

# Određivanje točnosti mentalnih proračuna navigacijskih podataka za pripremu i provedbu leta

---

Radulović, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:371421>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-25**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Luka Radulović**

**ODREĐIVANJE TOČNOSTI MENTALNIH PRORAČUNA**  
**NAVIGACIJSKIH PODATAKA ZA PRIPREMU I PROVEDBU**  
**LETA**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, 2021.**

Zagreb, 11. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovna navigacija I**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 6383**

Pristupnik: **Luka Radulović (0135255270)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Pilot**  
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Određivanje točnosti mentalnih proračuna navigacijskih podataka za pripremu i provedbu leta**

### **Opis zadatka:**

Stupanjem na snagu nove regulative Part-FCL Subject Area 100 - Knowledge, Skill and Attitude pokazala se potreba povećati kompetencije pilota za provođenje mentalnih proračuna u pripremi i provedbi leta. U ovom je radu potrebno prikupiti postojeće metode mentalnih proračuna vezane uz provedbu navigacije u letu te za iste odrediti točnost u usporedbi s egzaktnim proračunima. Metode je potrebno usporediti po točnosti ali i po jednostavnosti upotrebe. Prikupljanje metoda potrebno je provesti ne samo iz udžbenika, priručnika i regulative već i iz neformalnih komunikacija s pilotima.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**ZAVRŠNI RAD**

**ODREĐIVANJE TOČNOSTI MENTALNIH PRORAČUNA  
NAVIGACIJSKIH PODATAKA ZA PRIPREMU I PROVEDBU  
LETA**

**ACCURACY OF MENTAL CALCULATIONS OF NAVIGATION  
DATA USED FOR PREPARATION AND EXECUTION OF A  
FLIGHT**

Mentor: dr. sc. Tomislav Radišić

Student: Luka Radulović

JMBAG: 0135255270

Zagreb, rujan 2021.

## SAŽETAK

Stupanjem na snagu nove regulative Part-FCL *Subject Area 100 - Knowledge, Skill and Attitude* pokazala se potreba povećati kompetencije pilota za provođenje mentalnih proračuna u pripremi i provedbi leta. U ovom su radu prikupljene metode mentalnih proračuna vezane uz provedbu navigacije u letu te je za iste određena točnost u usporedbi s egzaktnim proračunima. Metode su uspoređene po točnosti na temelju odstupanja od stvarnih izračunatih vrijednosti, ali i po jednostavnosti na temelju vremena potrebnog da se provede mentalni proračun.

**KLJUČNE RIJEČI:** mentalni proračuni, metode procjene vrijednosti, točnost, priprema navigacijskog leta, provedba navigacijskog leta

## SUMMARY

The introduction of the new regulation Part-FCL Subject Area 100 - Knowledge, Skill and Attitude has shown the need to increase the competence of pilots to conduct mental calculations in the preparation and execution of the flight. In this paper, the methods of mental calculations related to the execution of in - flight navigation are collected, and the accuracy is determined by comparing them to exact calculations. The methods are compared in accuracy based on deviations from the actual calculated values, but also in simplicity based on the time required to perform a mental calculation.

**KEY WORDS:** mental calculations, methods of estimation of values, accuracy, preparation of a navigation flight, execution of a navigation flight

# SADRŽAJ

|       |                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Uvod .....                                                                      | 1  |
| 2     | Regulatorni zahtjevi povezani s mentalnim proračunima .....                     | 3  |
| 3     | Procjena i računanje vrijednosti udaljenosti, visine, vremena i brzine .....    | 4  |
| 3.1   | Pravilo 1:60 .....                                                              | 4  |
| 3.2   | Procjena i računanje vrijednosti visine .....                                   | 7  |
| 3.2.1 | Procjena početne visine spuštanja.....                                          | 7  |
| 3.2.2 | Visina iznad DME sredstva .....                                                 | 11 |
| 3.3   | Procjena i računanje vrijednosti brzine .....                                   | 12 |
| 3.3.1 | Vrste brzina i njihov međusobni odnos .....                                     | 13 |
| 3.3.2 | Metoda procjene vertikalne brzine silaženja u odnosu na putnu brzinu .....      | 17 |
| 3.4   | Odnos brzine, udaljenosti i vremena .....                                       | 21 |
| 3.4.1 | Metoda procjene vrijednosti udaljenosti i vremena uz pomoć faktora brzine ..... | 22 |
| 3.4.2 | Određivanje putne brzine pomoću DME sredstva.....                               | 26 |
| 3.5   | Usporedba metoda po točnosti .....                                              | 27 |
| 4     | Preračunavanje mjernih jedinica .....                                           | 29 |
| 4.1   | Mjerne jedinice udaljenosti i visine .....                                      | 29 |
| 4.2   | Tlak i temperatura zraka .....                                                  | 34 |
| 4.2.1 | Metoda procjene promjene visine s tlakom .....                                  | 35 |
| 4.2.2 | Preračunavanje mjernih jedinica postavke tlaka .....                            | 39 |
| 4.2.3 | Preračunavanje mjernih jedinica temperature.....                                | 40 |
| 4.3   | Proračuni vezani uz gorivo .....                                                | 42 |
| 4.4   | Usporedba metoda po točnosti .....                                              | 45 |
| 5     | Proračuni u sklopu pripreme navigacijskog leta .....                            | 46 |
| 5.1   | Određivanje pozicije zrakoplova .....                                           | 47 |
| 5.1.1 | Precizni proračuni rješavanja navigacijskog trokuta.....                        | 50 |
| 5.1.2 | Računanje pozicije zrakoplova napamet.....                                      | 54 |
| 5.2   | Navigacijski plan leta.....                                                     | 56 |
| 6     | Proračuni u sklopu provedbe navigacijskog leta.....                             | 60 |
| 6.1   | Postupci kontrole po pravcu .....                                               | 60 |
| 6.2   | Metoda procjene bočnog skretanja.....                                           | 60 |
| 6.3   | Izravni dolet na orijentir.....                                                 | 63 |
| 6.4   | Jednostavnost korištenja metoda procjene u letu .....                           | 64 |

|   |                      |    |
|---|----------------------|----|
| 7 | Zaključak.....       | 67 |
|   | Literatura .....     | 68 |
|   | Popis slika.....     | 72 |
|   | Popis tablica .....  | 73 |
|   | Popis grafikona..... | 74 |

# 1 Uvod

Priprema i provedba navigacijskog leta sadrži mnogo proračuna koje pilot mora znati izvršiti. Međutim, ponekad su ti računi komplicirani i teško izvedivi bez opreme za računanje. Pojednostavljenjem kompleksnijih i prije svega dužih matematičkih računa u pripremi i provedbi leta krati se vrijeme potrebno za samo računanje, no istovremeno se gubi na točnosti dobivenih vrijednosti. Cilj je stoga postići što kraće vrijeme proračuna određenih vrijednosti, pritom održavajući razinu točnosti koja neće ugroziti sigurnost leta. Tako su nastale razne metode mentalnih proračuna koje se koriste u letenju. Neke od njih opisane su u ovom radu te su istovremeno ispitane na temelju točnosti i jednostavnosti. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

- 1. Uvod
- 2. Regulatorni zahtjevi povezani s mentalnim proračunima
- 3. Procjena i računanje vrijednosti udaljenosti, visine, vremena i brzine
- 4. Preračunavanje mjernih jedinica
- 5. Proračuni u sklopu pripreme navigacijskog leta
- 6. Proračuni u sklopu provedbe navigacijskog leta
- 7. Zaključak

U drugom poglavlju su navedeni i opisani regulatorni zahtjevi povezani s mentalnim proračunima, te su navedeni regulativom propisani proračuni kojima piloti moraju ovladati kako bi stekli pravo na komercijalnu pilotsku dozvolu.

U trećem poglavlju navedeni su i opisani mentalni proračuni vezani za procjenu i računanje vrijednosti udaljenosti, visine, vremena i visine. Mentalni proračuni koji služe za procjenu spomenutih vrijednosti navedeni su jedan po jedan, a prilikom navođenja i opisivanja svakog proračuna također je i napravljena usporedba metode procjene vrijednosti u odnosu na stvarnu vrijednost dobivenu točnim matematičkim proračunom, često uz pomoć kalkulatora. Time je prikazana svojevrsna točnost svakog pojedinačnog mentalnog proračuna procjene.



U četvrtom poglavlju navedene su mjerne jedinice za neke od često korištenih veličina u zrakoplovstvu. Nadalje su opisane metode mentalnih proračuna preračunavanje između tih jedinica te su metode uspoređene sa stvarnim vrijednostima na temelju točnosti.

U petom poglavlju opisani su i provedeni mentalni proračuni relevantni za pripremu navigacijskog leta. Uz već prije navedene proračune, obrađene su i druge kalkulacije vezane uz let zrakoplova u uvjetima s vjetrom.

U šestom poglavlju naglašeno je određivanje pozicije zrakoplova mentalnim putem te su opisani postupci računanja skretanja zrakoplova u prostoru i doleta zrakoplova na orijentir napamet.

## 2 Regulatorni zahtjevi povezani s mentalnim proračunima

U sklopu teoretskog školovanja za komercijalnu pilotsku dozvolu, kandidat mora ispunjavati određene uvjete, propisane Annexom I (Part-FCL) [1]. Nakon završetka obuke, studenti piloti trebali bi biti sposobni razumjeti i primijeniti predmetno znanje kako bi mogli učinkovito prepoznati i upravljati prijetnjama i pogreškama i udovoljavati standardu Area 100 KSA. Kratica KSA stoji za *Knowledge, Skills and Attitudes*, odnosno Znanje, Vještine i Stavovi. *Learning objectives*, odnosno ciljevi učenja, usmjereni su definiranju znanja teorijskog gradiva koje je student asimilirao tijekom školovanja. Ciljevi učenja predmeta 100 KSA podijeljeni su na četiri dijela, a u četvrtom su navedeni mentalni proračuni, pod nazivom 100 04 *MENTAL MATHS*. U sklopu tih ciljeva učenja istaknuti su proračuni koje pojedinac mora znati riješiti u scenariju testa, bez kalkulatora, što vremenski efikasnije i što točnije, a to su sljedeći [2]:

- Preračunavanje između volumena i masa goriva koristeći raspon mjernih jedinica
- Procjena vremena, udaljenosti i brzine
- Procjena stope penjanja ili stope spuštanja, udaljenosti i vremena
- Zbrajanje ili oduzimanje vremena, udaljenosti i mase goriva
- Izračun sagorijevanja goriva s obzirom na vrijeme i protok goriva
- Izračun dostupnog vremena (za donošenje odluka) s obzirom na relevantne informacije o gorivu
- Određivanje vrha spuštanja jednostavnom metodom koju opisuje odobrena organizacija za obuku (ATO)
- Određivanje vrijednosti koje se razlikuju u postotcima, npr. sagorijevanje goriva i omjer suhe i mokre duljine za slijetanje
- Procjena visine na udaljenostima na prilazu kuta od 3 stupnja
- Procjena pravaca leta koristeći pravilo 1:60
- Procjena komponenata čeonog i bočnog vjetra s obzirom na brzinu i smjer vjetra i pistu u uporabi

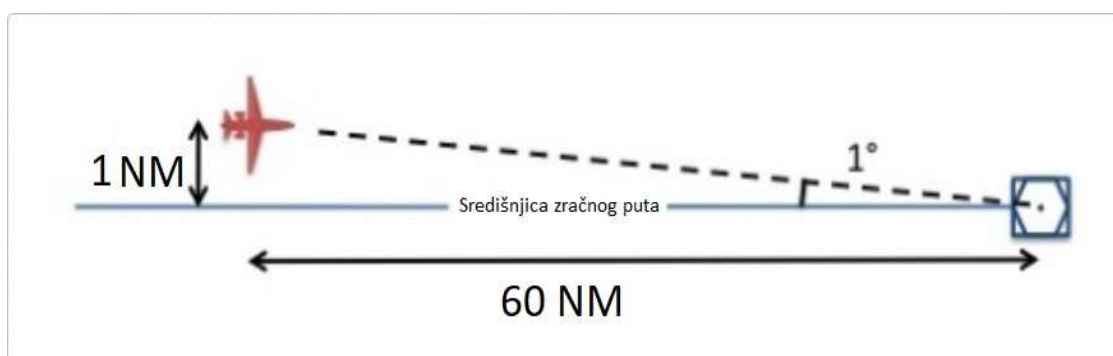
### 3 Procjena i računanje vrijednosti udaljenosti, visine, vremena i brzine

Zrakoplovna navigacija je znanstvena disciplina koja s teorijskog i praktičnog stajališta proučava i primjenjuje metode pripreme leta, određivanja pozicija te vođenja zrakoplova tijekom leta od jedne poznate pozicije do druge poznate pozicije na zemljinoj površini u prostorno-vremenskoj dimenziji [3].

U sklopu zrakoplovne navigacije i provedbe leta, pilot radi mnoge proračune napamet. Računanje udaljenosti, visine, vremena i brzine ključno je za točnu i ispravnu provedbu leta. Engleski naziv „*Rules of thumb*“ odnosi se na općenite smjernice, a ne stroga pravila, kako bi se odredila približna mjera ili napravio izračun na temelju iskustva ili općeg znanja. U sklopu zrakoplovstva, „*Rules of thumb*“ predstavljaju načela sa širokom primjenom kojima nije namijenjeno da budu strogo točna ili pouzdana u svakoj situaciji, ali lako primjenjivim postupcima i približnim proračunavanjem nekih vrijednosti mogu značajno pomoći u donošenju i razumijevanju pilotskih odluka [4].

Sve metode mentalnih proračuna provedene su bez korištenja kalkulatora te su svi odgovori i rješenja aproksimativna. Precizni računi su zato dobiveni uz pomoć kalkulatora te se vrijednosti zaokružuju na pet decimalnih mjesta. Postotci su zaokruženi na dvije decimale.

#### 3.1 Pravilo 1:60



Slika 1: Pravilo 1:60, [4]

Pravilo 1:60 (jedan u šezdeset), prikazano na slici 1, nalaže da je kut od 1 stupnja od pravca jednak pomaku od 1 nautičke milje na udaljenosti 60 nautičkih milja od ishodišta.

Pravilo 1:60 utemeljeno je na činjenici da se unutar opsega kruga može opisati šest njegovih polumjera i tako ga podijeliti na šest jednakih dijelova. Kut svakog kružnog isječka u tom bi slučaju iznosio jedan radijan, što odgovara  $(360^\circ/2\pi)$ , odnosno  $57,2957860^\circ$ . Radi praktične primjene ta se vrijednost zaokružuje na:

$$1 \text{ rad} = 60^\circ$$

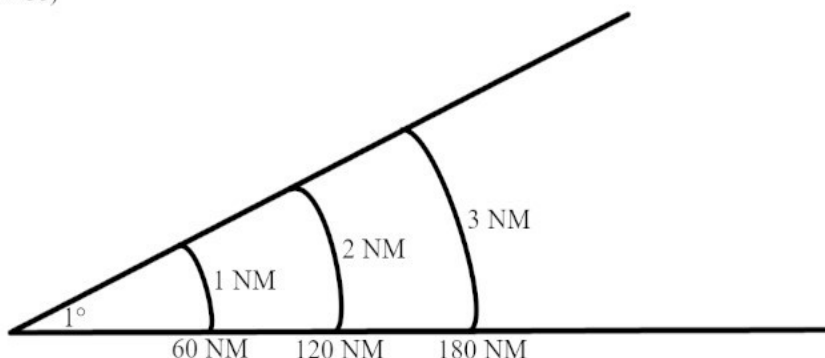
Duljina kružnog luka može se pak izraziti kao (1):

$$l = 2r\pi \frac{\alpha[^\circ]}{360[^\circ]} \quad (1)$$

Radi primjene u zrakoplovnoj navigaciji možemo pretpostaviti da je  $r = 60 \text{ NM}$  i  $\pi = 3$ , što prema pravilu 1:60 znači da kut od  $\alpha = 1^\circ$  na udaljenosti od 60 NM zatvara duljinu od 1 NM. Na slici 2 analogno je prikazan kut od  $\alpha = 1^\circ$  koji stoga na udaljenosti od 120 NM zatvara duljinu luka od 2 NM, a na udaljenosti od 180 NM duljinu luka u iznosu 3 NM itd. Isto tako, slikom 3 prikazana je analogija u slučaju povećanja kuta zadanog trokuta. Kut u iznosu  $\alpha = 2^\circ$  na udaljenosti od 60 NM zatvara duljinu od 2 NM, dok kut od  $3^\circ$  na jednakoj udaljenosti od 60 NM zatvara luk duljine 3 NM. Kut od  $3^\circ$  posebno je koristan jer se većina prilaza prilikom slijetanja u instrumentalnim meteorološkim uvjetima odvija upravo po tom profilu leta.

$1^\circ$  na 60 NM = 1 NM  
 $1^\circ$  na 120 NM = 2 NM ( $2 \times 60$ )  
 $1^\circ$  na 180 NM = 3 NM ( $3 \times 60$ )

$X^\circ$  na 60 NM = X NM  
 $X^\circ$  na 120 NM = 2X NM  
 $X^\circ$  na 180 NM = 3X NM



Slika 2: Analogija pravila 1:60, [5]

Pravilo 1:60 može se koristiti za procjenu vrijednosti visine za početak snižavanja, brzine silaženja tijekom prilaza za slijetanje, udaljenosti od poznatog orijentira, bočnog zanošenja i bočne udaljenosti tijekom leta te ispravka pravca leta za dolet na orijentir.

U svrhu brze i praktične primjene pravila 1:60 važno je naglasiti da je umnožak tangensa kuta s brojem 60 otprilike jednak vrijednosti tog kuta, no to vrijedi samo za kuteve do  $20^\circ$ , prema izrazu (2) [5]:

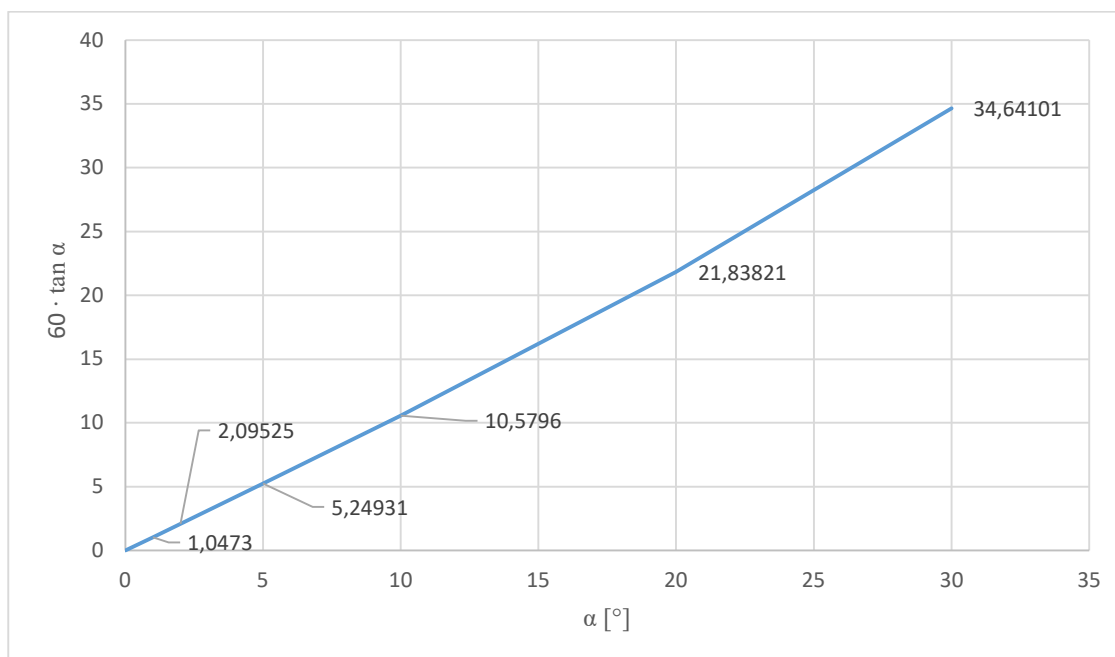
$$60 \tan \alpha \approx \alpha \quad (2)$$

Tablica 1: Odnosi kuteva i vrijednosti njihovih tangensa pomnoženi sa 60

| $\alpha$               | 1       | 2       | 5       | 10       | 20       | 30       |
|------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| $\tan \alpha$          | 0,01746 | 0,03492 | 0,08749 | 0,17633  | 0,36397  | 0,57735  |
| $60 \cdot \tan \alpha$ | 1,0473  | 2,09525 | 5,24931 | 10,57961 | 21,83821 | 34,64101 |

Izvor: [5]

Tablica 1 prikazuje konkretne primjere kuteva u odnosu na vrijednosti njihovih tangensa pomnoženih sa 60. Vidljivo je da je za kut  $\alpha = 20^\circ$  vrijednost približno jednaka 20, no za kut od  $30^\circ$  stupnjeva već se prilično razlikuje



Grafikon 1: Prikaz kuteva i vrijednosti njihovih tangensa pomnoženih sa 60

Iz grafikona 1 vidljivo je kako se za kuteve veće od 20° vrijednosti njihovih tangensa pomnoženih sa 60 previše razlikuju od njih i ne mogu biti korišteni u svrhu primjene pravila 1:60.

## 3.2 Procjena i računanje vrijednosti visine

Proračuni vezani za procjenu visine najčešće su vezani za određivanje vrha spuštanja (engl. *Top of descent*), odnosno točku iz koje će zrakoplov započeti spuštanje. Let s pravilno proračunatim profilom spuštanja od ključne je važnosti za sigurnost i ekonomičnost leta, pogotovo za mlazne transportne zrakoplove [5].

### 3.2.1 Procjena početne visine spuštanja

*Primjer 1. Na kojoj visini treba letjeti prilikom kuta prilazanja 3°, 7 NM od aerodroma koji se nalazi na razini mora ?*

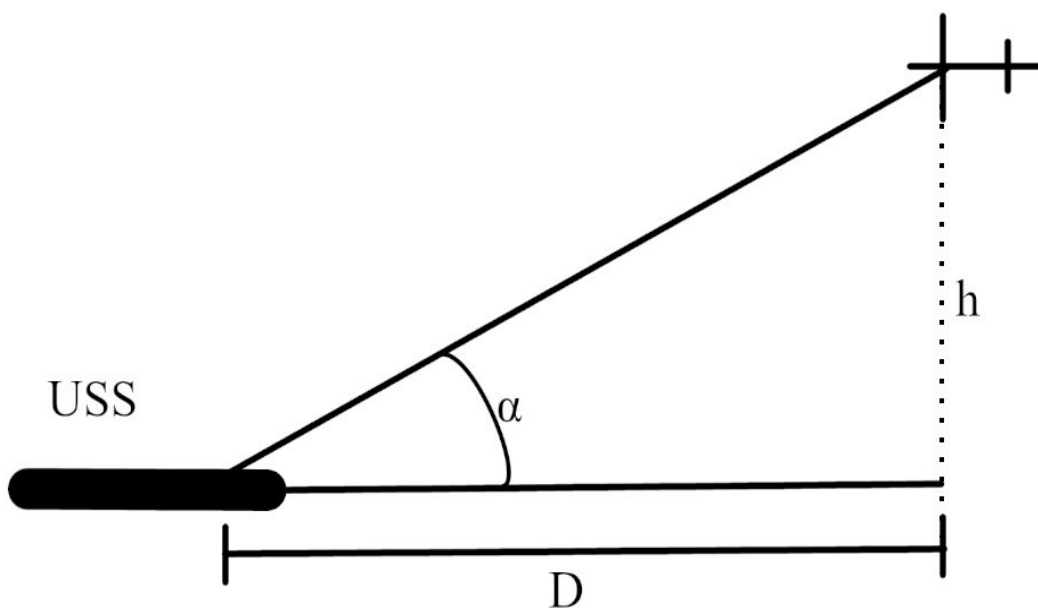
Tražena visina računa se prema izrazu (3):

$$\tan \alpha = \frac{h}{D} \quad (3)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $\alpha$  – kut prilaženja, odnosno kut između horizontalne ravnine tla i putanje kojom zrakoplov prilazi
- $h$  – visina početka spuštanja
- $D$  – udaljenost od točke na koju zrakoplov treba sletjeti do točke koja je vertikalno ispod točke početka spuštanja

Radi boljeg razumijevanja, primjer je prikazan slikom 3.



Slika 3: Određivanje visine početka spuštanja, [5]

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u izraz (3) dobije se sljedeća vrijednost:

$$h = D \cdot \tan \alpha$$

$$h = 7 \text{ NM} \cdot \tan 3^\circ$$

$$h = 0,36685 \text{ NM} = 0,36685 \cdot 6080 \text{ ft} = 2230,475 \text{ ft}$$

Račun se može skratiti primjenjujući pravilo 1:60. Naime, poznavajući podatak da jedna nautička milja iznosi 6080 stopa, i koristeći to znanje u primjeni pravila 1:60, poznato je da prilikom profila spuštanja od  $3^\circ$  zrakoplov na udaljenosti od 60 NM zatvara visinu od 3 NM. Ako se ta udaljenost svede na 1 NM, visina na putanji spuštanja od  $3^\circ$  iznosit će 0,05 NM, odnosno 300 stopa. Stoga, kut prilaza od  $3^\circ$  odgovara stopi spuštanja od otprilike 300 stopa po nautičkoj milji.

Dakle, mentalni proračun procjene visine spuštanja svodi se na izraz (4) [9]:

$$D [\text{NM}] \cdot 300 = h [\text{ft}] \quad (4)$$

Odnosno, konkretno za primjer 1:

$$h = D \cdot 300$$

$$h = 7 \cdot 300 = 2100 \text{ ft}$$

Uspoređujući vrijednosti rezultata dobiva se:

$$2100/2230,475 = 0,9415$$

Vidljivo je da se izračunata vrijednost koristeći mentalni proračun razlikuje od točno izračunate vrijednosti za svega 6%.

Za profile spuštanja od  $2^\circ$  zrakoplov na udaljenosti od 1 NM zatvara 0,033 NM, odnosno 200 stopa, dok za profile od  $4^\circ$  zrakoplov na udaljenosti od 1 NM zatvara visinu od 0,067 NM, odnosno 400 stopa, bazirano na pravilu 1:60. Ako se za primjer 1 profil spuštanja zamijeni profilom od  $2^\circ$  te uvrsti u izraz (3) dobije se:

$$h = D \cdot \tan \alpha$$



$$h = 7 \cdot \tan 2^\circ$$

$$h = 0,24445 \text{ NM} = 1486,22795 \text{ ft}$$

Izraz (4) za profile od  $2^\circ$  glasio bi:

$$D [\text{NM}] \cdot 200 = h [\text{ft}]$$

Odnosno za primjer 1:

$$h = 7 \cdot 200 = 1400$$

Rješenja se za profil  $2^\circ$  razlikuju za 5,8 %:

$$1400/1486,22795 = 0,94198$$

Ako se primjer 1 rješava za profil spuštanja  $4^\circ$ :

$$h = 7 \cdot \tan 4^\circ$$

$$h = 0,48949 \text{ NM} = 2976,08512 \text{ ft}$$

Izraz (4) za profile  $4^\circ$  glasi:

$$D [\text{NM}] \cdot 400 = h [\text{ft}]$$

A za primjer 1:

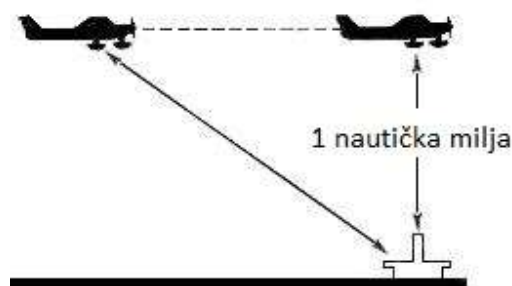
$$h = 7 \cdot 400 = 2800 \text{ ft}$$

Rješenja se za profil spuštanja razlikuju za 5,91 %:

$$2800/2976,08512 = 0,94083$$

### 3.2.2 Visina iznad DME sredstva

Oprema za mjerenje udaljenosti (engl. *Distance measuring equipment*, DME), definira se kao navigacijsko sredstvo koje služi kako bi se zrakoplovu odredila udaljenost u odnosu na sredstvo [7]. Ova oprema ne mjeri udaljenost u horizontalnoj ravnini tla na kojem se nalazi, već stvarnu zračnu udaljenost od zrakoplova do sredstva. Taj podatak može se iskoristiti kako bi se procijenila visina iznad DME sredstva. Na slici 4 prikazan je zrakoplov koji prelijeće DME sredstvo na točno jednoj nautičkoj milji iznad [8]. Poznavajući podatak da jedna nautička milja sadrži 6080 stopa, može se zaključiti da se zrakoplov nalazi 6080 stopa iznad sredstva [6].



Slika 4: Visina iznad DME sredstva, [8]

Dakle, kako bi se odredila visina iznad DME postaje, potrebno je očitanu udaljenost pomnožiti sa 6080, prema izrazu (5):

$$h = D \cdot 6080 \quad (5)$$

Pri čemu je:

- $h$  – visina zrakoplova iznad tla
- $D$  – udaljenost zrakoplova do DME sredstva

Formula u izrazu (5) za metodu procjene visine zapravo je točan matematički račun pa ga nema smisla usporediti u svrhu točnosti. Jedini način za pojednostavljenje je umjesto faktora 6080 koristiti 6000. Time se dobiva odstupanje od 1,31 %. Dakle udaljenost se pomnoži sa 6, i zatim se nadopišu tri nule kako bi se izračunala vrijednost visine.

### 3.3 Procjena i računanje vrijednosti brzine

Brzina je stopa promjene položaja ili pređene udaljenosti u jedinici vremena. Izražava se u linearnim jedinicama na sat, a postoje tri glavna izraza u odnosu na mjerne jedinice [9]:

- Čvorovi (engl. *knots*, kn) – nautičke milje (NM) po satu (h)
- Milje po satu (engl. *miles per hour*, mph) – statute milje (SM) po satu
- Kilometri (Km) po satu (engl. *kilometers per hour*, kph)

Prema međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI) kao jedinicu valja koristiti [m/s], ali je u zrakoplovstvu, kao i u pomorstvu, dopušteno i uobičajeno korištenje čvora (*Knot*, kn) koji iznosi 1 NM/h (jednu nautičku milju na sat), odnosno 0,5148 m/s ili 1,853 km/h. Neko se je vrijeme u zrakoplovstvu brzina mjerila u [MPH] (*miles per hour*), što je iznosilo 0,447 m/s, 1,609 km/h, odnosno 0,868 kn [10].

Brzina predstavlja koliko zrakoplov pređe za jedan sat. Brzina se računa prema formuli u izrazu (6):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\partial s}{\partial t} \quad (6)$$

Odnosno, za najjednostavniji primjer pri jednolikom gibanju brzina je jednaka izrazu (7):

$$v = \frac{s}{t} \quad (7)$$

Pri čemu je:

- $s$  – udaljenost (engl. *distance*)
- $v$  – brzina (engl. *ground speed*)
- $t$  – vrijeme (engl. *time*)

U zračnoj plovidbi najčešće se koriste dva izraza brzine [9]:

- Zračna brzina (engl. *air speed*) – često se naziva i samo “brzina”, to je brzina zrakoplova kroz zrak
- Putna brzina (engl. *ground speed*) – brzina zrakoplova u odnosu na tlo

Također, pri mjerenju brzine leta razlikuju se dvije komponente brzine:

- Zračna brzina – mjeri se u smjeru uzdužne osi zrakoplova
- Vertikalna brzina – mjeri se kroz vertikalnu komponentu brzine kroz zrak

Mjerenje brzine u smjeru uzdužne osi zrakoplova temelji se na mjerenju dinamičkog tlaka  $p_d$  koji se javlja kao razlika između statičkog i ukupnog tlaka zraka [10]. Pitot-statički sustav zrakoplova omogućuje mjerenje ukupnog i statičkog tlaka zraka, a razlika (dinamički tlak) se prikazuje na brzinomjeru kao brzina leta u odnosu na zrak. Izmjerena vrijednost brzine iz razlike u tlakovima točna je do neke mjere. Naime, povećanjem brzine leta zrakoplova pojavljuje se sve veći utjecaj ostalih fizikalnih pojava, prvenstveno vezanih uz stlačivost zraka. Zbog toga se više ne može pouzdano tvrditi da je pojavom stlačivosti zraka razlika ukupnog i statičkog tlaka upravo razmjerna brzini leta. Utjecaj fizikalnih pojava se mijenja brzinom leta, pa se odnos izmjerene razlike tlakova ne može analitički izraziti u cijelom opsegu brzina jedinstvenom matematičkom funkcijom. Stlačivost zraka ovisi jedino o temperaturi. Što je temperatura niža, to je stlačivost zraka veća. Tako se stlačivost zraka mijenja prema adijabatskom ili izotermičkom procesu na različitim visinama leta. Zrak se smatra nestlačivim fluidom pri brzinama leta koje su manje od 100 m/s (360 km/h) [5].

### 3.3.1 Vrste brzina i njihov međusobni odnos

Zbog razlika koje se pojavljuju pri određivanju brzina leta i utjecaja grešaka pri mjerenju, u zrakoplovstvu su definirane sljedeće vrste brzina:

- a) instrumentalna brzina ( $v_i'$ ) ili brzina koju prikazuje instrument (brzinomjer), a koja nije korigirana za grešku položaja davača pitot-statičkog sustava i grešku samog instrumenta osim što je skala instrumenta kalibrirana na standardnu adijabatsku korekciju stlačivog zraka za visinu na razini mora prema MSA.
- b) indicirana brzina ( $v_i$ ) (engl. *Indicated Air Speed* - IAS) ili brzina koju prikazuje brzinomjer kod kojega je izvršena korekcija za mehaničku grešku instrumenta koja se pojavljuje zbog unutarnjeg trenja pojedinih dijelova [5].

Za proračun indicirane brzine do oko 200kn (360 km/h), vrijedi izraz (8):

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (p - p_0)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad (8)$$

Pri čemu je:

- $p$  – ukupni tlak
- $p_0$  – statički tlak
- $p_d$  – dinamički tlak
- $\rho$  – gustoća zraka

- c) Kalibrirana brzina ( $v_c$ ) (engl. *Calibrated Air Speed*, CAS) je indicirana brzina korigirana za utjecaj ugradnje izvora statičkog i ukupnog tlaka (engl. *position error*), a računa se prema izrazu (9):

$$v_c = v_i - \Delta v_p \quad (9)$$

Gdje je  $\Delta v_p$  korekcija pogreške ugradnje Pitot-statičkog izvora.

- d) Ekvivalentna brzina ( $v_e$ ) (engl. *Equivalent Air Speed*, EAS) je kalibrirana brzina korigirana za utjecaj stlačivosti zraka. Za određivanje te brzine vrijedi izraz (10):

$$v_e = v_c - \Delta v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho \cdot c}} \quad (10)$$

Pri čemu je  $\Delta v_c$  korekcija utjecaja stlačivosti zraka,  $c$  faktor stlačivosti zraka [10]. Razlika između CAS i EAS postaje vidljiva na brzinama iznad 200 kn i visinama iznad 10000 ft, kada se pojavljuje utjecaj stlačivosti zraka [11].

- e) Stvarna brzina ( $v$ ) (engl. *True airspeed*) je ekvivalentna brzina uz dodatne korekcije kojima se uzima u obzir utjecaj gustoće i temperature zraka. Gustoća zraka ne može se izravno mjeriti već se posredno određuje iz statičkog tlaka i njemu odgovarajuće temperature prema izrazu (11):

$$v = v_e \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (11)$$

pri čemu je  $\rho_0$  gustoća na razini mora, koja prema ISA uvjetima iznosi  $1,225 \text{ kg/m}^3$  [10].

Za navigacijske potrebe koristi se metoda procjene prirasta vrijednosti TAS u odnosu na CAS oko 2 % svakih 1000 stopa visine leta [12]. U sljedećem primjeru, uz zadanu vrijednost CAS, izračunat će se TAS, prvobitno preko točnih navedenih formula, pa zatim preko metoda prirasta 2 % svakih 1000 stopa. Rezultati će potom biti uspoređeni.

*Primjer 2. Koliko iznosi stvarna brzina na visini 9000 ft, ako je CAS jednak 150 kn?*

Pošto na visini  $h = 9000 \text{ ft}$  i brzini  $\text{CAS} = 150 \text{ kn}$  nema utjecaja stlačivosti zraka, vrijedi sljedeći izraz (12):

$$\text{CAS} = \text{EAS} \quad (12)$$

Nadalje, prema izrazu (11) može se izračunati:

$$v = v_e \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$$

Gustoća na razini mora iznosi  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Visina  $h = 9000 \text{ ft}$  jednaka je  $2743,2 \text{ m}$ . Gustoća zraka računa se prema izrazu (13) [13, 14]:

$$\rho = \rho_0 [\text{kg/m}^3] \cdot (1 - 2,256 \cdot 10^{-5} \cdot h [\text{m}])^{4,256} \quad (13)$$

$$\rho = 1,225 \cdot (1 - 2,256 \cdot 10^{-5} \cdot 2743,2)^{4,256}$$

$$\rho = 0,933372 \text{ kg/m}^3$$

Dakle, uvrštavanjem u izraz (11) dobije se:

$$v = 150 \cdot \sqrt{\frac{1,225}{0,933372}} = 171,84303 \text{ kn}$$

Mentalnim proračunom porasta vrijednosti TAS za 2 % svakih 1000 ft dobije se:

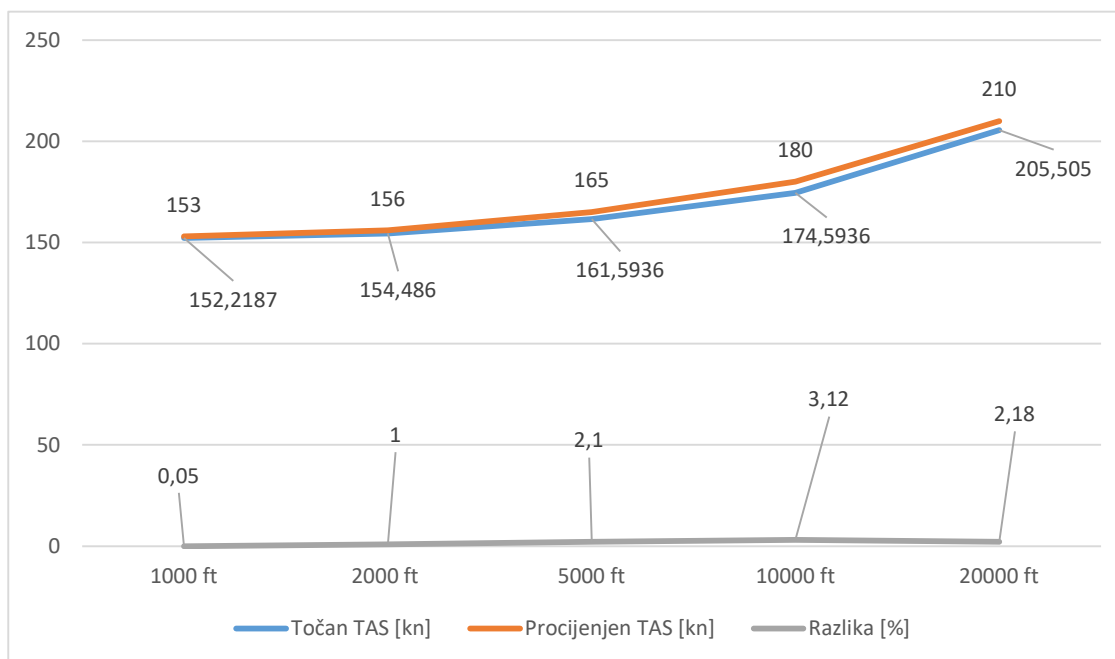
$$v = 150 + 150 \cdot (0,02 \cdot 9)$$

$$v = 177 \text{ kn}$$

Usporede li se rezultati:

$$177/171,84303 = 1,03001$$

Vrijednosti rezultata se razlikuju za 3 %.



Grafikon 2: Usporedba stvarnih i procijenjenih vrijednosti TAS

U grafikonu 2 za zadani su CAS od 150 kn uspoređene vrijednosti TAS dobivene točnim proračunom i one dobivene metodom procjene dodavanja 2 % na 1000 ft. Vidljivo je da do visine od 20000 ft greška ne prelazi više od 4 %, što metodu čini izrazito točnom.

### 3.3.2 Metoda procjene vertikalne brzine silaženja u odnosu na putnu brzinu

Brzina silaženja (engl. *rate of descent* ili ROD) važan je element za održavanje proračunate putanje tijekom prilaza za slijetanje. Uz poznatu točku početka spuštanja treba izračunati kojim će tempom zrakoplov smanjivati visinu da bi, naposljetku, u kontinuiranom snižavanju prema poznatoj putanji, došao do točke dodira na uzletno-sletnoj stazi.

Sukladno izrazu (3), množenjem sa 60 dobiva se:

$$60 \tan \alpha = \frac{h \cdot 60}{D}$$

Primjenjujući pravilo 1:60 za kutove do 20° iz tablice 1 može se izraziti (14):



$$\alpha = \frac{h \cdot 60}{D} \quad (14)$$

odnosno, dobije se izraz (15):

$$h = \frac{\alpha \cdot D}{60} \quad (15)$$

Izraz (15) vrijedi kad su visina  $h$  i udaljenost  $d$  u istim mjernim jedinicama. Međutim, kao što je već izraženo, jedna nautička milja sadrži 6080 stopa, što je približno 6000, pa se dobiva izraz (16):

$$h[\text{ft}] = \frac{\alpha[^\circ] \cdot D [\text{NM}] \cdot 6000}{60} \quad (16)$$

skraćivanjem se nadalje dobiva (16):

$$h [\text{ft}] = \alpha [^\circ] \cdot 100 \cdot D [\text{NM}] \quad (16)$$

Poznavajući taj podatak, moguće je izvesti izraz (17) za računanje brzine silaženja:

$$\frac{h [\text{ft}]}{t [\text{h}]} = \alpha \cdot 100 \cdot \frac{D [\text{NM}]}{t [\text{h}]} \quad (17)$$

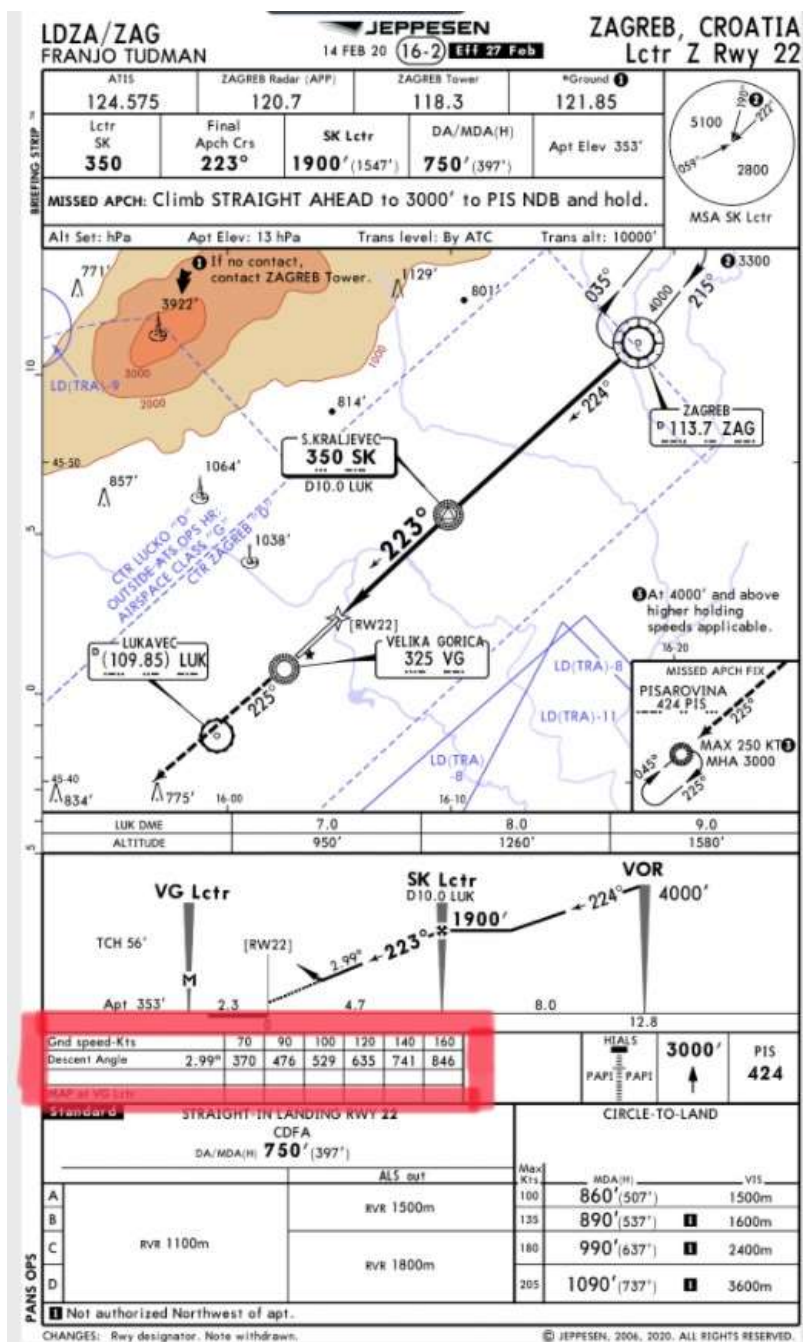
Pri čemu je odnos  $D/t$  putna brzina (također se označava sa GS) zrakoplova, a izraz  $h/t$  predstavlja brzinu silaženja izraženu u stopama po satu. Za brzinu silaženja izraženu u stopama po minuti izraz (18) glasi:

$$v_{\text{sil}} [\text{ft/min}] = \alpha \cdot 100 \cdot \frac{GS}{60} \quad (18)$$

Za kut od  $3^\circ$  u prilazu vrijedi [5]:

$$v_{\text{sil}} [\text{ft/min}] = 5 \cdot \text{GS}$$

Na slici 5 prikazana je karta instrumentalnog prilaznog postupka lokator Z prilaza za stazu 22 Zračne luke Zagreb. Crvenom je bojom istaknut okvir koji propisuje preporučene brzine spuštanja u stopama po minuti za raspon uobičajenih putnih brzina u prilazu. Brzina silaženja odnosi se na kut prilaza 3°.



Slika 5: Karta instrumentalnog prilaza Zračne luke Zagreb, [15]

U tablici 2 uspoređene su izdane brzine silaženja za datu putnu brzinu na službenoj karti s metodom procjene vertikalne brzine množenjem putne brzine s faktorom 5.

Tablica 2: Provjera točnosti brzine silaženja

| GS                             | 70    | 90     | 100    | 120    | 140    | 160    |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vsil                           | 370   | 476    | 529    | 635    | 741    | 846    |
| GS · 5                         | 350   | 450    | 500    | 600    | 700    | 800    |
| odnos V sil<br>i GS x 5<br>[%] | 5,4 % | 4,25 % | 5,48 % | 5,51 % | 5,53 % | 5,44 % |

Izvor: [15]

Dobivenim rezultatom prikazano je kako se nijedan rezultat ne razlikuje od službene vrijednosti brzine silaženja za više od 6 %, a prosječno odstupanje je 5,27 % [15].

### 3.4 Odnos brzine, udaljenosti i vremena

Kako bi se pronašla udaljenost koja je preletena u određenom vremenu, potrebno je pomnožiti putnu brzinu s vremenom koje je prošlo, pa vrijedi izraz (19) [6]:

$$D = w \cdot t \quad (19)$$

Pri čemu je:

- D – udaljenost (engl. *distance*)
- w – putna brzina (engl. *ground speed*, GS)
- t – vrijeme (engl. *time*)

Navigacija bazirana na metodi deduktivnog računanja (engl. *Dead reckoning navigation*) omogućuje pilotu da zadaće tijekom vođenja zrakoplova izvršava na jednostavan način potičući ga na mentalni rad kojim rješava računske navigacijske probleme bez potrebe za računalom i kalkulatorom. Parametri udaljenosti, brzine i vremena usko su povezani jednom formulom te su stoga često predmet računanja u sklopu metode deduktivnog računanja. Ova metoda između

ostalog predstavlja skup više pravila kojima se pojednostavljuje računanje udaljenosti, brzine i vremena.

Najčešći slučajevi procjene računanja vrijednosti udaljenosti uključuju pojednostavljenje računanja same udaljenosti od poznatog orijentira ili zadane točke uz zadane parametre vremena i brzine. Isto tako, vrijednost vremena u najviše se slučajeva računa prilikom poznavanja vrijednosti brzine i puta te se metode procjene računanja vremena svode na skraćivanje tog već ionako jednostavnog procesa [6].

### 3.4.1 Metoda procjene vrijednosti udaljenosti i vremena uz pomoć faktora brzine

Tijekom određenog leta brzina zrakoplova varirat će od faze polijetanja pa do faze slijetanja, u svim etapama leta. Samim time i vrijeme potrebno za prijeći etapu rute varirat će, i to ovisno o brzini. Kako bi se pojednostavio proces računanja vremena ili udaljenosti preko brzine, ta brzina se dijeli s brojem 60 kako bi se dobio faktor brzine (engl. *speed factor*,  $v_{SF}$ ). Faktor brzine je udaljenost prijeđena u jednoj minuti izražena u nautičkim miljama po minuti. Znatno skraćuje mentalni proračun zato što parametar brzine svede na brojke koju je intuitivnije pomnožiti s minutama kako bi se dobila udaljenost. Bitno je naglasiti kako se dijeljenjem brojeva djeljivih sa 60 dobije cijeli broj, kao što je prikazano u tablici 3, no mentalna je metoda i moguća s ostalim brojevima, prilikom čega se vrijednost faktora brzine zaokruži na najbliži cijeli broj [6].

Tablica 3: Faktori brzine

| GS [kn]              | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 |
|----------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $v_{SF}$<br>[NM/min] | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |

Izvor: [17]

*Primjer 3. Let Zlin Z-142 zrakoplova odvija se brzinom 180 km/h. Na temelju preostalog goriva (plus rezervno gorivo), istrajnost zrakoplova je 0:42. Koliki je dolet u uvjetima bez vjetra?*

Kao što je navedeno u izrazu (19), formula za udaljenosti iznosi:

$$D = w \cdot t$$

U ovom slučaju, putna brzina iznosi 180 km/h, dok istrajnost (engl. *endurance*) predstavlja vrijeme  $t$  koje zrakoplov još može provesti u zraku. Stoga se može zaključiti da će se dolet (engl. *range*) izračunati množeći te dvije vrijednosti:

$$D = 180 \text{ km/h} \cdot 42 \text{ min}$$

$$D = 180 \text{ km/h} \cdot \frac{42}{60} \text{ h}$$

$$D = 126 \text{ km}$$

Ovo je primjer točnog matematičkog računanja vrijednosti udaljenosti, uz pomoć kalkulatora, no postupak može biti znatno pojednostavljen koristeći mentalni proračun. Naime, pošto je vrijeme zadano u minutama, a ne u satima, vrijednost brzine može se podijeliti sa 60 jer je poznato da u jednom satu ima 60 minuta. Time se dobiva tzv. “*speed factor*”, odnosno faktor brzine u kojem je brzina izražena u mjernoj jedinici km/min. U ovom primjeru:

$$v_{SF} = \frac{180}{60} = 3 \text{ km/min}$$

Ovime je dobivena vrijednost brzine koju je intuitivnije i brže pomnožiti sa zadanom vrijednošću vremena jer sadrže iste mjerne jedinice [18]:

$$D = 42 \text{ min} \cdot 3 \text{ km/min}$$

$$D = 126 \text{ km}$$

*Primjer 4. Zrakoplov leti na razini leta 180 i kontrola leta mu naredi da popne na razinu leta 250 sa stopom penjanja točno 2000ft/min. Koliko je udaljena točka vrha penjanja (engl. *Top of climb*) ako putna brzina iznosi 360 kn?*

Razlika u zadanim razinama leta (engl. *flight level*, FL) je 7000 ft, dakle uz stopu penjanja od 2000 ft/min, vrijeme za popeti iznosi 3.5 min. Putna brzina iznosi 360 kn, odnosno 360 NM/h. Udaljenost stoga prema izrazu (19) iznosi:

$$D = w \cdot t$$

$$D = 360 \text{ kn} \cdot 3,5 \text{ min}$$

$$D = 360 \text{ NM/h} \cdot \frac{3,5}{60} \text{ h}$$

$$D = 21 \text{ NM}$$

Pošto je brzina zadana u nautičkim miljama u satu, a vrijeme u minutama, račun se može pojednostaviti računanjem faktora brzine, odnosno brzine izražene u NM/min. Dijeljenje vrijednosti 360 sa 60 napamet svakako je lakše i brže nego dijeljenje vrijednosti 3.5 sa 60 [19]. Iz toga slijedi:

$$v_{\text{SF}} = \frac{360}{60} = 6 \text{ NM/min}$$

Nadalje:

$$D = 6 \text{ NM/min} \cdot 3,5 \text{ min}$$

$$D = 21 \text{ NM}$$

*Primjer 5.. Putna brzina iznosi 170 kn, a vrijeme leta je 7 minuta. Kolika je udaljenost prijeđena?*

Točnim proračunom formule izražene (19) dobije se rezultat:

$$D = w \cdot t$$

$$D = 170 \text{ NM/h} \cdot \frac{7}{60} \text{ h}$$

$$D = 19,83 \text{ NM}$$

Metodom procjene udaljenosti svođenjem brzine na faktor brzine dobije se pak:

$$w = \frac{170}{60} \approx 3 \text{ NM/min}$$

$$D \approx 3 \text{ NM/min} \cdot 7 \text{ min}$$

$$D \approx 21 \text{ NM}$$

Uspoređujući rezultate vidljivo je da se razlikuju za svega pet posto [6]:

$$19,83/21 = 0,94444$$

*Primjer 6. Let se odvija brzinom 260 kn. Potrebno je izračunati vrijeme za let udaljenosti 34 NM.*

Uvrštavanjem u formulu prema izrazu (19):

$$D = w \cdot t$$

$$t = \frac{D}{w}$$

$$T = \frac{34}{260}$$

$$T = 0,1308 \text{ h} = 7,84615 \text{ min}$$

Svođenjem brzine na faktor brzine dobije se:



$$w = \frac{260}{60} \approx 4$$

$$t \approx \frac{34}{4} \approx 8 \text{ minuta}$$

Usporede li se rezultati [6]:

$$8/7,84615 = 1,0196$$

Dakle, odstupanje iznosi 1,96 %.

Iz dobivenih rezultata prva dva primjera vidljivo je da je uz pomoć metode procjene vrijednosti udaljenosti koristeći faktor brzine dobiveno isto rješenje kao i preciznim matematičkim računom. U trećem je primjeru prikazano zaokruživanje na cijeli faktor brzine jer sama zadana vrijednost brzine nije djeljiva sa 60. Čak i u tom primjeru vrijednosti preciznog računa i metode procjene razlikuju se za pet posto. U četvrtom primjeru razlika je bila svega dva posto. Može se zaključiti da je ova metoda mentalnog proračuna brza, pouzdana i točna [6, 18, 19].

### 3.4.2 Određivanje putne brzine pomoću DME sredstva

Koristeći DME moguće je odrediti putnu brzinu, u slučaju da je pravac leta zrakoplova usmjeren prema sredstvu. Ova metoda procjene ne zasniva se toliko na skraćivanju procesa računanja brzine koliko na pojednostavljenju istog. Naime, nakon uspostavljanja visine krstarenja i prilikom doleta na sredstvo s DME postajom, potrebno je uključiti štopericu i mjeriti vrijeme 3 minute. Nakon toga očita se prijeđena udaljenost te se pomnoži s faktorom 20 da bi se izračunala putna brzina. Račun je prikazan putem izraza (19):

$$D = w \cdot t$$

$$w = \frac{D}{t}$$

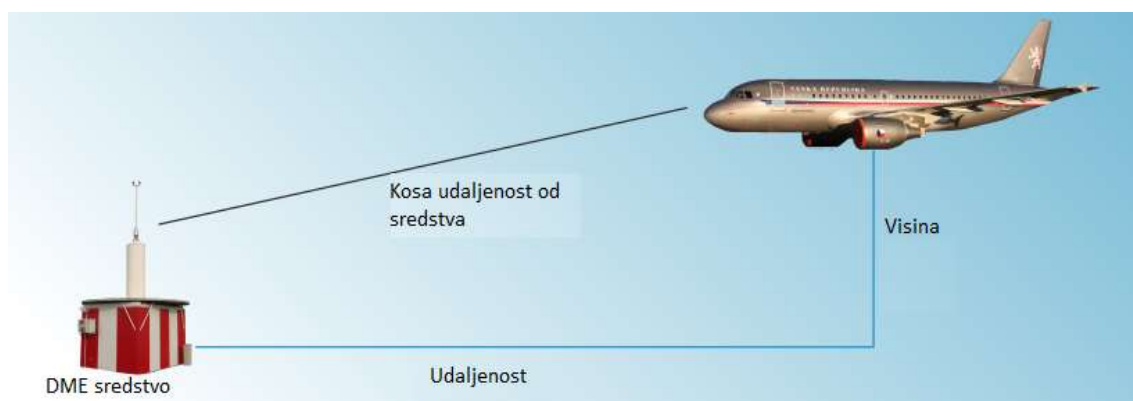
Pošto je  $t = 3 \text{ min}$ , slijedi:

$$w = \frac{D}{\frac{3}{60}} [\text{h}]$$

$$w = \frac{D}{\frac{1}{20}} [\text{h}]$$

$$w [\text{NM/h}] = \frac{D [\text{NM}] \cdot 20}{[\text{h}]}$$

Ova metoda neće biti uspoređivana s točnim proračunom pošto je sama procjena izvedena iz tog proračuna, stoga su rješenja ista. Važno je napomenuti da DME sredstvo mjeri kosi nagib udaljenosti (engl. *slant range*) od sredstva, kao što je prikazano na slici 6, a ne horizontalnu udaljenost na tlu. Stoga se ne preporučuje metodu koristiti kada je udaljenost od DME sredstva manja od pola visine izražene u tisućama stopa. Npr. Ako se let odvija na 18000ft ne preporučuje se da se koriste DME indikacije manje od 9 NM za ovu metodu procjene [6].



Slika 6: Mjerenje kose udaljenosti DME sredstvom, [20]

### 3.5 Usporedba metoda po točnosti

U tablici 4 navedeni su svi mentalni proračuni opisani za računanje parametara visine, brzine, udaljenosti i vremena. Poredani su na temelju točnosti, odnosno odstupanja od stvarne proračunate vrijednosti, od najtočnijih prema onima s najviše odstupanja.

Tablica 4: Odstupanja mentalnih proračuna

| Parametar           | Mentalni proračun                                       | Odstupanje |
|---------------------|---------------------------------------------------------|------------|
| Putna brzina        | Računanje putne brzine prilikom leta prema DME sredstvu | 0 %        |
| Visina              | Računanje visine prilikom leta iznad DME sredstva       | 1,31 %     |
| Stvarna brzina      | TAS + CAS · 2 % za svakih 1000 ft                       | 0 - 3 %    |
| Vrijeme, udaljenost | Faktor brzine                                           | 0 - 5 %    |
| Brzina silaženja    | Množenje putne brzine faktorom 5                        | 5,27 %     |
| Visina              | Množenje udaljenosti faktorom 300                       | 5 - 6 %    |

Žutom bojom označeni su proračuni odstupanja većih od 5 %, a zelenom bojom označeni su proračuni odstupanja manjih od 5 % od stvarnih proračunatih vrijednosti.

## 4 Preračunavanje mjernih jedinica

SI sustav međunarodnih jedinica općeprihvaćeni je standard za izvođenje izračuna u svim tehničkim znanostima. S obzirom na to da se metrički sustav ne koristi u Sjedinjenim Američkim Državama, većina vrijednosti u engleskim sustavima mjerenja date su u imperijalnom sustavu mjernih jedinica te se stoga moraju preračunati u SI sustav jedinica [13]. Mjerne jedinice koje se najčešće koriste u zrakoplovstvu vezane su uz udaljenost, visinu, temperaturu, tlak, volumen, masu i brzinu [21].

### 4.1 Mjerne jedinice udaljenosti i visine

Prema SI sustavu mjerna jedinica za duljinu, što se u letenju može primijeniti na vrijednosti udaljenosti i visine, je metar. Metar (m) je udaljenost koju svjetlost u vakuumu pređe za  $1/299\,792\,458$  sekundi. Međutim, u zrakoplovstvu i avijaciji visina se izražava u stopama (ft), što je jednako točno 0,3048 m [22]. Taj je podatak važno poznavati kako bi se steklo razumijevanje odnosa međusobnih mjernih jedinica vezanih za udaljenost i visinu. U tablici 5 istaknute su još neke od često korištenih mjernih jedinica u sklopu visine i udaljenosti, te njihove vrijednosti izražene u metrima [13]. Također je važno naglasiti da jedan metar sadrži 1000 milimetara (mm), a 1000 metara čini 1 kilometar (km).

Tablica 5: Mjerne jedinice duljine

| Količina | Oznaka jedinice | Simbol | Konverzija u SI<br>jedinicu |
|----------|-----------------|--------|-----------------------------|
| Duljina  | inč             | in     | 1 in = 25,4 mm              |
|          | stopa           | ft     | 1 ft = 12 in = 0,3048 m     |
|          | statutna milja  | SM     | 1 SM = 1,609444 km          |
|          | nautička milja  | NM     | 1 NM = 1,852 km             |

Izvor: [13]

Radi lakšeg preračunavanja, često se koriste metode procjene mjernih jedinica vrijednosti duljine. Za preračunavanje vrijednosti udaljenosti koristi se:

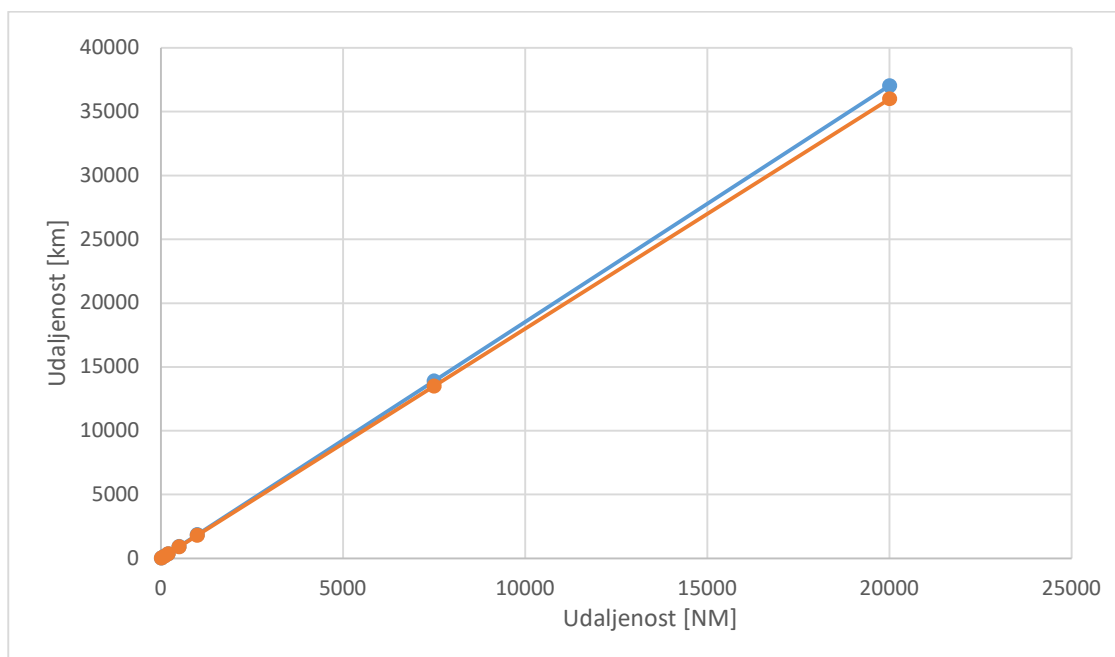
- a) Udaljenost (NM) = Udaljenost (km) dijeli se s 2 te se zatim dodaje 10 %
- b) Udaljenost (km) = Udaljenost (NM) množi se s 2 te se oduzima 10 %

U tablici 6 ova je metoda korištena za proračun nekoliko vrijednosti udaljenosti. Istovremeno je napravljena usporedba sa stvarnim vrijednostima, te je metoda označena zelenom bojom ako vrijednost dobivena metodom procjene iznosi +/- 5% od stvarne vrijednosti [17].

Tablica 6: Metoda procjene preračunavanja udaljenosti

| Udaljenost | Stvarna preračunata vrijednost udaljenosti | Metoda procjene            | Procijenjena preračunata vrijednost | Odstupanje procijenjene vrijednosti od stvarne |
|------------|--------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1000 NM    | 1852 km                                    | $1000 \cdot 2 \cdot 0,9$   | 1800 km                             | 2,81 %                                         |
| 654 NM     | 1211,208 km                                | $654 \cdot 2 \cdot 0,9$    | 1177 km                             | 2,81 %                                         |
| 1500 km    | 809,93521 NM                               | $\frac{1500}{2} \cdot 1,1$ | 825 NM                              | 1,98 %                                         |
| 87 km      | 46,97624 NM                                | $\frac{87}{2} \cdot 1,1$   | 48 NM                               | 1,19 %                                         |

Izvor: [17]



Grafikon 3: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja nautičkih milja u kilometre

Grafikonom 3 prikazan je raspon vrijednosti preračunavanja nautičkih milja, prikazanih na x-osi, u kilometre, prikazane na y-osi. Vrijednosti označene plavom bojom su točno preračunate, dok su narančastom bojom prikazane procijenjene vrijednosti. Odstupanje procijenjene vrijednosti manje je od 5 % kroz cijeli raspon visina.

Iz rezultata je vidljivo da je metoda procjene preračunavanja između nautičkih milja i kilometara iznimno precizna i jednostavna za provesti.

Uz preračunavanje mjernih jedinica za udaljenost, u sklopu računanja duljine također postoje metode kojima se olakšava preračunavanje mjernih jedinica često korištenih za izražavanje visine. U nastavku su navedene dvije takve metode. Prva metoda preračunavanja između stopa i metara glasi:

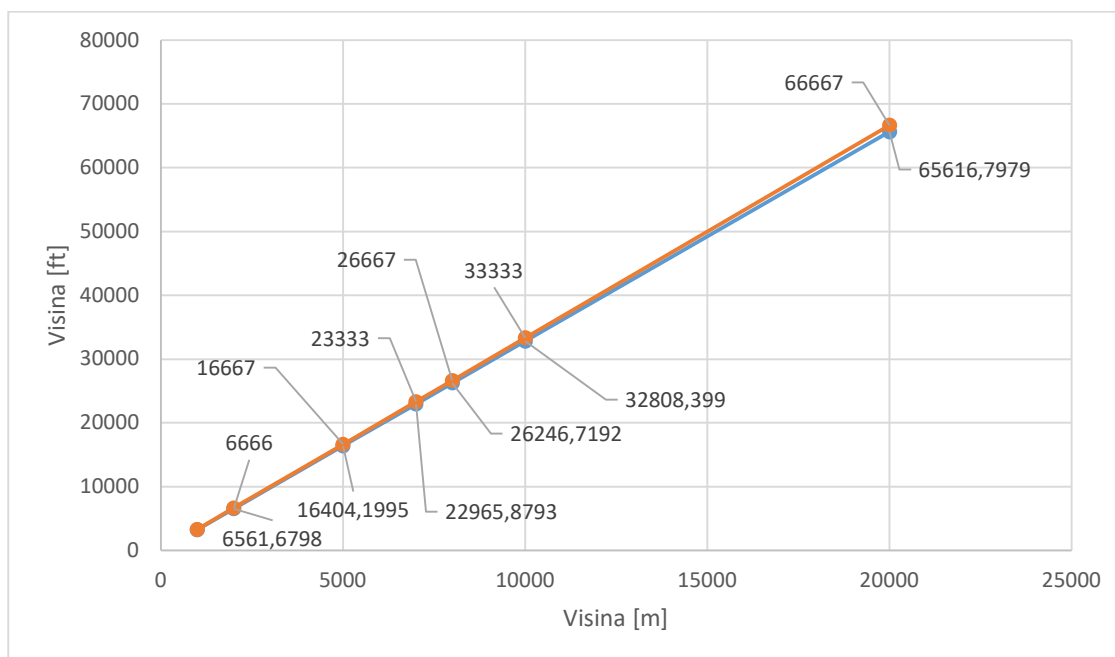
- a) Visina (ft) = visina (m) dijeli se s 3 i množi s 10
- b) Visina (m) = visina (ft) množi se s 3 i dijeli s 10

U tablici 7 ova je metoda provjerena kroz nekoliko primjera zadane visine. Nakon stvarne preračunate vrijednosti navedena je provedena metoda i zatim procijenjena preračunata vrijednost. Metoda je označena zelenom bojom u slučaju da se rezultati razlikuju za manje od 5 %.

Tablica 7: Prva metoda procjene preračunavanja visine

| Visina   | Stvarna preračunata vrijednost | Metoda procjene            | Procijenjena preračunata vrijednost | Odstupanje procijenjene vrijednosti od stvarne |
|----------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| 12345 m  | 40501,9685 ft                  | $\frac{12345}{3} \cdot 10$ | 41150 ft                            | 1,6 %                                          |
| 573 m    | 1879,92126 ft                  | $\frac{573}{3} \cdot 10$   | 1910 ft                             | 1,6 %                                          |
| 29850 ft | 9098,28 m                      | $\frac{29850 \cdot 3}{10}$ | 8955 m                              | 1,57 %                                         |
| 47 ft    | 14,3256 m                      | $\frac{47 \cdot 3}{10}$    | 14 m                                | 2,27 %                                         |

Izvor: [17]



Grafikon 4: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja metara u stope

Grafikonom 4 uspoređene su točne vrijednosti, izražene plavom bojom, i procijenjene vrijednosti visine preračunate iz metara u stope, izražene narančastom bojom. Prikazano je kako se vrijednosti dobivene metodom procjene ne razlikuju za više od 3 % od stvarne preračunate vrijednosti.

Druga metoda malo se razlikuje od prve:

- a)  $\text{Visina (ft)} = \text{visina (m)} \times 3$  te se nadodaje 10 %
- b)  $\text{Visina (m)} = \text{visina (ft)} \div 3$  oduzima 10 %

U tablici 8 druga je metoda provjerena na temelju točnosti s istim zadanim vrijednostima visine kao i kod tablice 7. Rezultati procjene koji se od stvarne preračunate vrijednosti razlikuju za manje od 5 % također će biti označeni zelenom bojom.



Tablica 8: Druga metoda procjene preračunavanje visine

| Visina   | Stvarna preračunata vrijednost | Metoda procjene             | Procijenjena preračunata vrijednost | Odstupanje procijenjene vrijednosti od stvarne |
|----------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| 12345 m  | 40501,9685 ft                  | $12345 \cdot 3 \cdot 1.1$   | 40000 ft                            | 1,24 %                                         |
| 573 m    | 1879,92126 ft                  | $573 \cdot 3 \cdot 1.1$     | 1900 ft                             | 1,07 %                                         |
| 29850 ft | 9098,28 m                      | $\frac{29850}{3} \cdot 0.9$ | 9000 m                              | 1,08 %                                         |
| 47 ft    | 14,3256 m                      | $\frac{47}{3} \cdot 0.9$    | 14 m                                | 2,27 %                                         |

Izvor: [17]

I ova je metoda iznimno točna i može se zaključiti da obje metode produciraju rezultate jednako točne kao i stvarna vrijednost [17].

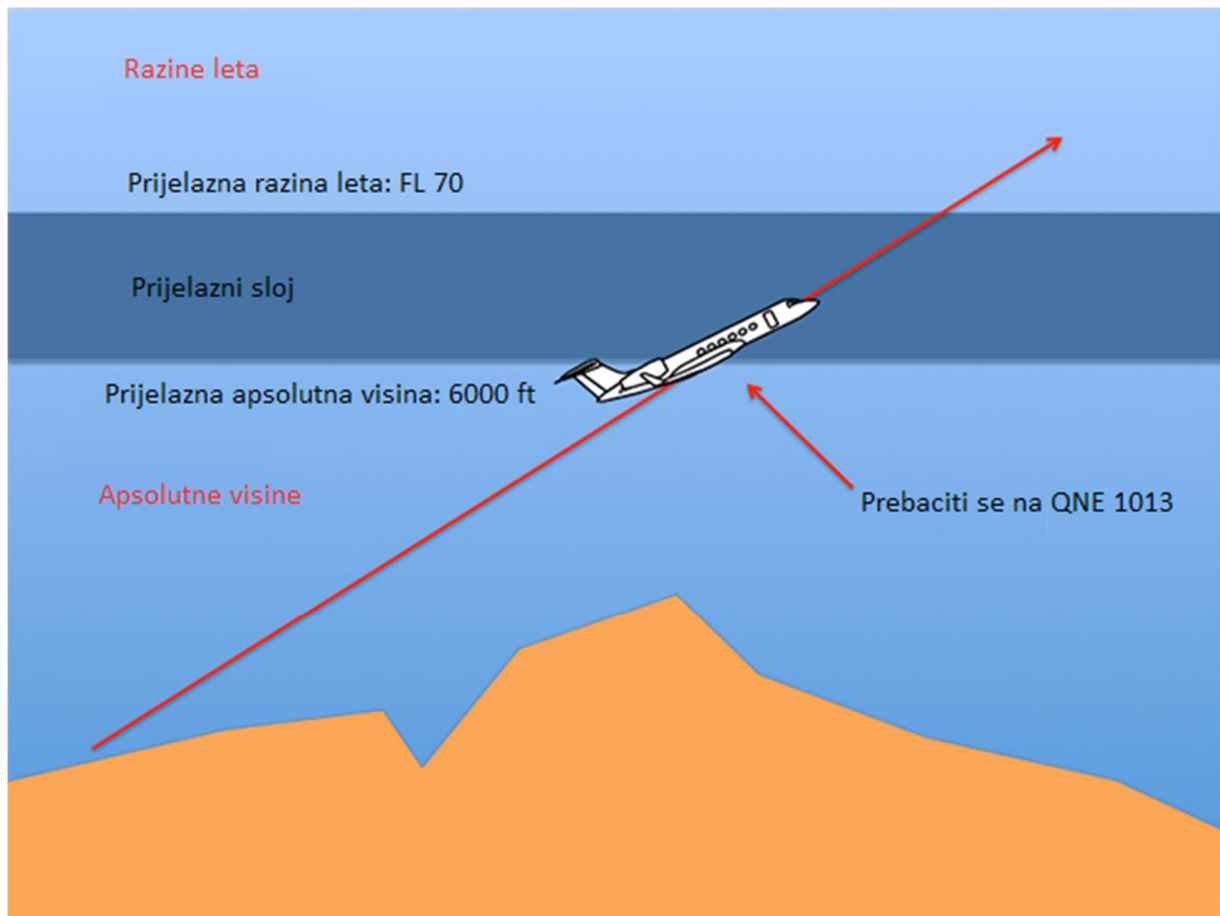
## 4.2 Tlak i temperatura zraka

Temperatura i tlak zraka kontinuirano se mijenjaju s vremenom i položajem na Zemlji. Stoga je u zrakoplovstvu potrebno definirati standardizirane uvjete atmosfere pri kojima se mogu vršiti umjeravanja zrakoplovnih instrumenata i dizajniranje te testiranje zrakoplova. Parametri atmosfere koji su određeni u tu svrhu čine međunarodnu standardnu atmosferu (engl. *International Standard Atmosphere* – ISA) koju je definirala Organizacija međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization* – ICAO) [23]. Međunarodna standardna atmosfera je ona u kojoj je na srednjoj razini mora temperatura +15 ° C, tlak 1013,25 hPa, a gustoća 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Pretpostavlja se da će se temperatura smanjivati s visinom stopom 0,65°C/100 m (6,5°C/1000m), odnosno 1,98°C/1000ft do 11 km, nakon čega ostaje konstantna u iznosu -56,5°C do 20 km. Zatim slijedi povećanje temperature od 0,1°C/100 m do visine 32 km [17, 23].

#### 4.2.1 Metoda procjene promjene visine s tlakom

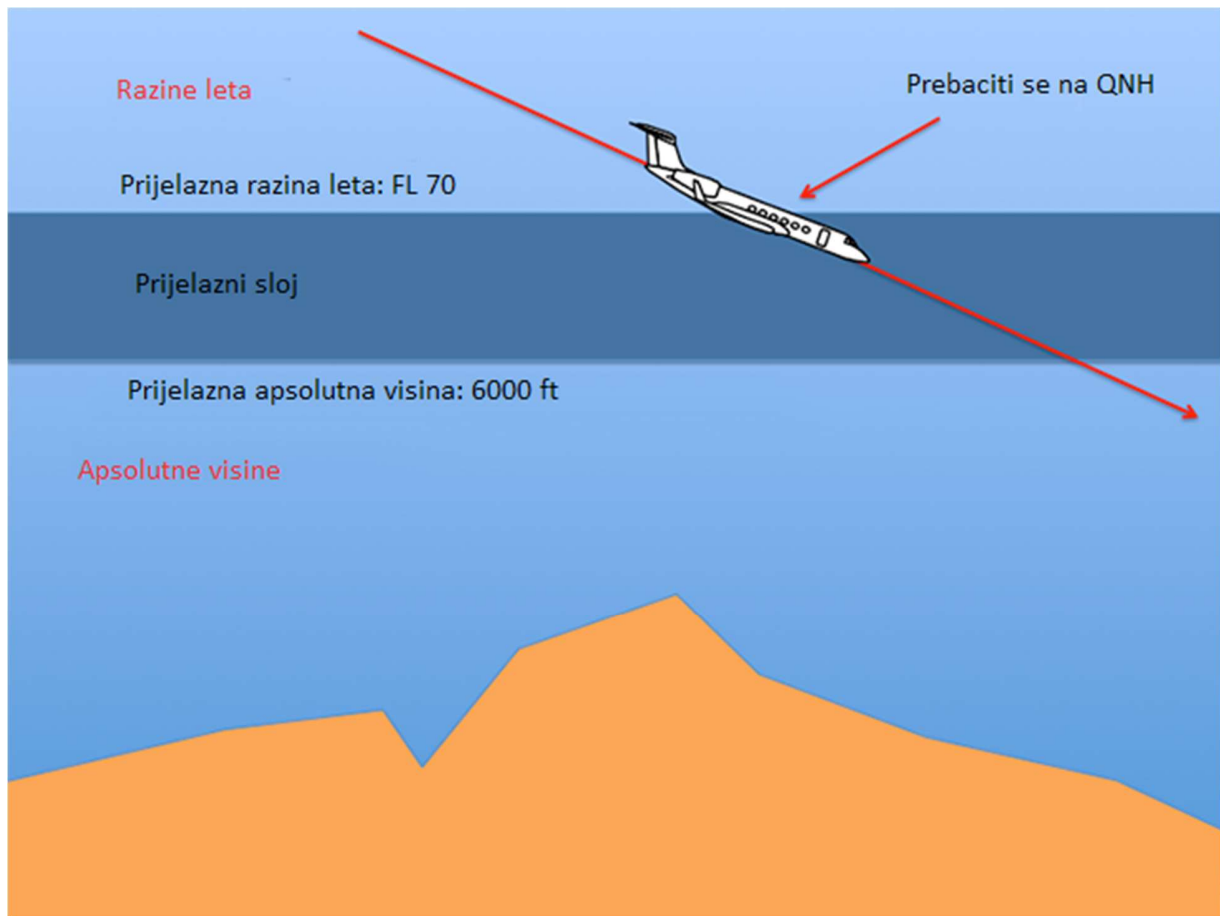
Visina leta u zrakoplovstvu se određuje postavkom tlaka zraka na visinomjeru. Vrijednosti visina uobičajeno se izražavaju u stopama. Postavke tlaka imaju oznake QNH, QFE i QNE. Ovisno o postavljenom tlaku zraka mijenjat će se vertikalna udaljenost zrakoplova od referentne razine, točke ili objekta koji se smatra točkom, a od koje se određuje visina. Odabir ispravne postavke tlaka ključan je za sigurnu provedbu leta. Postavkom QNH na visinomjeru se prikazuje apsolutna visina (engl. *altitude*), odnosno visina iznad srednje razine mora. Visinomjer će prikazivati elevaciju staze dok je zrakoplov na stazi. Postavkom QFE prikazuje se relativna visina (engl. *height*) s obzirom na aerodromsku referentnu točku. QNE je oznaka za apsolutnu visinu pri standardnom tlaku zraka koji iznosi 1013,25 hPa [23, 24].

Pravilna postavka tlaka u zrakoplovstvu usko je vezana uz prijelaznu apsolutnu visinu (engl. *transition altitude*) i prijelaznu razinu (engl. *transition level*). Prijelazna apsolutna visina predstavlja visinu na kojoj ili ispod koje se vertikalna pozicija zrakoplova određuje u odnosu na apsolutne visine. Prijelazna razina je prva najniža razina leta iznad prijelazne apsolutne visine koja se može koristiti. Prijelazni sloj (engl. *transition layer*) je zračni prostor između prijelazne apsolutne visine i prijelazne razine [25]. Zrakoplov koji leti na ili ispod prijelazne apsolutne visine ima postavljenu QNH postavku tlaka. Na slici 7 prikazan je pravilan postupak promjene postavke u QNE prilikom penjanja iznad prijelazne apsolutne visine i prema prijelaznoj razini.



Slika 7: Penjanje prema prijelaznoj razini, [26]

Na slici 8 prikazano je pravovremeno i pravilno mijenjanje postavke tlaka na QNH prilikom spuštanja ispod prijelazne razine i prema prijelaznoj apsolutnoj visini.



Slika 8: Spuštanje prema prijelaznoj apsolutnoj visini, [26]

Neuspjeh u postavljanju odgovarajuće postavke tlaka može dovesti do odstupanja od dozvoljene apsolutne visine ili razine leta što dovodi do probijanja zadane razine leta, gubitka vertikalnog odvajanja od drugog prometa, pa čak i sudara s drugim zrakoplovom ili s tlom (engl. CFIT – *controlled flight into terrain*) [24]. Važno je stoga razumjeti koliku vrijednost u visini iznosi razlika od 1 hektopaskala [hPa]. Promjena tlaka za 1 hPa događa se s porastom visine za približno 8 metara (približno 30 stopa) što se naziva barička stopa (G), prema izrazu (20):

$$1 \text{ hPa} \approx 30 \text{ ft} \quad (20)$$

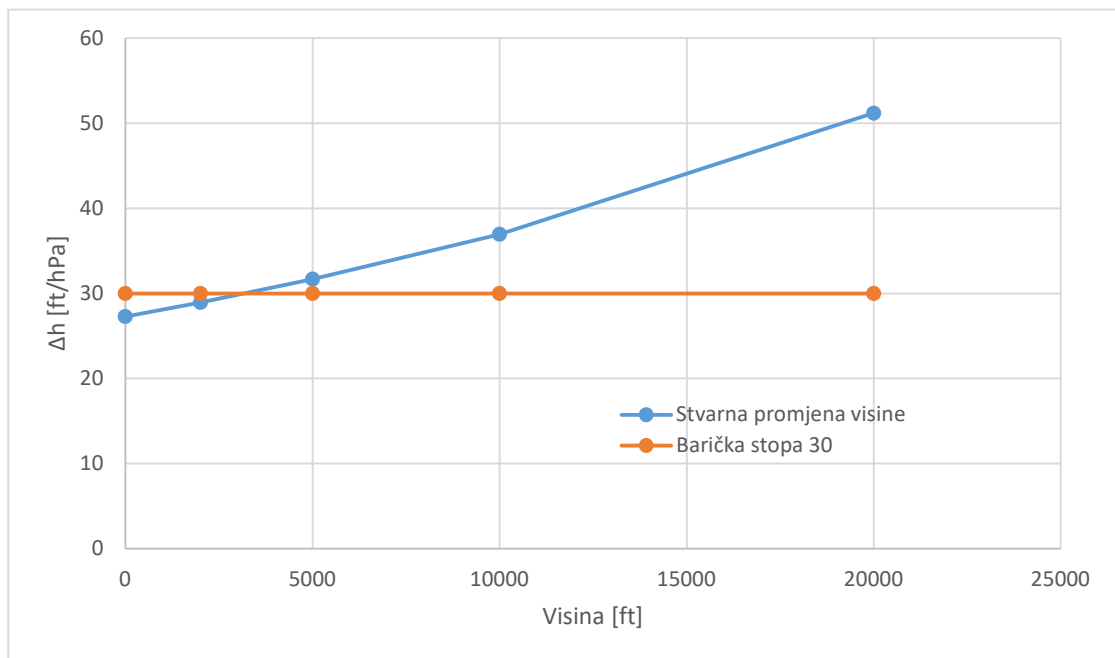
Barička stopa primarno ovisi o vrijednosti tlaka te se s povećanjem visine stalno povećava [5]. U tablici 9 prikazane su stvarne razlike u visini  $\Delta h$  izražene u [ft/hPa], ovisno o visini na kojoj je mjerenje provedeno. U trećem stupcu rezultati su uspoređeni s vrijednošću baričke stope 30 koja se obično uzima kao metoda brze procjene promjene visine s tlakom [17]

Tablica 9: Metoda procjene promjene visine s tlakom

|                                      |        |        |        |         |         |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Visina [ft]                          | 0      | 2000   | 5000   | 10000   | 20000   |
| $\Delta h$ [ft/hPa]                  | 27,29  | 28,94  | 31,67  | 36,94   | 51,21   |
| Razlika u odnosu na baričku stopu 30 | 9,93 % | 3,66 % | 5,27 % | 18,79 % | 41,42 % |

Izvor: [17]

Vrijednost do 5 % razlike u točnosti označena je tamno zelenom bojom, a one do 10 % točnosti žutom. Vrijednosti iznad 10 % označene su crveno bojom. Može se zaključiti kako je ovu metodu ispravno koristiti do otprilike 5000 stopa visine, a nakon toga procijenjene vrijednosti razlikuju se preko 5 % od stvarnih vrijednosti.



Grafikon 5: Usporedba stvarne promjene visine s tlakom u odnosu na procijenjenu vrijednost baričke stope

Grafikonom 5 pokazano je kako se vrijednosti procijenjene baričke stope 30 ft/hPa razlikuje za preko 5% na 5000 ft. Može se zaključiti kako je ovu metodu ispravno koristiti do otprilike 5000 stopa visine, a nakon toga procijenjene vrijednosti razlikuju se preko 5 % od stvarnih vrijednosti.

#### 4.2.2 Preračunavanje mjernih jedinica postavke tlaka

Najčešće korištene mjerne jedinice za postavke tlaka visinomjera su hektopaskali, koji se još nazivaju i milibari [mbar] te inči žive [in Hg]. U Europi se koriste hPa kao primarna postavka visinomjera, dok je unutar Sjeverne Amerike primarna postavka inch Hg [27]. U nastavku su navedene najčešće korištene mjerne jedinice za tlak zraka te njihov međusobni odnos:

- $1 [\text{in Hg}] = 33.86 [\text{mbar}] = 33.86 [\text{hPa}] = 25.4 [\text{mm Hg}]$
- $1 [\text{mm Hg}] = 1.33 [\text{mbar}] = 1.33 [\text{hPa}] = 0.0394 [\text{in Hg}]$
- $1 [\text{mbar}] = 0.75 [\text{mm Hg}] = 1 [\text{hPa}] = 0.0295 [\text{in Hg}]$

Jedna od metoda pretvorbe Hpa u inch Hg sastoji se od memoriranja činjenice da je 1016 hPa jednako 30.00 in Hg, a uz to je poznato da 1 hPa iznosi otprilike 0.03 in Hg. Stoga je samo potrebno zapamtiti nominalnu vrijednost 1016hPa ili 30 in Hg, ovisi o mjernoj jedinici postavke, te samo dodavati ili oduzimati po 1 hPa, odnosno 0.03 in Hg:

$$1016 \text{ hPa} \approx 30.00 \text{ in Hg}$$

$$1 \text{ hPa} \approx 0.03 \text{ in Hg}$$

Dakle, tlak od 1015 hPa jednak je 29.97 in Hg, a tlak od 1030 hPa jednak je 30.42 in Hg. S obzirom na to da je 1 hPa službeno izmjeren kao 0.0295 in Hg, a procijenjena vrijednost od 0.03 in Hg razlikuje se za 1,69 %, logično je da je ova metoda procjene zadovoljavajuća na temelju točnosti. Što se jednostavnosti tiče, metodu je lako koristiti za vrijednosti slične 1016, odnosno 30.00, no ako se vrijednost razlikuje za nekoliko desetica, npr. tlak od 1050 hPa, račun postaje kompliciraniji za procijeniti. Međutim, u praktičnoj primjeni to je rijedak slučaj pa je metoda jednostavna za korištenje u većini stvarnih situacija preračunavanja postavki tlaka [17].

### 4.2.3 Preračunavanje mjernih jedinica temperature

Prema SI sustavu jedinica, mjerna jedinica za temperaturu je kelvin [K]. U stvarnosti se još koriste Celzijevi stupnjevi [ $^{\circ}\text{C}$ ] te Fahrenheitovi stupnjevi [ $^{\circ}\text{F}$ ]. Pretvorba između navedenih mjernih jedinica prikazana je u izrazima (21), (22), (23) [13]:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9 \cdot [^{\circ}\text{C}]}{5} + 32 \quad (21)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} ([^{\circ}\text{F}] - 32) \quad (22)$$

$$^{\circ}\text{K} = [^{\circ}\text{C}] + 273 \quad (23)$$

Točan postupak preračunavanja Fahrenheitovih stupnjeva u Celzijeve i Celzijevih u Fahrenheitove nije intuitivan, no postoji metoda bržeg proračuna, opisana u izrazima (24), (25):

$$[^{\circ}\text{F}] = 2 \cdot [^{\circ}\text{C}] + 30 \quad (24)$$

$$[^{\circ}\text{C}] = \frac{([^{\circ}\text{F}] - 30)}{2} \quad (25)$$

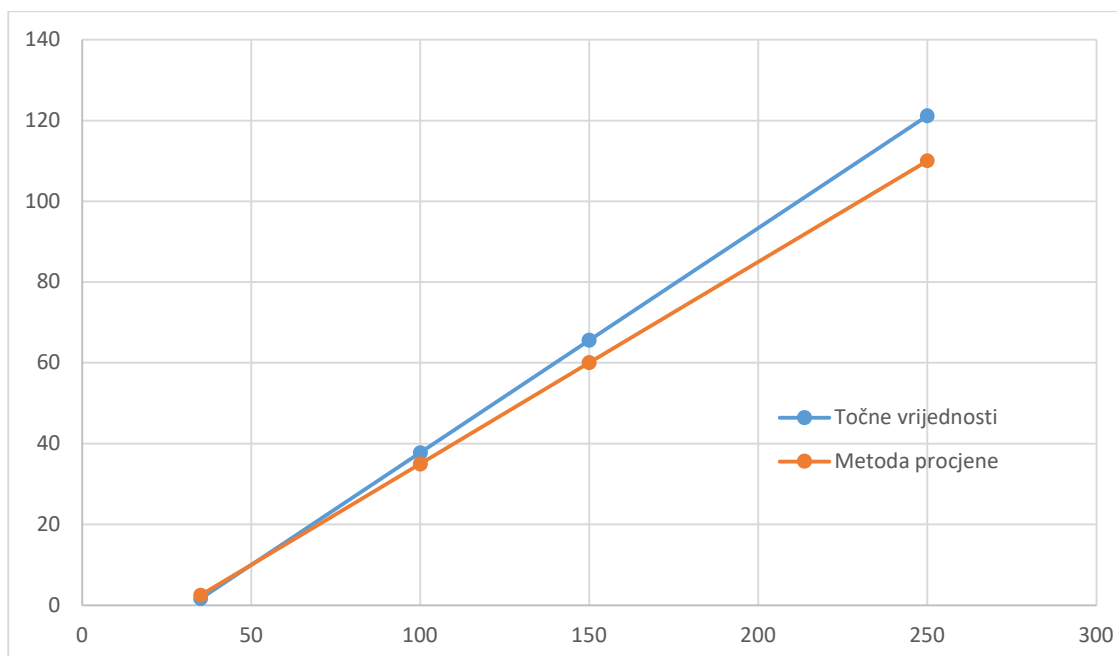
U tablici 10 ova je metoda procjene preračunavanja temperature uspoređena sa stvarnim preračunatim vrijednostima. Ako su odstupanja od stvarne vrijednosti veća od 10 %, red je označen crvenom bojom, ako su odstupanja od 5 do 10 %, red je označen žutom bojom, a tamno zelenom bojom označeni su oni redovi gdje su odstupanja manja od 5 % [28].

Tablica 10: Metoda procjene preračunavanja temperature

| Temperatura | Stvarna preračunata vrijednost | Metoda procjene      | Procijenjena preračunata vrijednost | Odstupanje procijenjene vrijednosti od stvarne |
|-------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| 150°C       | 302°F                          | $2 \cdot 150 + 30$   | 330°F                               | 9,27 %                                         |
| 29,6°C      | 85,28°F                        | $2 \cdot 29,6 + 30$  | 90°F                                | 5,53 %                                         |
| 57°F        | 13,89°C                        | $\frac{57 - 30}{2}$  | 14°C                                | 0,79 %                                         |
| 250°F       | 121,11°C                       | $\frac{250 - 30}{2}$ | 110°C                               | 9,1 %                                          |

Izvor: [28]

Vidljivo je kako je procijenjene vrijednosti uglavnom odstupaju od stvarnih 5 do 10 %. Metoda znatno olakšava i skraćuje postupak koji se inače koristi za preračunavanje mjernih jedinica temperature no nije precizna i stoga se nebi trebala koristiti za egzaktne proračune temperature [28].



Grafikon 6: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja fahrenheit u celzijeve stupnjeve



U grafikonu 6 prikazan je raspon odstupanja procijenjenih vrijednosti preračunavanja fahrenheitita u celzijeve stupnjeve od stvarnih od 1 do 10%. Sa porastom temperature greška metode procjene se povećava.

### 4.3 Proračuni vezani uz gorivo

Prije polijetanja nije potrebno samo planiranje rute leta. Očekivana potrošnja goriva također se mora izračunati kako bi se osigurala odgovarajuća opskrba gorivom, kako za let koji ide prema planu, tako i za neočekivane situacije. Za izračun mase i težišta zrakoplova, raspoloživo gorivo zrakoplova mora biti poznato u jedinicama mase, kao i protok goriva (koji je konstantan u jedinicama mase) za datu postavku snage. No, neovisno o masi, spremnici goriva u zrakoplovu mogu držati samo određeni volumen goriva. Stoga pilot mora biti sposoban preračunavati vrijednosti goriva između volumena i mase [29].

Masa može biti izražena u različitim mjernim jedinicama, pretežno u funtama [lbs], kilogramima [kg], a ponekad i u tonama [t]. Primjenjuju se sljedeći faktori konverzije:

$$1 \text{ lb} = 0,454 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 2,205 \text{ lbs}$$

$$1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 0,001 \text{ t}$$

Metoda procjene pretvorbe između funti i kilograma glasi:

$$m [\text{lb}] = m [\text{kg}] \cdot 2 + 10 \% \quad (26)$$

$$m [\text{kg}] = \frac{m [\text{lb}]}{2} - 10 \% \quad (27)$$

U tablici 11 provjereno je odstupanje procijenjene preračunate mase od stvarne preračunate vrijednosti.

Tablica 11: Mentalno preračunavanje mjernih jedinica mase

| Masa     | Stvarna preračunata vrijednost | Metoda procjene            | Procijenjena preračunata vrijednost | Odstupanje procijenjene vrijednosti od stvarne |
|----------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| 100 kg   | 220,5 lbs                      | $100 \cdot 2 \cdot 1,1$    | 220 lbs                             | 0,22 %                                         |
| 1573 kg  | 3468,465 lbs                   | $1573 \cdot 2 \cdot 1,1$   | 3475 lbs                            | 0,19 %                                         |
| 4500 lbs | 2043 kg                        | $\frac{4500}{2} \cdot 0,9$ | 2000 kg                             | 2,1 %                                          |
| 673 lbs  | 305.542 kg                     | $\frac{673}{2} \cdot 0,9$  | 305 kg                              | 0,17 %                                         |

Izvor: [17]

Vidljivo je da su procijenjene vrijednosti iznimno točne, sve se nalaze otprilike unutar 3 % stvarnih preračunatih vrijednosti.

Volumen se često izražava u litrama [l], U.S. galonima [US gal] ili imperijalnim galonima [IMP gal], koji se međusobno mogu preračunavati na sljedeći način:

$$1 \text{ US gal} = 3,7854 \text{ l} = 0,8327 \text{ IMP gal}$$

$$1 \text{ l} = 0,264 \text{ US gal} = 0,2 \text{ IMP gal}$$

$$1 \text{ IMP gal} = 4,5461 \text{ l} = 1,2009 \text{ US gal}$$

Gustoća  $\rho$ , koja se ponekad naziva i specifična gustoća, je omjer mase i volumena, a računa se prema izrazu (28) :

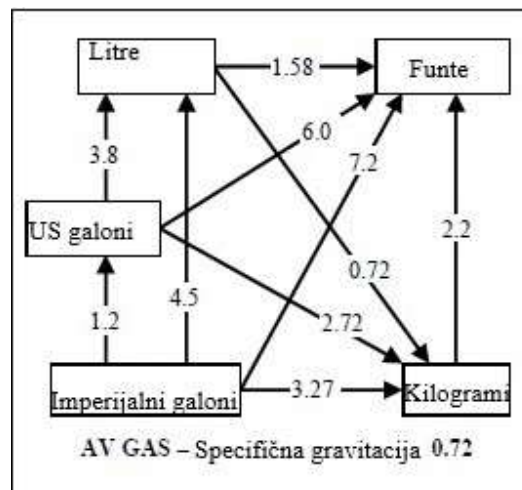
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (28)$$

Mjerna jedinica je  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , a u avijaciji se često koristi i  $[\text{kg}/\text{l}]$ . Slijede primjeri tipičnih gustoća za civilno zrakoplovstvo [29]:

AvGas: 0,73 – 0,78  $\text{kg}/\text{l}$

Jet A: 0,77 – 0,82  $\text{kg}/\text{l}$

Jet B: 0,75 – 0,80  $\text{kg}/\text{l}$



Slika 9: Faktori preračunavanja volumena i mase, [17]

Na slici 9 prikazani su faktori konverzije većine mjernih jedinica mase i volumena korištenih u zrakoplovstvu. Faktori preračunavanja između dvije mjerne jedinice volumena, i među dvije mjerne jedinice mase uzete su iz službenih vrijednosti preračunavanja. Za specifičnu gustoću uzeta je vrijednost 0,72  $\text{kg}/\text{l}$ . To znači da je vrijednost 1 l jednaka 0,72 kg. Iz toga su izvedeni faktori preračunavanja galona u kilograme, odnosno vrijednost galona u litrama pomnožena s 0,72 daje vrijednost galona u kilogramima. Da bi se zatim dobila vrijednost volumena u funtama, potrebno je sve već dobivene vrijednosti pomnožiti s 2.2. Ova metoda vrlo je teško izvediva u sklopu mentalnog proračuna, ali je u potpunosti točna jer je izvedena iz službenih vrijednosti preračunavanja. Jedine konverzije koje se mogu u kratkom periodu provesti mentalno su:

a) Pretvorba  $[\text{US gal}]$  u  $[\text{l}]$ :

$$1 \text{ US gal} = 4 \text{ l}$$

Ova metoda procjene razlikuje se od stvarne preračunate vrijednosti od 3,8 l za 5 %.

b) Pretvora [US gal] u [lbs]:

$$1 \text{ US gal} = 6 \text{ lbs}$$

Stvarna vrijednost iznosi:

$$1 \text{ US gal} = 3,7854 \cdot 0,72 \cdot 2,2 = 5,996 \text{ lbs}$$

Preračunate vrijednosti razlikuju se za manje od 1 % [17].

#### 4.4 Usporedba metoda po točnosti

U tablici 12 metode procjene preračunavanje mjernih jedinica putem mentalnih proračuna poredani su po točnosti na temelju odstupanja od stvarnih vrijednosti. Mentalni proračuni u kojima odstupanja iznose i preko 5 % naznačeni su žutom bojom.

Tablica 12: Poredak metoda procjene na temelju odstupanja

| Parametar              | Mentalni proračun                     | Odstupanje |
|------------------------|---------------------------------------|------------|
| Tlak                   | Preračunavanje [hPa] i [inHg]         | 0 %        |
| Masa                   | Preračunavanje [kg] i [lbs]           | < 3 %      |
| Visina                 | Obje metode preračunavanja [ft] i [m] | < 3 %      |
| Udaljenost             | Preračunavanja [NM] i [km]            | < 5 %      |
| Gorivo; volumen i masa | Preračunavanja iz volumena u masu     | 1 - 5 %    |
| Temperatura            | Preračunavanje [°F] i [°C]            | 1 - 10 %   |
| Visina i tlak          | Proračun promjene visine s tlakom     | 5 - 20 %   |

## 5 Proračuni u sklopu pripreme navigacijskog leta

U sklopu pripreme navigacijskog leta uvodi se potreba za planiranje i ucrtavanje kursa na zrakoplovnu kartu, odabir kontrolnih točaka uz odgovarajuće visine na tim točkama, mjerenje udaljenosti, poznavanje relevantnih meteoroloških informacija, pogotovo u vezi vjetera, računanje trajanja leta, pravaca leta te goriva potrebnog za sigurnu provedbu leta [16]. Vrijeme potrebno za navigacijske proračune u zraku potrebno je svesti na minimum kako se ne bi ugrozila sigurnost leta. Stoga je što više proračuna potrebno izvršiti prilikom planiranja leta na tlu. U zraku je potrebno održavati najviše moguće standarde točnosti u odnosu na smjer i pravac leta, te brzinu i visinu, pa je te parametre potrebno što je točnije proračunati na zemlji [9]. Po tome bi se moglo pretpostaviti da nema smisla proračune u sklopu pripreme navigacijskog leta vršiti napamet, međutim, neki od točnih proračuna su jednostavno podosta dugi i kompleksni, dok su mentalni proračuni prilično točni sami po sebi i dostatni da se koriste u pripremi leta.

Za pravilnu pripremu i provedbu leta potrebno je poznavati i razlikovati izraze:

- Kurs leta (engl. *Course*)
- Smjer leta (engl. *Track*)
- Pravac leta (engl. *Heading*)

Kurs leta je kut mjeren u smjeru kretanja kazaljke na satu od pravca sjevera do namjeravane putanje leta zrakoplova iznad površine zemlje. Kako pravac sjevera ovisi o tome je li on definiran u odnosu na pravi ili geografski ( $N_T$ ), magnetski ( $N_M$ ) ili kompasni ( $N_C$ ), tako i kurs može biti pravi kurs (engl. *true course*), magnetski kurs (engl. *magnetic course*) ili kompasni kurs leta (engl. *compass course*).

Smjer leta je kut mjeren u smjeru kretanja kazaljke na satu od pravca sjevera do stvarne putanje leta zrakoplova u odnosu na površinu zemlje. Ovisno o referenciji prema kojoj je definiran smjer sjevera, može biti pravi smjer (engl. *true track*), magnetski smjer (engl. *magnetic track*) ili kompasni smjer leta (engl. *compass track*).

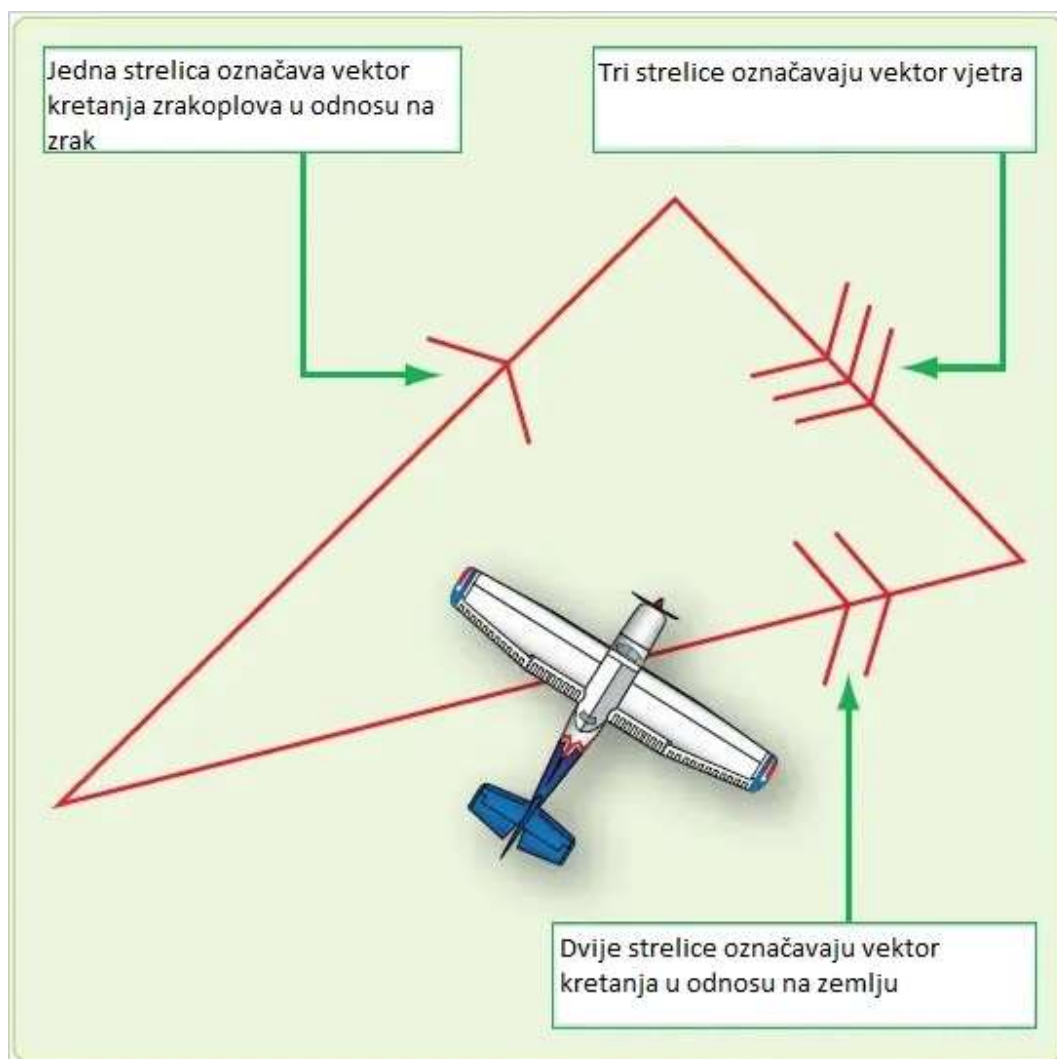
Pravac leta je kut mjeren u smjeru kretanja kazaljke na satu od pravca sjevera do pravca koji se podudara s uzdužnom osi zrakoplova. Ovisno o referenciji prema kojoj je definiran smjer sjevera,

može biti pravi (engl. *true heading*), magnetski (engl. *magnetic heading*) ili kompasni pravac leta (engl. *compass heading*) [5].

## 5.1 Određivanje pozicije zrakoplova

Već spomenuta navigacija bazirana na metodi deduktivnog zaključivanja po definiciji je metoda navigacije koja uključuje određivanje vlastite pozicije računanjem udaljenosti putem poznate ili procijenjene brzine i vremena koje je proteklo. Kako je precizno mjerenje vremena relativno jednostavno i pouzdano, najveći izvor grešaka su pogreške mjerenja brzine. Te se greške s vremenom višestruko povećavaju.

U potpuno mirnoj atmosferi, zrakoplov kroz zrak prolazi jednakom brzinom i putanjom kao i u odnosu na tlo. U stvarnosti, međutim, zračne se mase stalno kreću, proizvodeći pritom vjetar. Vjetar je definiran kao vodoravno kretanje zračne mase po površini. Sve što nije učvršćeno na površinu pomiče se u smjeru zračne mase. To uključuje, primjerice, avione i oblake. Za izračun smjera i brzine zrakoplova unutar zračne mase, potrebno je znati smjer i brzinu vjetra. Jedan od načina za to je koristeći trokut vjetra, odnosno navigacijski trokut.



Slika 10: Navigacijski trokut, [30]

Navigacijski trokut prikazan je slikom 10, a čine ga tri vektora:

- Vektor kretanja zrakoplova u odnosu na zrak (engl. *air vector*)
- Vektor vjetra (engl. *wind vector*)
- Vektor kretanja zrakoplova u odnosu na zemlju (engl. *ground vector*)

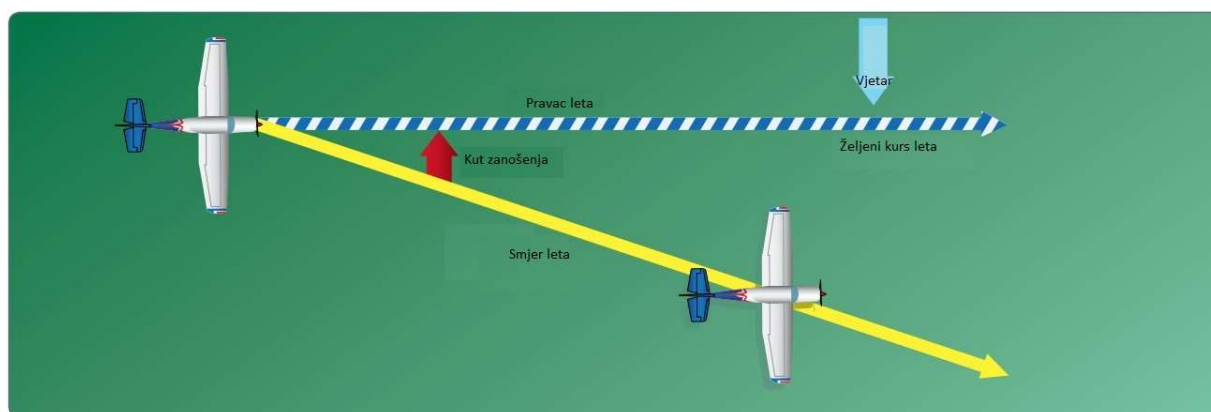
Vektor kretanja zrakoplova kroz zrak označava pravi pravac leta zrakoplova te stvarnu brzinu.

Vektor vjetra označava brzinu vjetra te smjer iz kojeg puše. Vektor kretanja zrakoplova u odnosu

na zemlju rezultirajući je vektor dvaju već navedenih vektora. On uključuje brzinu leta zrakoplova u odnosu na zemlju i pravi smjer, odnosno putanju kretanja zrakoplova u odnosu na površinu zemlje [5, 31].

Brzina zrakoplova u odnosu na zrak ista je kao njegova brzina u odnosu na zemlju, u uvjetima kad nema vjetra. Tako će zrakoplov za 30 minuta prijeći udaljenost od 60 NM. Međutim, ako postoji kretanje zraka (dakle vjetar jačine 20 kt) koji zračnu masu pomiče u istom smjeru u kojemu zrakoplov leti brzinom, kaže se da na let zrakoplova utječe leđni vjetar ili leđna komponenta vjetra ( $+u_{uzd}$  ili engl. *Tail Wind Component* – TWC). U slučaju da se zračna masa kreće suprotno od smjera kretanja zrakoplova također brzinom od 20 kn, kaže se da na let zrakoplova utječe čeon vjetar ili čeon komponenta vjetra ( $-u_{uzd}$  ili engl. *Head Wind Component* – HWC). Obje ove komponente skupno se nazivaju uzdužnim komponentama vjetra [5]. Kada se čeon ili leđna komponenta pridodaju brzini zrakoplova kroz zrak, dobiva se već spomenuta putna brzina, odnosno brzina zrakoplova u odnosu na tlo.

Ako pilot predodredi namjeravanu putanju leta zrakoplova, odnosno kurs, te ju pokuša održati održavajući identičan pravac leta u uvjetima s vjetrom, smjer leta razlikovati će se od kursa. Kut između tih putanja, stvarne i namjeravane, naziva se kut zanošenja (engl. *Drift Angle* (DA)), a prikazan je slikom 11.



Slika 11: Kut zanošenja, [16]

Određivanjem kuta zanošenja, pilot može poništiti utjecaj vjetra i upravljati avionom tako da poništi efekt vjetra i provede let u kojem se stvarna i željena putanja podudaraju. Ako vjetrovi pušu



s lijeve strane, zrakoplov se kreće prema desno, a ispravka se mora izvršiti okretanjem uzdužne osi zrakoplova dovoljno lijevo da nadoknadi ovo zanošenje. Drugim riječima, ako vjetar slijeva, korekcija se vrši okretanjem zrakoplova ulijevo za određeni broj stupnjeva, time ispravljajući kut zanošenja vjetra. Tim okretanjem dobiva se kut korekcije vjetra (engl. *Wind Correction Angle* (WCA)) i izražava se u stupnjevima desno ili lijevo od pravog kursa [16].

Vrijednost kuta zanošenja u odnosu na namjeravanu putanju leta, odnosno kuta ispravke za kretanje namjeravanom putanjom, ovisi o bočnoj komponenti vjetra ( $u_{pop}$  ili engl. *Cross Wind Component* - CWC). Bočna komponenta vjetra u odnosu na pravac uzdužne osi zrakoplova može biti lijeva ili desna.

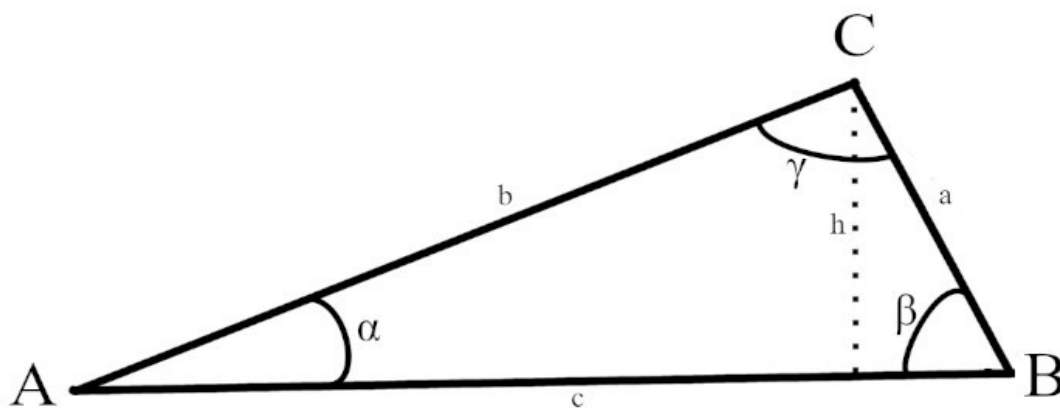
Iz svega ovoga jasno je kako je za rješavanje navigacijskog trokuta potrebno poznavati komponente vektora vjetra. U nastavku su obrađene dvije metode preciznog rješavanja navigacijskog trokuta (grafička metoda, trigonometrijska metoda), te dvije metode rješavanja navigacijskog trokuta napamet (Metoda izračuna kuta zanošenja prema njegovoj maksimalnoj vrijednosti, Metoda izračuna kuta ispravke prema poznatim trigonometrijskim vrijednostima upadnoga kuta vjetra). Značajno je naglasiti da se u svim metodama uvijek koristi podatak o pravom kursu leta zrakoplova (engl. *true course*) jer je vektor vjetra uvijek zadan u odnosu na pravi sjever [5].

### **5.1.1 Precizni proračuni rješavanja navigacijskog trokuta**

Dvije metode koje se često koriste prilikom točnog računanja navigacijskog trokuta su grafička i trigonometrijska metoda.

Grafička metoda rješavanja navigacijskog trokuta podrazumijeva crtanje vektora u pripadajućem mjerilu izravno na navigacijsku kartu. Grafičkom metodom se razmjerno precizno mogu odrediti traženi navigacijski elementi bez računanja, no navigacijski trokut može se riješiti i putem trigonometrije trokuta. Neki tu metodu smatraju nepotrebnom jer njena točnost premašuje točnost dostupnih podataka koji su piloti poznati, pošto se uvjeti atmosfere i zračnih masa stalno mijenjaju. S druge strane, grafička je metoda spora, zahtijeva pribor za crtanje i neprikladna je za rad u malom prostoru kabine zrakoplova. Iz te je perspektive trigonometrijska metode proračuna prikladnija, a osobito uz korištenje računala [5, 30].

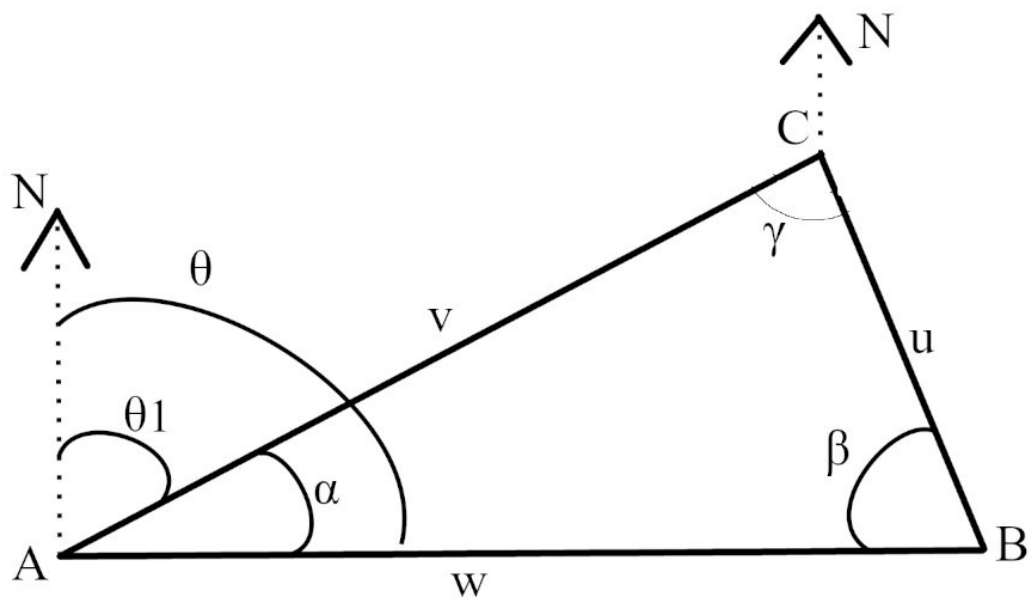
Trigonometrijskom sinusnom metodom određuje se odnos stranica i kutova u pravokutnom trokutu, prikazanom na slici 12.



Slika 12: Pravokutni trokut, [5]

$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c} \quad (29)$$

Sinusov poučak koristi se za izračun trokuta u kojemu je zadana jedna stranica i dva kuta ili dvije stranice i kut koji leži nasuprot jednoj od tih stranica. To je moguće primijeniti na navigacijski trokut vjetra. Na slici 13 prikazan je navigacijski trokut kojem vektor koji spaja točke A i C predstavlja TAS.

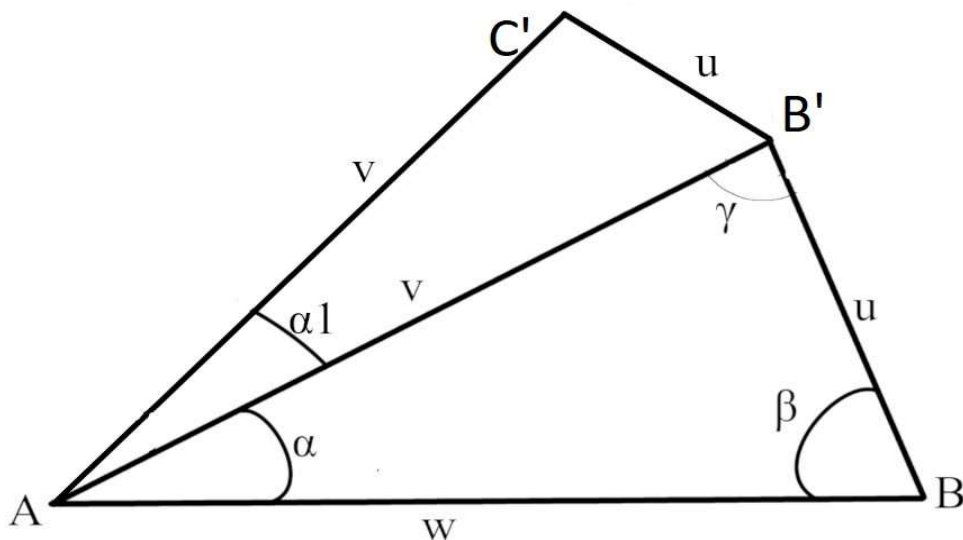


Slika 13: Trigonometrija navigacijskog trokuta, [5]

Dužina AB u mjerilu prikazuje rezultirajuću putanju zrakoplova, odnosno smjer leta i putnu brzinu u odnosu na zemlju. Kut  $\theta$  je kurs leta zrakoplova, a kut  $\theta_1$  stvarni putni kut ili smjer leta. Time je definiran kut zanošenja  $\alpha$  (engl. *Drift Angle*, DA), odnosno kut između kursa (planirane putanje leta) i smjera leta (stvarne putanje leta). Ucertavanjem vektora vjetra  $w$  u točki C dobije se trokut ABC u kojem vrijede:

$$\sin \alpha = \frac{u}{w}$$

$$\sin \beta = \frac{v}{w}$$



Slika 14: Translacija trokuta oko točke A, [4]

Vektor planirane brzine leta  $AC'$  sada je jednak vektoru  $AC$ , a kut zanošenja  $\alpha$  jednak je kutu ispravke  $\alpha_1$  (engl. *Wind Correction Angle*, WCA). Zbog toga je vektor vjetra  $C'B'$  po iznosu jednak vektoru  $CB$ , a upadni kut vjetra ( $\beta$ ) ostaje isti. Tako će zrakoplov, ako je uzdužna os usmjerena vektorom  $AC'$  i on leti istom brzinom  $u$  odnosu na zrak (TAS), održavati zadanu putanju leta  $AC$ , ali će u točku  $C$  stići ranije od predviđenog vremena. Ako je namjera da se u točku  $C$  stigne točno u predviđeno vrijeme kao u uvjetima bez vjetra, treba pri istom vjetru povećati kut ispravke i smanjiti namjeravanu brzinu leta.

U trokutu ispravke vrijedi izraz (31):

$$\frac{\sin \beta}{v} = \frac{\sin \alpha_1}{u} \quad (31)$$

Iz toga se kut ispravke računa preko izraza (32):

$$\sin \alpha_1 = \frac{u \cdot \sin \beta}{v} \quad (32)$$

Iz kosinusovog poučka, koji govori da je kvadrat stranice trokuta jednak zbroju kvadrata drugih dviju stranica smanjenom za dvostruki umnožak tih stranica, pomnoženim s kosinusom kuta koji one zatvaraju, može se dati izraz (33) za putnu brzinu u trokutu ispravke za vjetar [5]:

$$w^2 = v^2 + u^2 - 2 \cdot v \cdot u \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1 - \beta) \quad (33)$$

### 5.1.2 Računanje pozicije zrakoplova napamet

Metoda izračuna kuta zanošenja prema njegovoj maksimalnoj vrijednosti podrazumijeva izračun kuta zanošenja zrakoplova za vektor vjetra u odnosu na maksimalni kut zanošenja ( $\alpha_{\max}$ ), bez obzira na kurs leta i upadni kut vjetra. Maksimalni kut zanošenja pretpostavlja da je vektor vjetra usmjeren pod  $90^\circ$  u odnosu na kurs leta, odnosno da postoji samo bočna komponenta vjetra. Izraz (34) za maksimalni kut zanošenja je:

$$\alpha_{\max} = \frac{u}{v} \cdot 60 \quad (34)$$

U ovoj je metodi kut zanošenja jednak kutu ispravke ( $\alpha = \alpha_1$ ), što u grafičkoj i trigonometrijskoj metodi nije slučaj. Zbog toga, navedenom metodom se može s dovoljnom točnošću izračunati jedino kut zanošenja, a odstupanja prilikom računanja kuta ispravke bit će veća. Uz proračunati  $\alpha_{\max}$  treba poznavati i upadni kut vjetra u odnosu na kurs leta ( $\beta$ ), što se dobiva poznavanjem vektora vjetra (smjera iz kojega vjetar puše). U tablici 13 prikazan je način izračuna kuta ispravke i putne brzine ovisno o upadnom kutu vjetra. Upadni kut ima vrijednosti od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  za lijevu ili desnu bočnu komponentu vjetra i aproksimira se na jednu od ponuđenih vrijednosti (npr. ako je  $\beta = 27^\circ$ , uzet će se vrijednost od  $30^\circ$ ).

Tablica 13: Računanje kuta ispravke i putne brzine napamet

| $\beta$  | $0^\circ$ | $30^\circ$                  | $60^\circ$                  | $90^\circ$      | $120^\circ$                 | $150^\circ$                 | $180^\circ$ |
|----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| $\alpha$ | $0^\circ$ | $\frac{1}{2} \alpha_{\max}$ | $\frac{3}{4} \alpha_{\max}$ | $\alpha_{\max}$ | $\frac{3}{4} \alpha_{\max}$ | $\frac{1}{2} \alpha_{\max}$ | $0^\circ$   |
| w        | $v - u$   | $v - \frac{3}{4} u$         | $v - \frac{1}{2} u$         | $v$             | $v + \frac{1}{2} u$         | $v + \frac{3}{4} u$         | $v + u$     |

Izvor: [5]

Druga metoda je metoda izračuna kuta ispravke prema poznatim trigonometrijskim vrijednostima upadnoga kuta vjetra. Temelji se na unaprijed poznatim trigonometrijskim vrijednostima aproksimiranih vrijednosti upadnih kutova vjetra na kurs leta zrakoplova. One su prikazane tablicom 14.

Tablica 14: Aproksimacija sinusa i kosinusa upadnog kuta

| $\beta$               | aproksimacija | $\sin \beta$ | $\cos \beta$ |
|-----------------------|---------------|--------------|--------------|
| $0^\circ - 20^\circ$  | $0^\circ$     | -            | -            |
| $21^\circ - 35^\circ$ | $30^\circ$    | 0,5          | 0,9          |
| $36^\circ - 50^\circ$ | $45^\circ$    | 0,7          | 0,7          |
| $51^\circ - 70^\circ$ | $60^\circ$    | 0,9          | 0,5          |
| $71^\circ - 90^\circ$ | $90^\circ$    | 1            | 0            |

Izvor: [5]

Kad se vektor vjetra rastavi na bočnu i uzdužnu komponentu u odnosu na kurs leta zrakoplova, vrijede izrazi (35) i (36):

$$u_{\text{pop}} = u \cdot \sin \beta \quad (35)$$

$$u_{\text{uzd}} = u \cdot \cos \beta \quad (36)$$

Kut ispravke nadalje prema izrazu (37) glasi [5]:

$$\alpha_1 = u_{\text{pop}} \cdot \frac{60}{v} \quad (37)$$

Dok se putna brzina računa prema izrazu (38):

$$w = v + u_{\text{uzd}} \quad (38)$$

## 5.2 Navigacijski plan leta

Navigacijski plan leta (engl. Navigation Log, NAVLOG) alat je koji se koristi za usmjeravanje planiranja prije leta i egzekuciju samog leta. Vrijednosti dobivene navigacijskim planom predstavljaju centralizirani skup svih potrebnih podataka na jednom lako čitljivom mjestu [32].

U nastavku su opisani neki od mentalnih proračuna na primjeru jednog navigacijskog plana leta izrađenog u svrhu leta s Lučkog prema Mariboru i zatim nazad na Lučko, prikazanog slikom 15. Let se izvršio zrakoplovom Cessna 172 registracije 9A-DMB.

[illegible]

*Slika 15: Navigacijski plan leta [33]*

Promatrajući vrijednosti u stupcima ALT i CAS, odnosno podatke o visini na ruti i kalibriranoj brzini, moguće je odrediti TAS (v). Ako se za primjer uzme etapa N2 – PETOV, visina iznosi 6000 ft. Točnim preračunavanjem može se izračunati da je visina 1828,8 m. No ako pilot poželi koristiti metodu procjene preračunavanja [ft] u [m], vrijednost 6000 treba pomnožiti s 3 pa podijeliti s 10.

Time se dobije rezultat od 1800 metara, odnosno odstupanje od 1,57 % od stvarne vrijednosti. Za visinu 1828 m iz izraza (13) slijedi:

$$\rho = 1,225 \cdot (1 - 2,256 \cdot 10^{-5} \cdot 1828,8)^{4,256}$$

$$\rho = 1,023904 \text{ kg/m}^3$$

Poznavajući podatak o avionu da mu je CAS jednak 100 kn, uvrštavanjem u izraz (11) dobije se:

$$v = 100 \cdot \sqrt{\frac{1,225}{1,023904}} = 109,38012 \text{ kn}$$

U navigacijskom planu korištena je metoda procjene prirasti vrijednosti TAS (v) u odnosu na CAS oko 2 % svakih 1000 stopa visine leta, te je dobivena vrijednost od 112 kn. Odstupanje od stvarne izračunate vrijednosti TAS je 2,4 %. Odstupanje se poklapa s već dokazanim odstupanjem u tablici 4.

Stupac TC stoji za pravi kurs, dok u rubrici wind stupci “*dir*” i “*vel*” predstavljaju smjer i jačinu vjetra na visini. Vrijednost pravog kursa dobivena je ucrtavanjem namjeravane rute na kartu te mjerenjem tog kursa leta između točki rute, u odnosu na pravi sjever. Stupac WCA predstavlja kut ispravke vjetra, koji se nakon proračuna dodaje ili oduzima od pravog kursa kako bi se izračunala vrijednost pravog pravca leta. U ovom konkretnom navigacijskom planu WCA računat je metodom izračuna kuta ispravke prema poznatim trigonometrijskim vrijednostima upadnoga kuta vjetra. Te su vrijednosti upisane u stupac WCA, a u tablici 15 su uspoređene s metodom izračuna kuta zanošenja (a time i kuta ispravke) prema njegovoj maksimalnoj vrijednosti. Uz to, za obje je metode ispitano odstupanje od točnog proračuna WCA putem trigonometrijske metode.

U tablici 15 za trigonometrijsku metodu korišten je izvedeni izraz (32), a metode izračuna kutova zanošenja i ispravke napamet izračunate su bez kalkulatora pomoću tablice 13 i preko izraza (37). Podaci o smjeru i jačini vjetra te pravi kurs iščitani su iz navigacijskog plana leta prikazanog slikom 15 [33].

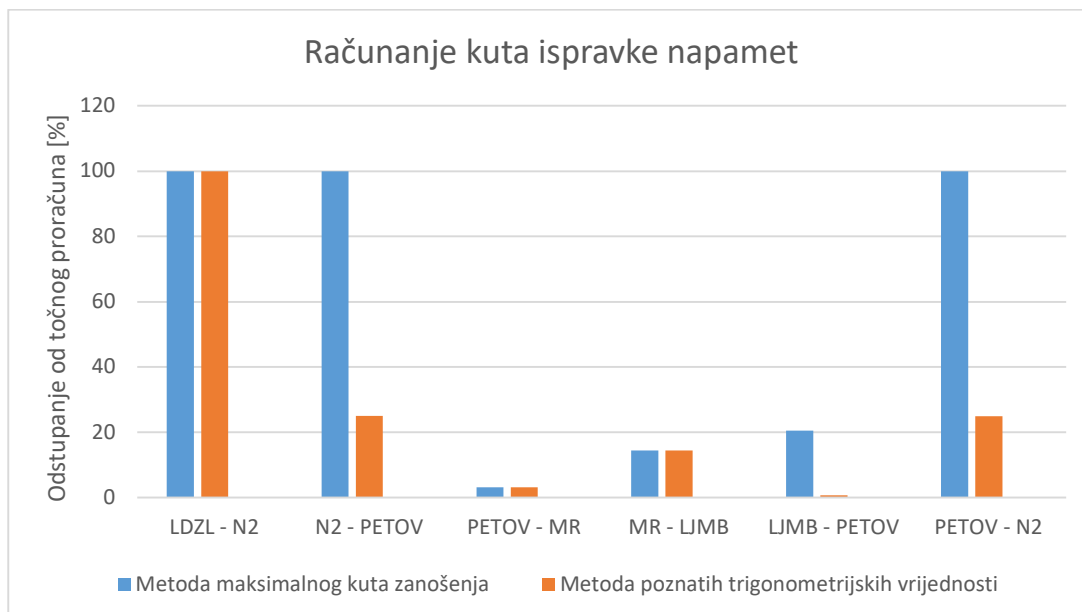


Tablica 15: Odstupanja metoda računanja kuta ispravke napamet

| Etapa      | WCA trigonometrijskom metodom | WCA metodom maksimalnog kuta zanošenja | Odstupanje | WCA metodom poznatih trigonometrijskih vrijednosti | Odstupanje |
|------------|-------------------------------|----------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|------------|
| LDZL – N2  | +0,15335°                     | 0°                                     | 100 %      | 0°                                                 | 100 %      |
| N2 – PETOV | +1,6°                         | 0°                                     | 100 %      | +2°                                                | 25 %       |
| PETOV-MR   | +10,66535°                    | +11°                                   | 3,13773 %  | +11°                                               | 3,13773 %  |
| MR - LJMB  | +2,33669°                     | +2°                                    | 14,40884 % | +2°                                                | 14,40884 % |
| LJMB-PETOV | -10,06556°                    | -8°                                    | 20,52106 % | -10°                                               | 0,65133 %  |
| PETOV – N2 | -1,60076                      | 0°                                     | 100 %      | -2°                                                | 24,94065 % |

Izvor: [5]

Odstupanje za metodu maksimalnog kuta zanošenja iznosi do 20 %, osim u primjerima gdje se vrijednost zaokruži na 0°, pa je odstupanje 100 %. Isto vrijedi i za zaokruživanje na vrijednost 0° pri metodi poznatih trigonometrijskih vrijednosti, a tamo je najviše odstupanje 25 %.



Grafikon 7: Usporedba točnosti metoda računanja kuta ispravke napamet

U grafikonu 7 vizualno si prikazane greške pojedine metode za svaku etapu rute. Greške su naznačene putem odstupanja od stvarne vrijednosti kuta ispravke, a izražene su u postotcima, kao i u tablici 15.

## **6 Proračuni u sklopu provedbe navigacijskog leta**

U sklopu provedbe leta dolazi do potrebe računanja pravca leta kako bi se zrakoplov držao namjeravanog kursa te kako bi preletio već određene kontrolne točke. Pravilna i točna provedba leta uključuje i ostale proračune koji se mijenjaju ovisno o promjenjivim uvjetima u kojima se let provodi, kao što su vjetar ili oblačno vrijeme. Mentalni proračuni pogotovo su važni u provedbi navigacijskog leta, jer pilot obično proračune mora vršiti u malom vremenskom periodu, dok istovremeno upravlja zrakoplovom [16].

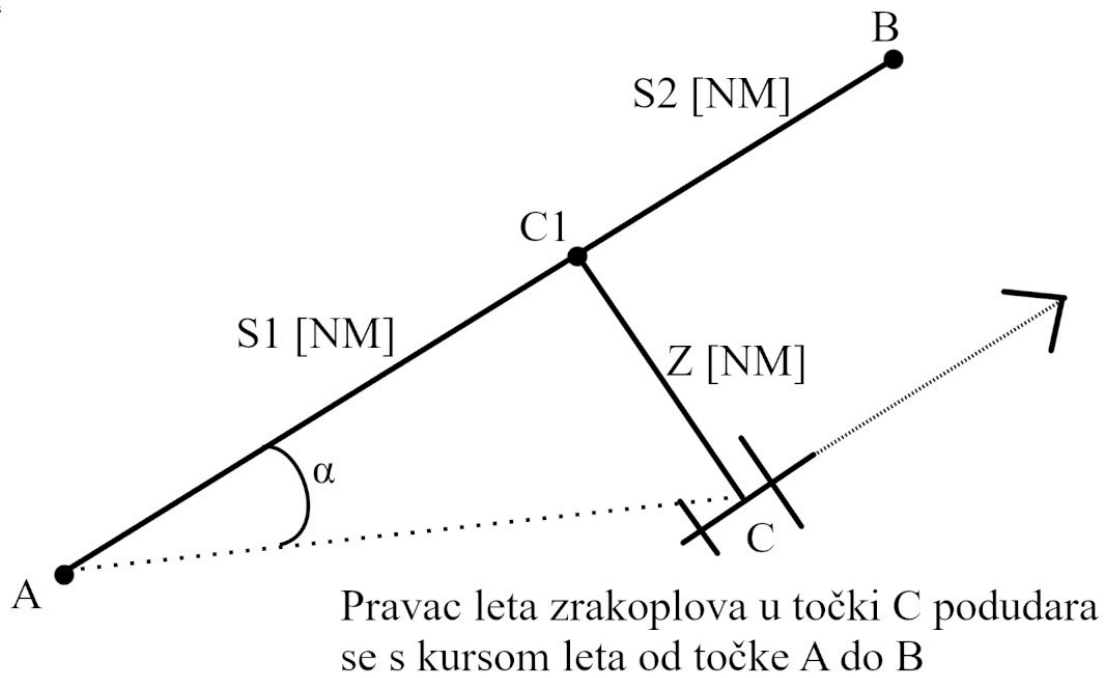
### **6.1 Postupci kontrole po pravcu**

Postupci kontrole puta po pravcu obuhvaćaju metode u kojima se primjenjuje pravilo 1:60 kako bi se odredila stvarna pozicija zrakoplova u horizontalnoj ravnini. Primjenom osnovnih načela pravila 1:60 moguće je proračunati [5]:

- Bočno skretanje od definiranog kursa leta
- Ispravke pravca leta za izravni dolet na orijentir

### **6.2 Metoda procjene bočnog skretanja**

Kalkulacije u glavi često se vrše u svrhu računanja bočne udaljenosti od namjeravane putanje leta uslijed leta u uvjetima s vjetrom. Primjenjujući pravilo 1:60 moguće je odrediti stvarnu poziciju zrakoplova u horizontalnoj ravnini tijekom leta na ruti. Bočno skretanje zrakoplova (Z) (engl. distance-off-course - DO) udaljenost je stvarne pozicije zrakoplova u danom trenutku od planirane, odnosno namjeravane putanje leta. Prikazuje se u nautičkim miljama i ovisi o kutu zanošenja ( $\alpha$ ) i vremenu trajanja leta, odnosno prijedenoj udaljenosti tijekom leta (S1) (engl. distance gone – DG)



Slika 16: Bočno skretanje zrakoplova, [4]

Prema slici 16 i primjenom pravila 1:60 može se pisati da je kut bočnog zanošenja ( $\alpha$ ):

$$\tan \alpha = \frac{Z}{S_1} \cdot 60$$

$$60 \tan \alpha = \frac{Z \cdot 60}{S_1}$$

$$\alpha = \frac{Z \text{ [NM]}}{S_1 \text{ [NM]}} \cdot 60 \quad (39)$$

Iz izraza (39) izvodi se da je bočno skretanje:

$$Z \text{ [NM]} = \frac{\alpha \cdot S_1 \text{ [NM]}}{60} \quad (40)$$

*Primjer 7. Razmotrimo let zrakoplova na jednoj etapi navigacijske rute koja je definirana početnom točkom A i završnom točkom B. Kurs leta iznosi 050°, a udaljenost između točaka je 62 NM. Nakon prijeđenih 20 NM, pilot je odredio stvarnu poziciju zrakoplova u točki C, te je shvatio da se stvarna putanja leta razlikuje za 12° od namijenjene putanje. Potrebno je odrediti bočno skretanje (Z).*

Prema izrazu (40), bočno skretanje je:

$$Z = \frac{\alpha \cdot S1}{60}$$

$$Z = \frac{12 \cdot 20}{60}$$

$$Z = 4 \text{ NM}$$

Točnom matematičkom metodom račun bi izgledao ovako:

$$\tan \alpha = \frac{Z}{S1}$$

$$Z = S1 \cdot \tan \alpha$$

$$Z = 20 \cdot \tan 12^\circ$$

$$Z = 4,25113 \text{ NM}$$

Uspoređujući rezultate vidljivo je da je razlika u rješenjima manja od šest posto:

$$4/4.25113 = 0,94093$$

Putem primjera 7 dokazano je da je razlika u rješenjima manja od 6%, što metodu procjene bočne udaljenosti koristeći pravilo 1:60 čini točnom i lako primjenjivom metodom tijekom leta [5].

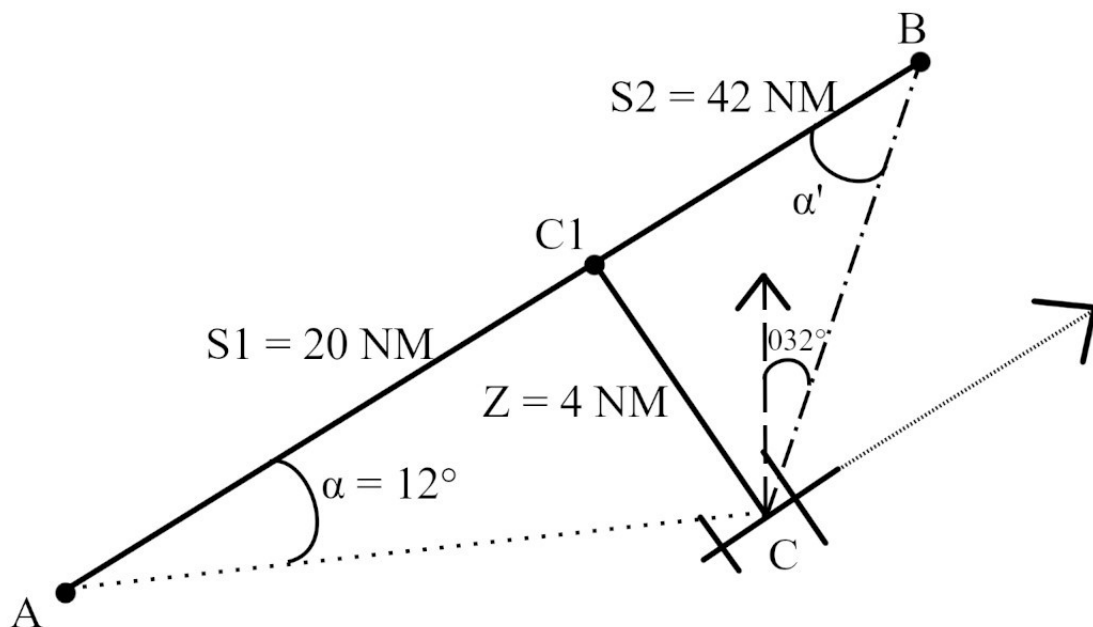
### 6.3 Izravni dolet na orijentir

Izravni dolet na orijentir podrazumijeva ispravku pravca leta takvu da se zrakoplov usmjeri prema namjeravanoj točki s poznate pomaknute pozicije, poznavajući uvjete vjetra. Ako pilot ispravi pravac leta za kut jednak kutu zanošenja vjetra, postići će pravac paralelan putanji leta koja je bila namjeravana od početka. Stoga je bitno izvršiti popravku veću od kuta zanošenja vjetra i odrediti kut približavanja  $\alpha'$  zrakoplova točki B (engl. *closing angle*) [5, 6]. Taj kut je moguće odrediti putem izraza (39), iz trokuta  $BCC_1$  iz slike 19:

$$\tan \alpha' = \frac{Z}{S_2} \cdot 60$$

$$60 \tan \alpha' = \frac{Z \cdot 60}{S_2}$$

$$\alpha' [^\circ] = \frac{Z [\text{NM}]}{S_2 [\text{NM}]} \cdot 60 \quad (41)$$



Slika 17: Izravni dolet na orijentir, [5]

Ukupna duljina etape rute iz primjera 7 iznosi 62 NM. Također, nakon 20 NM pilot je odredio poziciju u točki S1. To znači da duljina preostalog leta (S2) iznosi 42 NM (62 – 20 NM). Prema izrazu (41) kut približavanja ( $\alpha'$ ) točki B je:

$$\alpha' = \frac{Z}{S2} \cdot 60 = \frac{4}{42} \cdot 60 \approx 6^\circ$$

Točnim proračunom kut  $\alpha'$  se proračunava:

$$\tan \alpha' = \frac{Z}{S2} = \frac{4}{42} = 0,095238$$

$$\alpha' = 5,44033^\circ$$

Razlika između procijenjenog i točnog rješenja je 10,2875 % [5]:

$$6/5,44033 = 1,1028749$$

## 6.4 Jednostavnost korištenja metoda procjene u letu

Radno opterećenje pilota prilikom provedbe leta može biti pojačano u određenim segmentima, što točnu kalkulaciju pojedinih stavki nekad čini gotovo nemogućom. Stoga je korištenje metoda procjene od velike važnosti, jer omogućuje pilotu brzo i relativno točno procjenjivanje vrijednosti vezanih za let. Međutim, iako metode procjene jesu jednostavnije od stvarnih detaljnih matematičkih proračuna, neke od njih sadrže više koraka u izračunu od drugih. U tablici 16 sve metode navedene u radu poredane su po broju računskih koraka potrebnih da se izvrše.

Tablica 16: Broj koraka u mentalnom proračunu

| Mentalni proračun                                  | Broj koraka u proračunu | Odstupanje od točnog proračuna |
|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Računanje visine prilikom leta iznad DME sredstva  | 1                       | 1,31 %                         |
| Množenje putne brzine faktorom 5                   | 1                       | 5,27 %                         |
| Množenje udaljenosti faktorom 300                  | 1                       | 5 – 6 %                        |
| Metoda procjene bočnog skretanja                   | 1                       | oko 6 %                        |
| Izravni dolet na orijentir                         | 1                       | oko 11 %                       |
| Proračun promjene visine s tlakom                  | 1                       | 5 – 20 %                       |
| Preračunavanje [°F] i [°C]                         | 1 – 2                   | 1 – 10 %                       |
| Preračunavanje [hPa] i [inHg]                      | 2                       | 0 %                            |
| Preračunavanje [kg] i [lbs]                        | 2                       | < 3 %                          |
| Objekti metode preračunavanja [ft] i [m]           | 2                       | < 3 %                          |
| TAS + CAS · 2 % za svakih 1000 ft                  | 2                       | 0 – 3 %                        |
| Preračunavanja [NM] i [km]                         | 2                       | < 5 %                          |
| Faktor brzine                                      | 2                       | 0 – 5 %                        |
| Preračunavanja iz volumena u masu                  | 2                       | 1 – 5 %                        |
| WCA metodom maksimalnog kuta zanošenja             | 2                       | 3 – 25 %                       |
| WCA metodom poznatih trigonometrijskih vrijednosti | 2                       | 3 – 25 %                       |



|                                                               |   |     |
|---------------------------------------------------------------|---|-----|
| Računanje putne brzine<br>prilikom leta prema DME<br>sredstvu | 3 | 0 % |
|---------------------------------------------------------------|---|-----|

Tablica 16 služi kao svojevrsni rezime svih metoda objašnjenih i provedenih u radu. Iz tablice 16 vidljivo je kako 16 od 17 ispitanih metoda sadrži 1 do 2 koraka u proračunu. U trećem stupcu tablice još jednom je prikazano odstupanje od stvarnih vrijednosti dobivenih proračunima, te je naznačeno bojama (zelenom za odstupanja manja od 5 %, a žutom za odstupanja veća od 5 %). Mentalni proračuni od jednog koraka naznačeni su svijetlozelenom bojom u rubrici koraka, dok su oni od dva i više koraka označeni plavom bojom. Vidljivo je kako su metode procjene koje se sastoje od samo jednog koraka, najčešće je to množenje s određenim faktorom, generalno manje točnije od metoda koje se sastoje od 2 ili 3 koraka u proračunu.

## 7 Zaključak

Mentalni proračuni u zrakoplovstvu predstavljaju način računanja određenih stavki na brz i jednostavan način bez potrebe zapisivanja podataka ili detaljne analize istih. Cilj svakog mentalnog proračuna je da mu proces računa bude što kraći i jednostavniji, no da se pritom zadrži razina točnosti koja zadovoljava standard sigurnosti tijekom provedbe navigacijskog leta. Mentalni proračuni i metode procijene vrijednosti obrađeni u ovom radu predstavljaju računanje nekih od osnovnih veličina s kojima se pilot često susreće u letačkim operacijama. Odabir obrađenih metoda temeljen je većinski na ciljevima i ishodima učenja propisanim 100 KSA regulativom izdanom od strane EASA-e, no po potrebi su dodani i proračuni izvan sklopa te regulative.

Analiza metoda mentalnih proračuna temeljena je na računanju točnih vrijednosti te na usporedbi tih vrijednosti s onima dobivenim metodama procjene. Točne kalkulacije rađene su pomoću računala, dok su sve mentalne računicе izvršene napamet, kao što nalaže i naziv. Sve metode s odstupanjima od stvarnih vrijednosti manjim od 5 % posebno su označene, najčešće zelenom bojom, te se smatraju iznimno točnima i mogu zamjeniti stvarne kalkulacije jer s prihvatljivom greškom daju slične rezultate, koji su i više nego dovoljno točni za uporabu. Ako se odstupanja kreću od 5 do 25 %, metode su najčešće označene žutom bojom te se smatraju dovoljno točnima za korištenje bez ugrožavanja sigurnosti, no nisu dovoljno točne da u potpunosti i u svim slučajevima zamjene stvarne točne proračune. Sve metode obrađene u sklopu ovog rada spadaju barem u kategoriju točnosti do 25 %.

## Literatura

[1] EASA. *Annex 1 – Part FCL*. Preuzeto s:

<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Part-FCL.pdf> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2021.]

[2] EASA. *Easy Access Rules for Aircrew (Regulation (EU) No 1178/2011)*. Preuzeto s:

<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy%20Access%20Rules%20for%20Aircrew%20%28August%202020%29%20-%20footnote%20added.pdf> [Pristupljeno: 29. srpnja 2021.]

[3] Novak D. *Zrakoplovna prostorna navigacija*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2015.

[4] Skybrary. *Rules of thumb*. Preuzeto s:

[https://www.skybrary.aero/index.php/Rules\\_of\\_Thumb](https://www.skybrary.aero/index.php/Rules_of_Thumb) [Pristupljeno: 29. srpnja 2021.]

[5] Novak D. *Zrakoplovna računska navigacija*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2012.

[6] Nordin. KLM Flight Academy. *General Navigation*. Sixth Edition. London: London metropolitan university; 2010.

[7] Skybrary. *Distance measuring equipment (DME)*. Preuzeto s:

[https://www.skybrary.aero/index.php/Distance\\_Measuring\\_Equipment\\_\(DME\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Distance_Measuring_Equipment_(DME)) [Pristupljeno: 29. srpnja 2021.]

[8] Krepelka. *Distance measuring equipment*. Preuzeto s:

<http://krepelka.com/fsweb/learningcenter/navigation/distancemeasuringequipment.htm>

[Pristupljeno: 30. srpnja 2021.]

[9] Jeppesen. JAA ATPL Training. *General Navigation*. Neu – Isenburg: Atlantic Flight Training Ltd; 2004.

[10] Bucak T, Zorić I. *Zrakoplovni instrumenti i prikaznici*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2002.

[11] Aerotoolbox. *Airspeed Conversions (CAS/EAS/TAS/Mach)*. Preuzeto s:

<https://aerotoolbox.com/airspeed-conversions/> [Pristupljeno: 01. kolovoza 2021.]

- [12] Skybrary. True Airspeed. Preuzeto s: [https://www.skybrary.aero/index.php/True\\_Airspeed](https://www.skybrary.aero/index.php/True_Airspeed) [Pristupljeno 01. kolovoza 2021.]
- [13] Jeppesen. EASA ATPL Training. *Principles of Flight Aeroplanes*. Boeing Courseware. Preuzeto s: <https://cdn.peterssoftware.de/software/courseware/> [Pristupljeno 02. kolovoza 2021.]
- [14] Anderson JD. *Fundamentals of Aerodynamics*. Third edition. New York: McGraw-Hill Education; 2001.
- [15] Jeppesen. Mobile Flitedeck IFR. Preuzeto s: <https://ww2.jeppesen.com/navigation-solutions/mobile-flitedeck-ifr/> [Pristupljeno: 02. kolovoza 2021.]
- [16] Federal Aviation Administration. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. U.S. Department of Transportation; 2016. Preuzeto s: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/) [Pristupljeno: 03. kolovoza 2021.]
- [17] Kovačić G. *Rules of thumb*. Zagreb: Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte; 2009.
- [18] Aviation Exam. 100 - Knowledge, Skills and Attitudes (KSA) | STUDY | ATPL (A). 104-02 - Estimate time, distance and speed. Preuzeto s: <https://www.aviationexam.com/UI/Pages/Members/NewTestSettings.aspx> [Pristupljeno 28. srpnja 2021.]
- [19] Aviation Exam. 100 - Knowledge, Skills and Attitudes (KSA) | STUDY | ATPL (A). 104-03 - Estimate the rate of climb or rate of descent, distance and time. Preuzeto s: <https://www.aviationexam.com/UI/Pages/Members/NewTestSettings.aspx> [Pristupljeno: 28. srpnja 2021.]
- [20] Airnav.Eu. DME. Preuzeto s: <http://www.airnav.eu/indexen.php?stranka=DMEen> [Pristupljeno: 03. kolovoza 2021.]
- [21] Skybrary. AP4ATCO - Units of Measurement and their Conversion. Preuzeto s: [https://www.skybrary.aero/index.php/AP4ATCO -  
Units of Measurement and their Conversion](https://www.skybrary.aero/index.php/AP4ATCO_-_Units_of_Measurement_and_their_Conversion) [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]

- [22] Annex 5. *Units of Measurement to be Used in Air and Ground Operations*. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (ICAO). Fifth Edition; 2010. Preuzeto s: <https://www.pilot18.com/wp-content/uploads/2017/10/Pilot18.com-ICAO-Annex-5-Units-of-Measurement.pdf> [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [23] Bošnjak M. *Proračun putanje instrumentalnog prilaženja zrakoplova u nestandardnim atmosferskim uvjetima*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2020. Preuzeto s: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1968> [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [24] Skybrary. Altimeter Pressure Settings. Preuzeto s: [https://www.skybrary.aero/index.php/Altimeter\\_Pressure\\_Settings](https://www.skybrary.aero/index.php/Altimeter_Pressure_Settings) [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [25] Doc 4444. Air Traffic Management. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (ICAO). Sixteenth Edition; 2016. Preuzeto s: <https://ops.group/blog/wp-content/uploads/2017/03/ICAO-Doc4444-Pans-Atm-16thEdition-2016-OPSGROUP.pdf> [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [26] Code 7700. Transition Altitude / Layer / Level. Preuzeto s: [https://code7700.com/ta\\_tl.htm#ref](https://code7700.com/ta_tl.htm#ref) [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [27] Skybrary. Level Bust Briefing Notes. Preuzeto s: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/142.pdf> [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [28] Schaefer Flight. Temperature Conversion Rule of Thumb. Preuzeto s: <https://schaeferflight.com/index.php/2018/06/28/temperature-conversion-rule-of-thumb/> [Pristupljeno: 04. kolovoza 2021.]
- [29] Jeppesen. EASA ATPL Training. *Flight Planning and Flight Monitoring*. Boeing Courseware. Preuzeto s: <https://cdn.peterssoftware.de/software/courseware/> [Pristupljeno 03.kolovoza 2021.]
- [30] Flight Literacy. Wind Triangle and Its Solution (Part One). Preuzeto s: <https://www.flightliteracy.com/wind-triangle-and-its-solution-part-one/> [Pristupljeno: 06. kolovoza 2021.]

- [31] Jeppesen. EASA ATPL Training. *General Navigation*. Boeing Courseware. Preuzeto s: <https://cdn.peterssoftware.de/software/courseware/> [Pristupljeno: 07. kolovoza 2021.]
- [32] MaxAero. Complete a navigation log. Preuzeto s: <https://max.aero/flight-training/private-pilot-training-program/learning-center/complete-a-navigation-log/> [Pristupljeno: 07. kolovoza 2021.]
- [33] Pađen M. Navigacijski plan leta. Zagreb: Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte; 2017.

## Popis slika

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Pravilo 1:60, [4].....                                       | 4  |
| Slika 2: Analogija pravila 1:60, [5].....                             | 6  |
| Slika 3: Određivanje visine početka spuštanja, [5] .....              | 8  |
| Slika 4: Visina iznad DME sredstva, [8] .....                         | 11 |
| Slika 5: Karta instrumentalnog prilaza Zračne luke Zagreb, [15] ..... | 20 |
| Slika 6: Mjerenje kose udaljenosti DME sredstvom, [20] .....          | 27 |
| Slika 7: Penjanje prema prijelaznoj razini, [26].....                 | 36 |
| Slika 8: Spuštanje prema prijelaznoj apsolutnoj visini, [26] .....    | 37 |
| Slika 9: Faktori preračunavanja volumena i mase, [17] .....           | 44 |
| Slika 10: Navigacijski trokut, [30].....                              | 48 |
| Slika 11: Kut zanošenja, [16].....                                    | 49 |
| Slika 12: Pravokutni trokut, [5] .....                                | 51 |
| Slika 13: Trigonometrija navigacijskog trokuta, [5].....              | 52 |
| Slika 14: Translacija trokuta oko točke A, [4].....                   | 53 |
| Slika 15: Navigacijski plan leta [33].....                            | 56 |
| Slika 16: Bočno skretanje zrakoplova, [4].....                        | 61 |
| Slika 17: Izravni dolet na orijentir, [5].....                        | 63 |

## Popis tablica

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1: Odnosi kuteva i vrijednosti njihovih tangensa pomnoženi sa 60..... | 6  |
| Tablica 2: Provjera točnosti brzine silaženja .....                           | 21 |
| Tablica 3: Faktori brzine .....                                               | 22 |
| Tablica 4: Odstupanja mentalnih proračuna .....                               | 28 |
| Tablica 5: Mjerne jedinice duljine .....                                      | 29 |
| Tablica 6: Metoda procjene preračunavanja udaljenosti .....                   | 30 |
| Tablica 7: Prva metoda procjene preračunavanja visine.....                    | 32 |
| Tablica 8: Druga metoda procjene preračunavanje visine.....                   | 34 |
| Tablica 9: Metoda procjene promjene visine s tlakom .....                     | 38 |
| Tablica 10: Metoda procjene preračunavanja temperature .....                  | 41 |
| Tablica 11: Mentalno preračunavanje mjernih jedinica mase .....               | 43 |
| Tablica 12: Poredak metoda procjene na temelju odstupanja.....                | 45 |
| Tablica 13: Računanje kuta ispravke i putne brzine napamet.....               | 54 |
| Tablica 14: Aproksimacija sinusa i kosinusa upadnog kuta .....                | 55 |
| Tablica 15: Odstupanja metoda računanja kuta ispravke napamet.....            | 58 |
| Tablica 16: Broj koraka u mentalnom proračunu .....                           | 65 |



## Popis grafikona

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Grafikon 1: Prikaz kuteva i vrijednosti njihovih tangensa pomnoženih sa 60 .....                               | 7  |
| Grafikon 2: Usporedba stvarnih i procijenjenih vrijednosti TAS.....                                            | 17 |
| Grafikon 3: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja nautičkih milja u kilometre.....                   | 31 |
| Grafikon 4: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja metara u stope.....                                | 33 |
| Grafikon 5: Usporedba stvarne promjene visine s tlakom u odnosu na procijenjenu vrijednost baričke stope ..... | 38 |
| Grafikon 6: Usporedba točnog i procijenjenog preračunavanja fahrenheitita u celzijeve stupnjeve .....          | 41 |
| Grafikon 7: Usporedba točnosti metoda računanja kuta ispravke napamet.....                                     | 59 |



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 **Određivanje točnosti mentalnih proračuna navigacijskih podataka**  
**za pripremu i provedbu navigacijskog leta**

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

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 5.9.2021 \_\_\_\_\_

Student/ica:

(potpis)