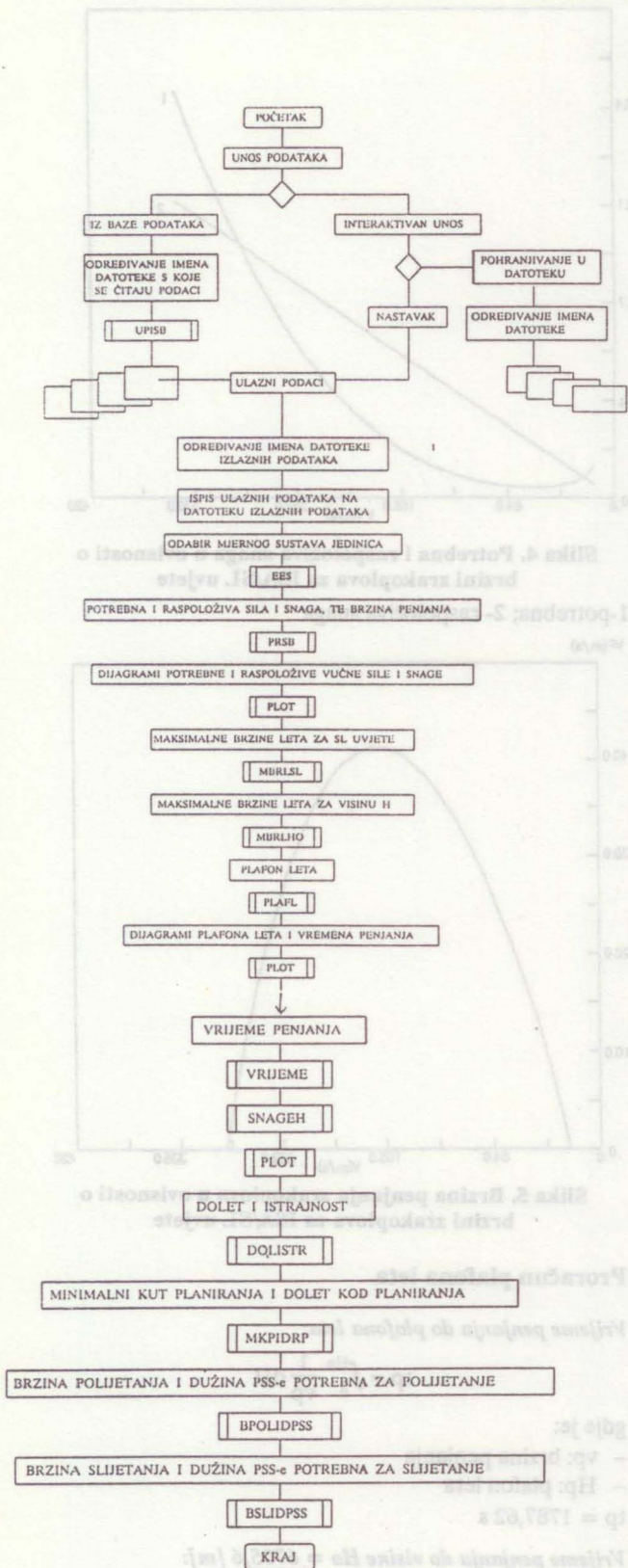
- brzinu polijetanja,
- srednju vrijednost brzine u polijetanju i
- duljinu PSS.

#### SUBROUTINE BSLIDPSS

Ovaj potprogram računa:

- brzinu slijetanja,
- srednju vrijednost brzine slijetanja i
- potrebnu duljinu PSS za slijetanje.

Ulazni podaci čine skupinu podataka koja sadrži referentne parametre znakovite za određeni tip zrakoplova iz točke 2.3.



Slika 2. Osnovna struktura programa

Pri unosu podataka obavlja se izbor načina unosa.

Ulazni podaci unose se:

1. interaktivno, preko tastature;
  2. iz baze podataka, koja je prethodno formirana.
- Formiranje datoteke ulaznih podataka moguće je nakon interaktivnog unosa ulaznih podataka. Nakon izbora imena željene datoteke na nju se pospremaju podaci unijeti interaktivno.

#### 4. REALIZACIJA PROGRAMA

Ulazni podaci na temelju kojih je obavljena verifikacija programa uzeti su iz [1].

Zrakoplov s mlaznim motorom, prema kojemu su usvajani ulazni podaci za proračun teorijskih performanci zrakoplova je Cessna Citation 3, koja je određena sljedećim referentnim parametrima:

- razmak krila: 16,25 [m]
- nosiva površina: 29,54 [m<sup>2</sup>]
- operativna težina: 88141,50 [N]
- kapacitet spremnika za gorivo: 5087,10 [l]
- potisak jednog motora: 16236,00 [N]
- specifična potrošnja goriva: 0,6 [g/kNh]
- koeficijent otpora profila: 0,02
- Oswaldov koeficijent: 0,81
- broj motora zrakoplova: 2
- visina krila od razine PSS: 1,83 [m]
- koeficijent otpora trenja PSS pri polijetanju: 0,02
- koeficijent otpora trenja PSS pri slijetanju: 0,4
- vrijednost koeficijenta uzgona u konfiguraciji za polijetanje: 1,00
- vrijednost koeficijenta uzgona u konfiguraciji za slijetanje: 2,50

Nakon obrade ulaznih podataka dobiju se izlazni podaci u grafičkom, tekstualnom i numeričkom obliku. Za ilustraciju izlaznih formata proračuna, uz pomoć ovog programa, daju se samo neki izlazni rezultati:

#### Rezultati proračuna

##### Proračun potrebnih i raspoloživih sila i snaga motora, te brzina penjanja zrakoplova

Vrijednosti dobivene proračunom za ISA/SL uvjete su (tabl. 1):

- $c_z$ : koeficijent uzgona,
- $c_x$ : koeficijent otpora,
- $F$ : finesa,
- $T_p$ : potrebna sila potiska,
- $T_R$ : raspoloživa sila potiska,
- $P_p$ : potrebna snaga i
- $P_R$ : raspoloživa snaga.

Vrijednosti dobivene proračunom grafički su predočene u obliku dijagrama na slikama 3. i 4.

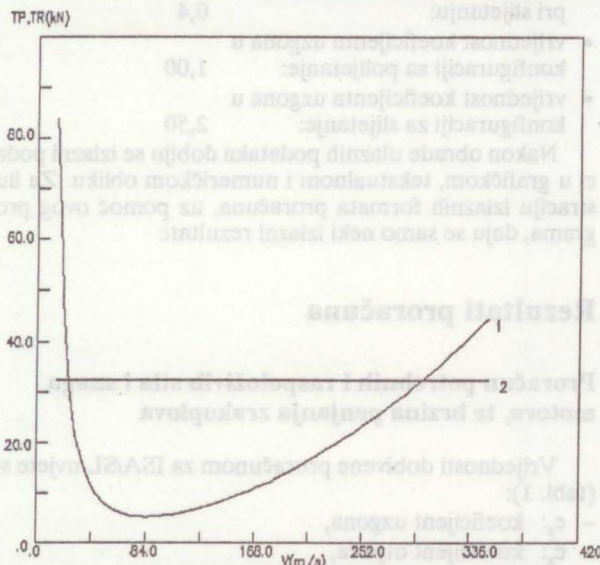
**Maksimalne i minimalne brzine leta zrakoplova za ISA/SL uvjete:**

$$V1(\max) = 298,58 \text{ [m/s]}$$

$$V2(\min) = 24,19 \text{ [m/s]}$$

Tablica 1.

V [m/s]	Cz	Cx	F	TP [N]	Pp [W]
15.0	21.6512	20.6278	1.0496	83975.37	1259631
30.0	5.4128	1.3080	4.1383	21299.17	638975
45.0	2.4057	.2744	8.7665	10054.33	452444
60.0	1.3532	.1005	13.4648	6546.09	392765
75.0	.8660	.0530	16.3490	5391.25	404343
90.0	.6014	.0359	16.7522	5261.49	473534
105.0	.4419	.0286	15.4589	5701.68	598676
120.0	.3383	.0250	13.5151	6521.70	782603
135.0	.2673	.0231	11.5509	7630.72	1030147
150.0	.2165	.0221	9.8143	8980.90	1347135
165.0	.1789	.0214	8.3585	10545.11	1739944
180.0	.1504	.0210	7.1619	12307.02	2215264
195.0	.1281	.0207	6.1826	14256.33	2779984
210.0	.1105	.0205	5.3790	16386.28	3441118
225.0	.0962	.0204	4.7154	18692.28	4205763
240.0	.0846	.0203	4.1633	21171.13	5081073
255.0	.0749	.0202	3.7002	23820.56	6074244
270.0	.0668	.0202	3.3088	26638.89	7192501
285.0	.0600	.0202	2.9753	29624.88	8443090
300.0	.0541	.0201	2.6891	32777.59	9833276
315.0	.0491	.0201	2.4418	36096.29	11370330
330.0	.0447	.0201	2.2269	39580.44	13061540
345.0	.0409	.0201	2.0389	43229.57	14914200



Slika 3. Potrebna i raspoloživa sila potiska u ovisnosti o brzini zrakoplova za ISA/SL uvjete

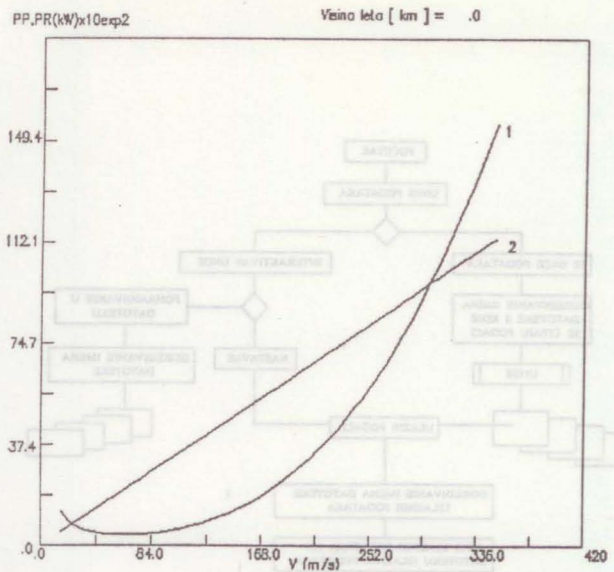
1-potrebna; 2- raspoloživa sila

Maksimalne i minimalne brzine leta zrakoplova na visini

$H_o = 6705,6 [m]$ :

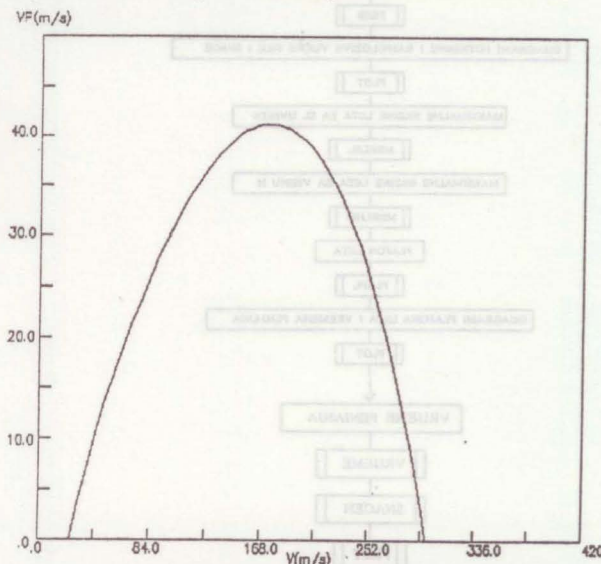
$V1(max) = 295,50 [m/s]$

$V2(min) = 49,14 [m/s]$



Slika 4. Potrebna i raspoloživa snaga u ovisnosti o brzini zrakoplova za ISA/SL uvjete

1-potrebna; 2- raspoloživa snaga



Slika 5. Brzina penjanja zrakoplova u ovisnosti o brzini zrakoplova za ISA/SL uvjete

Proračun plafona leta

Vrijeme penjanja do plafona leta:

$$tp = \int_0^{H_p} \frac{1}{vp} dH$$

gdje je:

- vp: brzina penjanja
- Hp: plafon leta

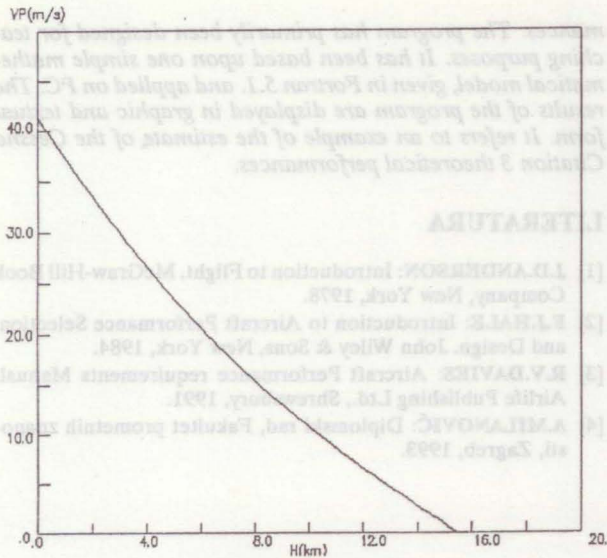
$tp = 1787,62 s$

Vrijeme penjanja do visine  $H_o = 6705,6 [m]$ :

$tp = 194,02 s$

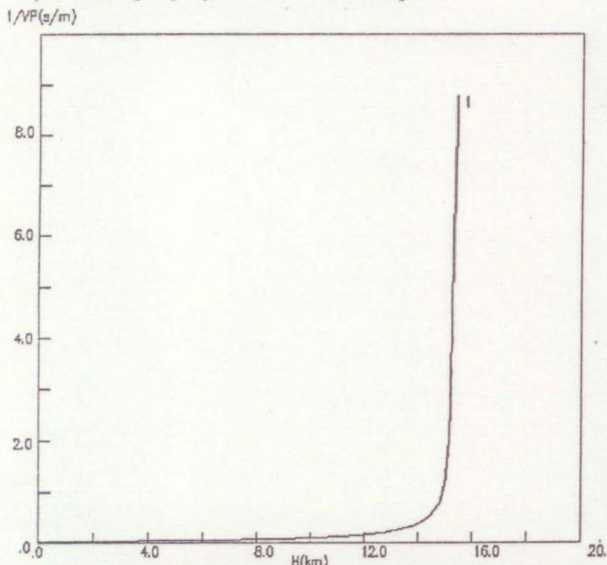
Proračun doleta i istrajnosti

Vrijednosti dobivene proračunom su:



Slika 6. Plafon leta

$v_p$  - brzina penjanja;  $v$  - brzina zrakoplova



Slika 7. Dijagram za proračun vremena penjanja zrakoplova

- L, dolet
  - I, istrajnost
- $L = 5817157,0$  [m]
- $I = 47522,510$  [s]

#### Kut poniranja i dolet u režimu planiranja

Visina početka planiranja:

$H_d = 3048,00$  [m]

Vrijednosti dobivene proračunom su:

- $F_i$ , kut poniranja
  - $L_{max}$ , dolet u režimu planiranja
- $F_i = 3,3939$  stupnjeva
- $L_{max} = 51396,73$  [m]

#### Polijetanje

Vrijednosti dobivene proračunom imaju oznake:

- $M_{ip}$ , koeficijent otpora trenja pri polijetanju
- $H_k$ , visina krila od razine PSS
- $V_{pol}$ , brzina polijetanja
- $V_{sr1}$ , srednja brzina
- $N_i$ , tzv. 'ground effect' pri polijetanju
- $R_z$ , sila uzgona
- $R_x$ , sila otpora
- $D_{1pss}$ , potrebna duljina PSS za polijetanje

$M_{ip} = 0,02$

$H_k = 1,83$  [m]

$V_{pol} = 83,76$  [m/s]

$V_{sr1} = 58,63$  [m/s]

$N_i = 0,76$

$R_z = 62192,64$  [N]

$R_x = 3334,10$  [N]

$D_{1pss} = 1101,17$  [m]

#### Slijetanje

Vrijednosti dobivene proračunom imaju sljedeće oznake:

- $M_{is}$ , koeficijent otpora trenja pri slijetanju
- $V_{sl}$ , brzina slijetanja
- $V_{sr2}$ , srednja brzina
- $R_x$ , sila otpora
- $D_{2pss}$ , potrebna duljina PSS za polijetanje

$M_{is} = 0,40$

$V_{sl} = 45,37$  [m/s]

$V_{sr2} = 31,76$  [m/s]

$R_x = 401,56$  [N]

$D_{2pss} = 257,64$  [m]

### 5. ZAKLJUČAK

U skladu s postavljenim ciljevima razrađen je jednostavan matematički model proračuna teorijskih performanci zrakoplova s mlaznim motorom.

Model obuhvaća proračun sljedećih performanci:

- bilanca potisnih sila,
- bilanca snaga,
- performance zrakoplova pri polijetanju (brzina polijetanja, potrebna duljina poletno-slijetne staze za polijetanje, vrijednosti sila koje djeluju na zrakoplov pri polijetanju),
- performance zrakoplova pri penjanju (brzina penjanja),
- plafon leta (visina plafona leta i vrijeme penjanja do plafona leta),
- dolet i istrajnost,
- performance zrakoplova pri poniranju (kut poniranja i dolet u režimu planiranja),
- performance zrakoplova pri slijetanju (brzina slijetanja, potrebna duljina poletno-slijetne staze za slijetanje, vrijednosti sila koje djeluju na zrakoplov pri slijetanju).

Na temelju razrađenoga matematičkog modela razvijen je program za proračun u Fortranu 77 i apliciran na PC-u.

Potrebni podaci unose se interaktivno ili iz postojeće baze podataka. Izlazni podaci prikazani su u datoteci izlaznih podataka u tabličnom obliku i grafički obrađeni u obliku dijagrama.

Program je verificiran na osnovi podataka za zrakoplov s mlaznim motorom Cessna Citation 3, a prema [1].

Programska podrška omogućuje brzu i djelotvornu obradu podataka, što pruža mogućnost primjene u nastavi, a može poslužiti i za brze, usporedne analize performanci zrakoplova s mlaznim motorom u nekim praktičnim zadacima.

**SUMMARY**

**COMPUTER-AIDED ESTIMATE OF JET AIRCRAFT THEORETICAL PERFORMANCES**

The paper deals with the description of a computer program designed for the estimate of aircraft theoretical perfor-

mances. The program has primarily been designed for teaching purposes. It has been based upon one simple mathematical model, given in Fortran 5.1. and applied on PC. The results of the program are displayed in graphic and textual form. It refers to an example of the estimate of the Cessna Citation 3 theoretical performances.

**LITERATURA**

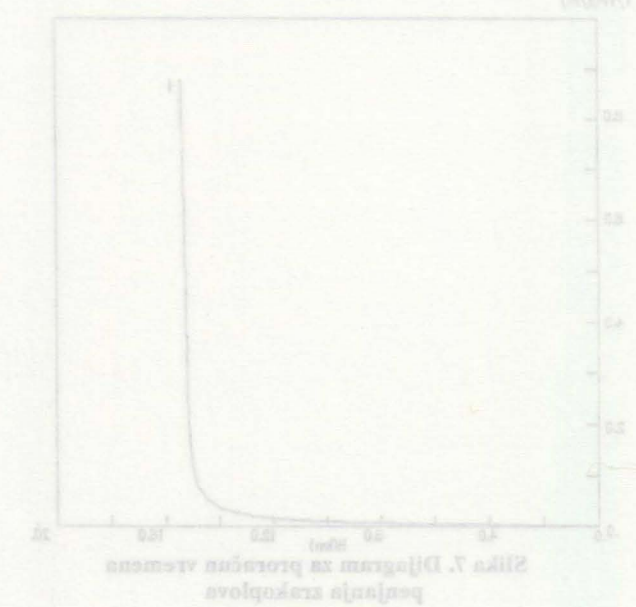
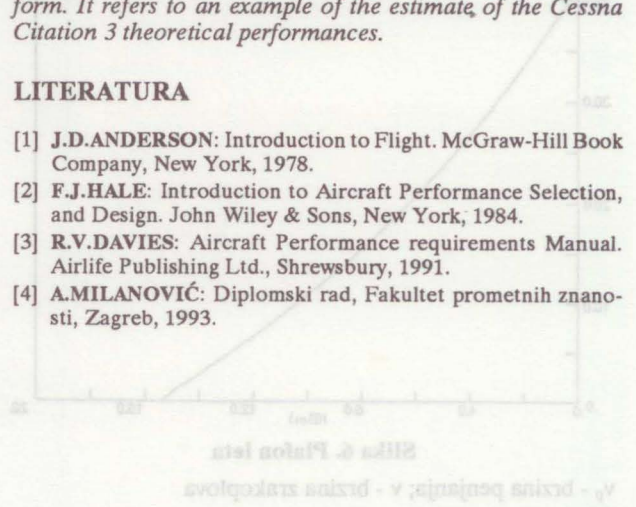
- [1] J.D.ANDERSON: Introduction to Flight. McGraw-Hill Book Company, New York, 1978.
- [2] F.J.HALE: Introduction to Aircraft Performance Selection, and Design. John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [3] R.V.DAVIES: Aircraft Performance requirements Manual. Airline Publishing Ltd., Shrewsbury, 1991.
- [4] A.MILANOVIĆ: Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1993.

**ZAKLJUČAK**

U skladu s postavljanim ciljevima razraden je jednostavan matematički model proračuna teorijskih performanci zrakoplova s mlaznim motorom. Model omogućava proračun sljedećih performanci:

- brzina polarnih sila,
- brzina snage,
- performancije zrakoplova pri poljetanju (brzina poljetanja, potrebna duljina poljetno-sijetne staze za poljetanje, vrijednosti sila koje djeluju na zrakoplov pri poljetanju),
- performancije zrakoplova pri penjanju (brzina penjanja, brzina leta (vrijeme planiranja leta i vrijeme penjanja do planiranja leta),
- dolet i istajnost,
- performancije zrakoplova pri poniranju (brzina poniranja, dolet u režimu planiranja),
- performancije zrakoplova pri slijetanju (brzina slijetanja, potrebna duljina poljetno-sijetne staze za slijetanje, vrijednosti sila koje djeluju na zrakoplov pri slijetanju).

Na temelju razradenog matematičkog modela razvijena je program za proračun u Fortranu V7 i aplikiran na PC-u.



Kat poniranja i dolet u režimu planiranja

Vrijeme početka planiranja:  $H_0 = 3048,00$  [m]

Vrijednosti dobivene proračunom su:

- $P_1$ , kat poniranja
- $L_{max}$ , dolet u režimu planiranja
- $P_2 = 3393$  stupnjeva
- $L_{max} = 2139,673$  [m]
- $I = 47325,210$  [s]
- $J = 581717,0$  [m]
- $I$ , istajnost
- $I$ , dolet