

Proračun putanje instrumentalnog prilaženja zrakoplova u nestandardnim atmosferskim uvjetima

Bošnjak, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:199005>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Marko Bošnjak

**PRORAČUN PUTANJE INSTRUMENTALNOG PRILAŽENJA
ZRAKOPLOVA U NESTANDARDNIM ATMOSFERSKIM UVJETIMA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

Zagreb, 17. ožujka 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Planiranje letenja i performanse II**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5556

Pristupnik: **Marko Bošnjak (0135251320)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Proračun putanje instrumentalnog prilaznja zrakoplova u nestandardnim atmosferskim uvjetima**

Opis zadatka:

Uvod. Teorijski objasniti utjecaj atmosferskih uvjeta na određivanje visine leta zrakoplova i utjecaj na performanse (uzlijetanje, penjanje, krstarenje, spuštanje, slijetanje). Teorijski objasniti vrste prilaza za slijetanje s posebnim naglaskom na GNSS prilaze. Provesti analizu utjecaja temperature na određivanje visine. Za GNSS prilaz, prema karakterističnim točkama procedure, prikazati putanju leta zrakoplova u uvjetima ekstremnih odstupanja temperature zraka. Usporediti proračunatu putanju leta i putanju dobivenu u simulatoru leta. Definirati radnje i postupke korekcije putanje. Zaključak.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Doris Novak

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**PRORAČUN PUTANJE INSTRUMENTALNOG PRILAŽENJA
ZRAKOPLOVA U NESTANDARDNIM ATMOSFERSKIM UVJETIMA
AIRCRAFT INSTRUMENT APPROACH TRAJECTORY
CALCULATION IN NON-STANDARD ATMOSPHERIC CONDITIONS**

Mentor: prof. dr. sc. Doris Novak

Student: Marko Bošnjak

JMBAG: 0135251320

Zagreb, srpanj 2020.

PRORAČUN PUTANJE INSTRUMENTALNOG PRILAŽENJA ZRAKOPLOVA U NESTANDARDNIM ATMOSFERSKIM UVJETIMA

SAŽETAK

Instrumentalno prilaženje definirano je načinom elektroničkog vođenja zrakoplova u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Visina se u zrakoplovu standardno mjeri barometarskim visinomjerom. Temperatura zraka važan je čimbenik u određivanju visine leta koji nije kompenziran barometarskim visinomjerom. Kada je temperatura zraka manja od standardne vrijednosti, zrakoplov će biti niže nego što pokazuje visinomjer. Za određenu vrstu instrumentalnog prilaženja koristi se isključivo barometarski visinomjer kao izvor podataka o visini leta za proračun vertikalnog profila prilaženja. Stoga je u ovom radu objašnjen utjecaj temperature zraka na visinu leta, navedena je jednadžba za korekciju indicirane visine pri niskim temperaturama zraka te su razrađeni postupci koje posada zrakoplova mora poduzeti prilikom proračuna visina u prilaženju kako bi se osiguralo sigurno nadvišavanje prepreka.

KLJUČNE RIJEČI: temperatura zraka; PBN koncept; Baro-VNAV; RNP specifikacija

SUMMARY

Instrument approach is defined by the method of electronic guidance of an aircraft in the lateral and vertical modes. The altitude of the aircraft is usually measured by a barometric altimeter. Air temperature is an important factor in determining the aircraft's altitude which is not compensated by the barometric altimeter. When the air temperature is lower than the standard value, the aircraft will be lower than indicated by the altimeter. For a specific type of instrument approach, the barometric altimeter is used exclusively as the altitude source for the calculation of the vertical approach profile. Therefore, this paper explains the influence of air temperature on altitude, states the equation for the correction of indicated altitude at low air temperatures and describes the procedures that the flight crew must perform when calculating altitudes during approach to ensure safe obstacle clearance.

KEYWORDS: air temperature; PBN concept; Baro-VNAV; RNP specification

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Atmosfera	2
2.1. Sastav i struktura atmosfere	2
2.2. Međunarodna standardna atmosfera	4
2.3. Temperatura zraka	4
2.4. Tlak zraka	6
2.5. Gustoća zraka	7
3. Utjecaj atmosferskih uvjeta na performanse zrakoplova	8
3.1. Jednadžba stanja idealnog plina	8
3.2. Visina po tlaku	10
3.3. Visina po gustoći	12
4. Visina leta zrakoplova	19
4.1. Osjetljivi barometarski visinomjer	20
4.2. Utjecaj temperature zraka na prikaz visine leta	21
5. Postupci instrumentalnog prilaženja	29
5.1. Konvencionalni postupci prilaženja	31
5.2. RNP postupci prilaženja	32
6. Proračun putanje RNP postupka prilaženja	38
6.1. Analiza odstupanja temperature zraka od ISA uvjeta	38
6.2. Postupak RNP prilaženja za stazu 04 u Zagrebu	40
6.2.1. Odstupanje temperature zraka ISA+20	42
6.2.2. Odstupanje temperature zraka ISA-20	43
7. Postupci korekcije putanje leta	45
8. Zaključak	47
Literatura	49
Popis kratica	51

Popis slika	54
Popis tablica	55
Prilog 1. Promjena ISA parametara do visine 20 km	56

1. Uvod

Prilaženje za slijetanje predstavlja kritičnu fazu leta radi toga što se zrakoplov nalazi na maloj visini i leti relativno malom brzinom u odnosu na režim krstarenja. Pritom mu konfiguracija krila s izvučenim zakrilcima dodatno povećava otpor. Upotreba instrumenata rasterećuje pravilno obučenu posadu, pogotovo u nepovoljnim meteorološkim uvjetima. Posada mora biti svjesna grešaka instrumenata i načina korekcije istih kako bi se na siguran i učinkovit način proveo postupak instrumentalnog prilaženja.

U ovom radu analiziran je utjecaj temperature zraka na prikazivanje visine leta zrakoplova u postupku prilaženja koji koristi satelitski navigacijski sustav (engl. *Global Navigation Satellite System – GNSS*), pri čemu se vertikalna putanja prilaženja temelji na očitavanjima visine s barometarskog visinomjera. Cilj rada je utvrditi veličinu greške u prikazivanju visine zbog odstupanja temperature zraka od standardne vrijednosti, izračunati promjenu u vertikalnom profilu odabranog postupka prilaženja, definirati način ispravka visine leta i postupke koji se moraju primijeniti tijekom prilaženja.

Rad je podijeljen u ukupno osam cjelina. U drugom poglavlju objašnjen je sastav i podjela atmosfere. Definirana je međunarodna standardna atmosfera i posebno su razrađeni parametri atmosfere koji utječu na performanse i vođenje zrakoplova. Međuzavisnost parametara atmosfere i njihov utjecaj na performanse zrakoplova obrađeni su u trećoj cjelini. U četvrtom poglavlju opisan je princip mjerenja visine leta i način rada osjetljivog barometarskog visinomjera. Isto tako, teorijski i proračunski je objašnjen utjecaj temperature zraka na visinu leta. Postupci instrumentalnog prilaženja s posebnim naglaskom na prilaženja po GNSS-u definirani su u petom poglavlju. Šesta cjelina predstavlja sintezu teorijskih proračuna utjecaja temperature zraka na visinu leta i postupka prilaženja po GNSS-u u Zagrebu. U sedmom poglavlju navedeni su postupci korekcije vertikalne putanje prilaženja te su određeni uvjeti koji moraju biti zadovoljeni tijekom provođenja korekcije.

2. Atmosfera

Atmosfera (grč. *atmos*: dah, para + grč. *sphaira*: kugla, sfera) je plinoviti omotač koji obavija nebeska tijela. Na Zemlji se *zrak*, koji je mehanička smjesa plinova, poglavito dušika, kisika, argona i ugljičnog dioksida, uobičajeno smatra atmosferom i sudjeluje u Zemljinoj vrtnji [1].

2.1. Sastav i struktura atmosfere

Većina plinova u atmosferi nastala je unutarnjim procesima Zemlje, kao što su vulkanske erupcije i fotosinteza biljaka. Plinovi su nakon nastanka ostali zarobljeni Zemljinom gravitacijom čime su se zadržali uz površinu Zemlje. Suhi zrak po volumnom sastavu sadrži sljedeće plinove prema volumnim udjelima:

- dušik (N_2), 78,084%
- kisik (O_2), 20,946%
- argon (Ar), 0,934%
- ugljični dioksid (CO_2), 0,034%
- smjesa neona, metana, kriptona, vodika, ksenona i helija, 0,01% [2, 3].

Osim osnovnih plinova navedenih gore, u zraku se nalaze i drugi konstituenti promjenjivih količina od kojih su najznačajniji:

- vodena para
- aerosol
- ozon (O_3).

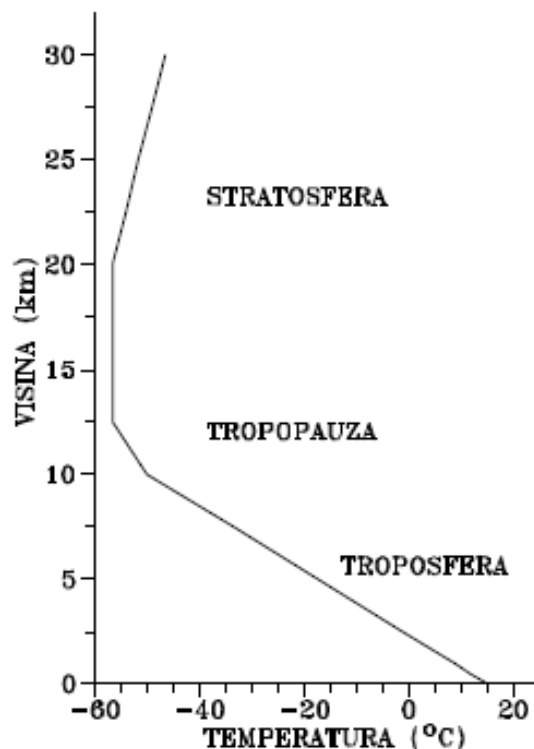
Voda ima značajne učinke na trenutno stanje atmosfere koje se zove vrijeme. Ona se u atmosferi može naći u sva tri agregatna stanja: kao vodena para, tekuća voda ili led. Prelaskom iz jednog u drugo agregatno stanje ulaže se ili, u suprotnom smjeru, oslobađa određena količina topline – latentna toplina. Oslobađanje latentne topline, kao vrste energije, ima veliku ulogu u atmosferskim olujama. Aerosol, odn. lebdeće čestice najuočljivije su tijekom smanjenja vidljivosti, a isto tako omogućuju i kondenzaciju vodene pare u zraku ponašajući se kao sidro za molekule vode. Molekule ozona izuzetno su bitne za očuvanje života na Zemlji, upijajući velik dio štetnog ultraljubičastog zračenja Sunca. Povećan udio ozona u atmosferi nalazi se u sloju nazvanom ozonosfera. Ozonosfera se nalazi na visini između 20 i 50 km, a veća koncentracija ozona posljedica je fotokemijskih reakcija molekula kisika [3].

Strukturalno, u ovom radu, atmosfera se vertikalno dijeli s obzirom na:

- osnovni sastav atmosfere
- promjenu temperature zraka s visinom.

Osnovni sastav atmosfere gotovo pa nije promjenjiv do visine od 80 km, stoga se taj sloj naziva homosferom. Iznad 80 km visine atmosfera se većinom sastoji od vodika, zbog njegove male mase. Udio atoma vodika izrazito je promjenjiv pa se dio atmosfere iznad 80 km zove heterosfera [3].

Podjela s obzirom na vertikalnu promjenu temperature zraka, zvana i stratifikacija, najzastupljenija je podjela atmosfere. Prema njoj, u najnižem sloju atmosfere, troposferi, temperatura zraka pada porastom visine. Srednja visina troposfere je 11 km, a u njoj se nalazi 75% ukupne mase atmosfere. Karakteristika idućeg sloja je izotermija, a sloj se zbog toga naziva tropopauzom. Iznad tropopauze temperatura zraka raste u stratosferi do visine od 45 do 50 km. Prikaz promjene temperature s visinom prikazan je na slici 1. Kako se sve konvencionalne letачke operacije odvijaju do stratosfere, ostali slojevi atmosfere neće se detaljnije analizirati. Od ostalih slojeva, po visini, postoje: stratopauza, mezosfera, mezopauza, termosfera i egzosfera [2, 3].



Slika 1. Vertikalna promjena temperature zraka, [3]

2.2. Međunarodna standardna atmosfera

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*). U prilogu 1 nalazi se tablica koja prikazuje promjenu parametara međunarodne standardne atmosfere do visine 20 km.

Propisani ISA uvjeti su:

- temperatura zraka na srednjoj razini mora (engl. *Mean Sea Level – MSL*) 15°C
- MSL tlak zraka 101.325 Pa
- MSL gustoća zraka 1,225 kg/m³
- pad temperature zraka s visinom (engl. *lapse rate*) 0,65°C/100 m do 11 km
- konstantna temperatura zraka -56,5°C do visine 20 km
- povećanje temperature zraka s visinom 0,1°C/100 m do visine 32 km [2, 4].

2.3. Temperatura zraka

Mjerljivo svojstvo nekog tijela kojim se izražava njegova zagrijanost zove se temperatura. Temperatura se mjeri baždarenim uređajima – termometrima. Tijelo se grije i hladi, odn. njegova temperatura se povećava i snižava u ovisnosti o toplini. Toplina je oblik energije koja se prenosi s tijela veće temperature na tijelo manje temperature. Gibanje atoma u nekom tijelu određuje količinu topline, a time i temperaturu tog tijela. Što se atomi brže gibaju energija je veća, a time raste i temperatura. Brzina izmjene topline ovisi o karakteristikama tijela koja sudjeluju u procesu zagrijavanja, a zove se toplinski kapacitet. Veći toplinski kapacitet nekog tijela znači da je potrebno uložiti veću količinu topline za zagrijavanje tog tijela. Proporcionalno tome, tijelo s karakteristikom većeg toplinskog kapaciteta dulje će održati trenutno stanje zagrijanosti od tijela manjeg toplinskog kapaciteta [5].

Kako bi se temperatura kvantitativno izmjerila termometrom, potrebno je odrediti temperaturnu ljestvicu. Za izražavanje temperature koriste se tri ljestvice: Kelvinova (oznaka [K]), Celzijusova (oznaka [°C]) i Fahrenheitova (oznaka [°F]). Referentne

točke za određivanje ljestvica tradicionalno su ledište i vrelište vode. U tablici 1 prikazane su referentne točke s vrijednostima za svaku od navedene tri ljestvice [2].

Tablica 1. Vrijednosti ledišta i vrelišta vode u različitim temperaturnim ljestvicama

Ljestvica	T [K]	t [°C]	t [°F]
Ledište vode	273,15	0	32
Vrelište vode	373,15	100	212

Izvor: [2]

Glavni izvor topline u troposferi je Sunce. Sunčevom kratkovalnom radijacijom, koja izravno nema utjecaj na zagrijavanje zraka, grije se površina Zemlje procesom koji se naziva insolacijom, pri čemu se, zbog manjeg toplinskog kapaciteta, tlo zagrijava brže od vode. Zagrijana površina Zemlje potom dugovalnom radijacijom zagrijava troposferu. Zagrijavanjem prizemnog zraka smanjuje se njegova gustoća zbog čega se zrak uzdiže postupkom zvanim konvekcija. Uzdizanjem se zrak hladi adijabatski pri čemu se u određenim uvjetima vodena para u zraku kondenzira zbog čega nastaju oblaci. Kondenzacijom vodene pare oslobađa se latentna topline koja isto doprinosi zagrijavanju troposfere [2].

Temperatura zraka porastom visine u troposferi pada zbog sve veće udaljenosti od tla uzevši u obzir kako se troposfera zagrijava dugovalnim Zemljinim zračenjem. Pad temperature zraka idealne atmosfere s porastom visine konstantan je i jedan je od opisanih ISA uvjeta. Sloj u kojem promjenom visine temperatura zraka ostaje konstantna zove se izotermni sloj [2].

Količina Sunčeve energije koju neko područje na Zemlji primi varira s obzirom na doba dana, godišnja doba te geografsku širinu područja. Razlikama u količini zaprimljene energije nastaju temperaturne varijacije koje su pokretač atmosferskih pojava. Razlog tome je što temperatura zraka uvelike utječe na meteorološke elemente kao što su:

- tlak i gustoća zraka
- stvaranje vjetra
- stvaranje oblaka
- promjena vidljivosti [3, 5].

2.4. Tlak zraka

Atmosferski tlak definiran je kao sila kojom atmosfera okomito djeluje na određenu površinu, a mjeri se barometrom. Tlak zraka uzrokovan je gibanjem molekula zraka čime dolazi do međusobnih sudara koji djeluju kao sila. Tlak zraka ovisan je o temperaturi i gustoći zraka. Što je veća temperatura, gibanje molekula je brže pa je sila kojom molekule djeluju na površinu veća, odn. tlak je veći. U izotermnom slučaju pri smanjenju gustoće zraka, povećava se međusobna udaljenost molekula zraka čime se smanjuje broj međusobnih sudara – sila je manja, odn. tlak zraka je manji. Uzevši u obzir navedene činjenice i ISA uvjete može se zaključiti da tlak zraka porastom visine pada, odn. smanjuje se [3, 5].

Tlak zraka u mehanici fluida promatra se kao hidrodinamički tlak. Upravo takva vrsta tlaka pojavljuje se u fluidu koji se giba, kao što je atmosfera, a sastoji se od dinamičkog i statičkog dijela. Dinamički dio odnosi se na fluid u gibanju, ovisi o brzini fluida i djeluje u smjeru gibanja. U meteorologiji se za određivanje tlaka zraka dinamički dio zanemaruje. Statički dio odnosi se na fluid u mirovanju, a naziva se hidrostatičkim tlakom. Težina i stupac fluida varijable su o kojima ovisi promjena hidrostatičkog tlaka što je prikazano jednačinom (1). Najznačajniji utjecaj u atmosferi ima hidrostatički tlak pa se upravo ta komponenta smatra tlakom zraka [3].

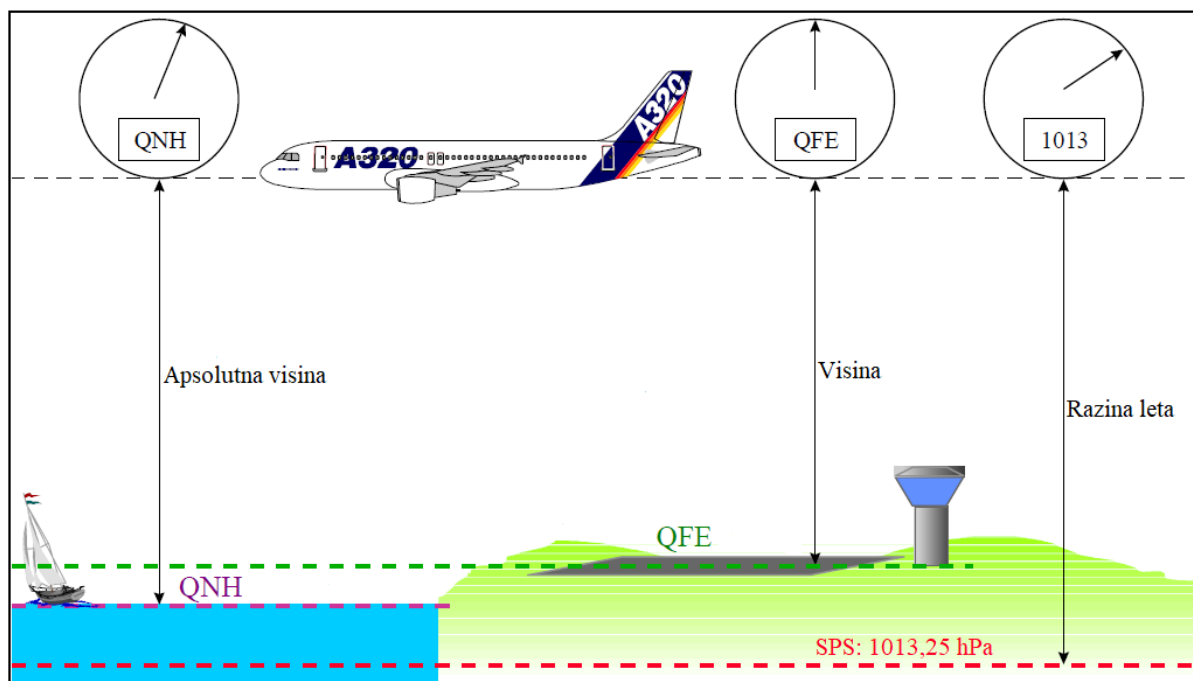
$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (1)$$

Pri čemu je:

- dp – promjena hidrostatičkog tlaka fluida s visinom [Pa]
- ρ – gustoća fluida [kg/m^3]
- g – ubrzanje Zemljine sile teže [m/s^2]
- dh – promjena visine fluida [m] [6].

Visina leta u zrakoplovstvu se određuje postavkom tlaka zraka na visinomjeru. Vrijednosti visina uobičajeno se izražavaju u stopama (engl. *foot* – *ft*). Postavke tlaka imaju kodne 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. Postavkom QNH na visinomjeru se prikazuje apsolutna visina (engl. *altitude*), a referentna točka je srednja razina mora. Postavkom QFE prikazuje se relativna visina (engl. *height*) s obzirom na aerodromsku referentnu točku. QNE je oznaka za apsolutnu visinu pri standardnom tlaku zraka

(engl. *Standard Pressure Setting – SPS*), a iznosi 1013,25 hPa. Referentna točka je izobarna ploha vrijednosti SPS-a, a visinomjer pokazuje razinu leta (engl. *flight level - FL*) [2, 7, 8]. Odnos različitih postavki tlaka zraka prikazan je slikom 2.



Slika 2. Odnos različitih postavki tlaka zraka na visinomjeru, [7]

2.5. Gustoća zraka

Gustoća je definirana kao masa tvari po jedinici volumena. Gustoća suhog zraka posredno se dobiva iz poznatih podataka temperature i tlaka zraka koji se uvrštavaju u jednadžbu stanja idealnog plina (2). Jednadžba (2) detaljno je razrađena u idućem poglavlju.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (2)$$

Pri čemu je:

- ρ – gustoća zraka [kg/m^3]
- p – tlak zraka [Pa]
- R – specifična plinska konstanta suhog zraka 287,053 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
- T – temperatura zraka [K] [3, 4].

Iz jednadžbe (2) vidljivo je da je gustoća proporcionalna tlaku, a obrnuto proporcionalna temperaturi zraka. Kako je utjecaj tlaka zraka izraženiji od utjecaja temperature, može se zaključiti da gustoća zraka s porastom visine pada [2].

3. Utjecaj atmosferskih uvjeta na performanse zrakoplova

Performanse zrakoplova odnose se na sposobnost zrakoplova da udovolji propisanim standardima tijekom određenih faza leta, a izravno su povezane s potiskom zrakoplova. Potisak zrakoplova ovisan je o masenom protoku zraka u motor. Maseni protok proporcionalan je gustoći zraka koja se porastom visine smanjuje. Smanjenjem gustoće zraka, koja je pak ovisna o tlaku i temperaturi zraka, smanjit će se raspoloživ potisak zrakoplova, a time i njegove performanse [9].

3.1. Jednadžba stanja idealnog plina

Kako bi se mogli ustanoviti odnosi temperature, tlaka i gustoće zraka potrebno je svesti njihov međuođnos na zajedničku jednadžbu – jednadžbu stanja idealnog plina. Budući da zrak nije idealan plin, svako odstupanje promatranih parametara ISA-e koristi se u proračunu utjecaja na performanse zrakoplova. Jednadžba stanja idealnog plina izvodi se iz tri plinska zakona: Boyle-Mariotteovog, Charlesovog i Avogadrovog. Boyle-Mariotteov zakon opisuje da je pri konstantnoj množini tvari i temperaturi:

$$V \propto \frac{1}{p} \quad (3)$$

pri čemu je:

- V – volumen plina [m^3]
- p – tlak plina [Pa].

Charlesov zakon opisuje da je pri konstantnoj množini tvari i tlaku:

$$V \propto T \quad (4)$$

pri čemu je:

- V – volumen plina [m^3]
- T – temperatura plina [K].

Avogadrov zakon opisuje da je pri konstantnoj temperaturi i tlaku:

$$V \propto n \quad (5)$$

pri čemu je:

- V – volumen plina [m^3]
- n – množina tvari [mol].

Kombinacijom izraza (3), (4) i (5) dobiva se proporcionalnost volumena plina V s množinom tvari n i temperaturom T , te obrnuta proporcionalnost s tlakom plina p .

$$V \propto \frac{n \cdot T}{p} \quad (6)$$

Da bi se obje strane izraza (6) mogle izjednačiti uvodi se univerzalna plinska konstanta R^* koja iznosi 8,31432 [J/(mol·K)]. Jednadžba (7) predstavlja jednadžbu stanja idealnog plina koju je potrebno dodatno transformirati kako bi se dobio odnos gustoće, tlaka i temperature.

$$V = \frac{n \cdot R^* \cdot T}{p} \quad (7)$$

Množina tvari n definirana je kao masa tvari m [kg] podijeljena s molarnom masom tvari M [kg/mol]. Uvrštavanjem (8) u (7) te transformacijom jednadžbe dobije se gustoća ρ [kg/m³] kao odnos mase m i volumena V što je prikazano jednadžbom (9). Nakon završnog sređivanja jednadžbe (7) sa (8) i (9) dobije se (10).

$$n = \frac{m}{M} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R^* \cdot T} \quad (10)$$

Za određivanje međuodnosa gustoće, tlaka i temperature zraka potrebno je uvesti specifičnu plinsku konstantu suhog zraka R [J/(kg·K)] kao odnos univerzalne plinske konstante R^* [J/(mol·K)] podijeljene s molarnom masom suhog zraka M [kg/mol]. Transformacijom (10) dobije se jednadžba stanja idealnog plina (2) za suhi zrak, a koja povezuje sva 3 promatrana parametra atmosfere [10]. U jednadžbi (11) prikazan je izračun specifične plinske konstante suhog zraka R prema podacima iz [4].

$$R = \frac{R^*}{M} = \frac{8,31432}{0,02896442} = 287,053 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \quad (11)$$

3.2. Visina po tlaku

Visina po tlaku (engl. *Pressure Altitude – PA*) je visina zrakoplova u odnosu na referentnu izobaru od 1013,25 hPa. U zrakoplovu se može očitati postavljanjem referentnog tlaka zraka na osjetljivom barometarskom visinomjeru (OBV) na iznos od 1013 hPa. Razina leta predstavlja visinu po tlaku podijeljenu sa 100 i zaokruženu na najbližu tisućicu, npr. visina po tlaku od 25.000 ft odgovara razini leta 250 (FL 250) [9].

Porastom visine leta tlak zraka pada, kao što je objašnjeno u poglavlju 2. Sukladno tome, što je visina po tlaku veća, tlak zraka bit će manji. Padom tlaka zraka smanjuje se i gustoća zraka prema jednadžbi (2) čime se smanjuju i performanse zrakoplova. Kako bi se mogao odrediti utjecaj gustoće zraka na performanse, proračunata visina po tlaku koristi se u jednadžbi za određivanje visine po gustoći koja je razrađena u sljedećem potpoglavlju [7, 9].

Za izračun visine po tlaku potrebno je odrediti odstupanje apsolutne visine zrakoplova od tlaka zraka pri ISA uvjetima. Jednadžba izračuna visine po tlaku glasi:

$$PA = h_{QNH} + C_{PA} \cdot (1013 - QNH) \quad (12)$$

gdje je:

- PA – visina po tlaku [ft]
- h_{QNH} – apsolutna visina [ft]
- C_{PA} – koeficijent pretvorbe [ft/hPa]
- QNH – postavka tlaka zraka gdje je referentna točka mjerenja visine MSL [hPa] [11].

Koeficijent pretvorbe prikazuje iznos promjene visine u odnosu na promjenu tlaka zraka za 1 hPa od standardne vrijednosti. C_{PA} se može izravno izračunati korištenjem lineariziranih podataka o visini i tlaku zraka iz ISA tablice priložene u [6] kako slijedi:

- iz tablice se očitava vrijednost tlaka zraka na promatranoj visini
- iz tablice se očitava vrijednost tlaka zraka na sljedećoj visini
- izračuna se razlika tlakova zraka
- razlika promatranih visina podijeli se s razlikom tlakova zraka
- dobivena vrijednost pretvori se u odgovarajuću mjernu jedinicu [ft/hPa].

U nastavku slijedi primjer izračuna C_{PA} za visine 0 m, 2000 m, 4500 m i 9000 m koristeći izraz (13). Postupak je raspisan za izračun koeficijenta na rasponu visina od

0 do 100 m. Kako je način izračuna jednak za ostale visine, za 2000 m, 4500 m i 9000 m napisan je samo proračunati koeficijent pretvorbe. Pad tlaka zraka u inkrementima od 100 m uzet je kao linearna funkcija. U tablici 2 prikazane su vrijednosti tlakova zraka na promatranim visinama i na prvim sljedećim visinama.

Tablica 2. ISA vrijednosti tlaka zraka na različitim visinama

Visina [m]	Tlak zraka [hPa]
0	1013,25
100	1001,3
2000	795,01
2100	785,2
4500	577,52
4600	569,95
9000	308
9100	303,46

Izvor: [6]

$$(p_1 - p_2) \propto (h_2 - h_1) \quad (13)$$

Gdje su:

- p_1 i p_2 – tlakovi zraka na promatranj i prvoj sljedećoj visini [hPa]
- h_1 i h_2 – promatrana i prva sljedeća visina [m].

Iz (13) slijedi za raspon visina od 0 do 100 m:

$$(1013,25 - 1001,3) \text{ hPa} \propto (100 - 0) \text{ m}$$

$$11,95 \text{ hPa} \propto 100 \text{ m}$$

$$1 \text{ hPa} \propto 8,368 \text{ m}$$

$$8,368 \text{ m} \cdot 3,28 \text{ ft/m} = 27,447 \text{ ft}$$

$$C_{PA} = 27,447 \text{ ft/hPa}$$

Uvrštavanjem visina i odgovarajućih tlakova zraka za ostale promatrane slučajeve dobivaju se odgovarajući koeficijenti pretvorbe prikazani tablicom 3.

Tablica 3. Odnos koeficijenta pretvorbe i promatrane visine

Raspon visina [m]	C_{PA} [ft/hPa]
0 ÷ 100	27,447
2000 ÷ 2100	33,436
4500 ÷ 4600	43,329
9000 ÷ 9100	72,245

Iz proračunatih vrijednosti koeficijenata pretvorbe vidljivo je da se povećanjem visine povećava vertikalna udaljenost između izobarnih ploha koje su međusobno udaljene 1 hPa, odn. odstupanje vrijednosti tlaka zraka od ISA uvjeta bit će izraženije što je zrakoplov na većoj visini.

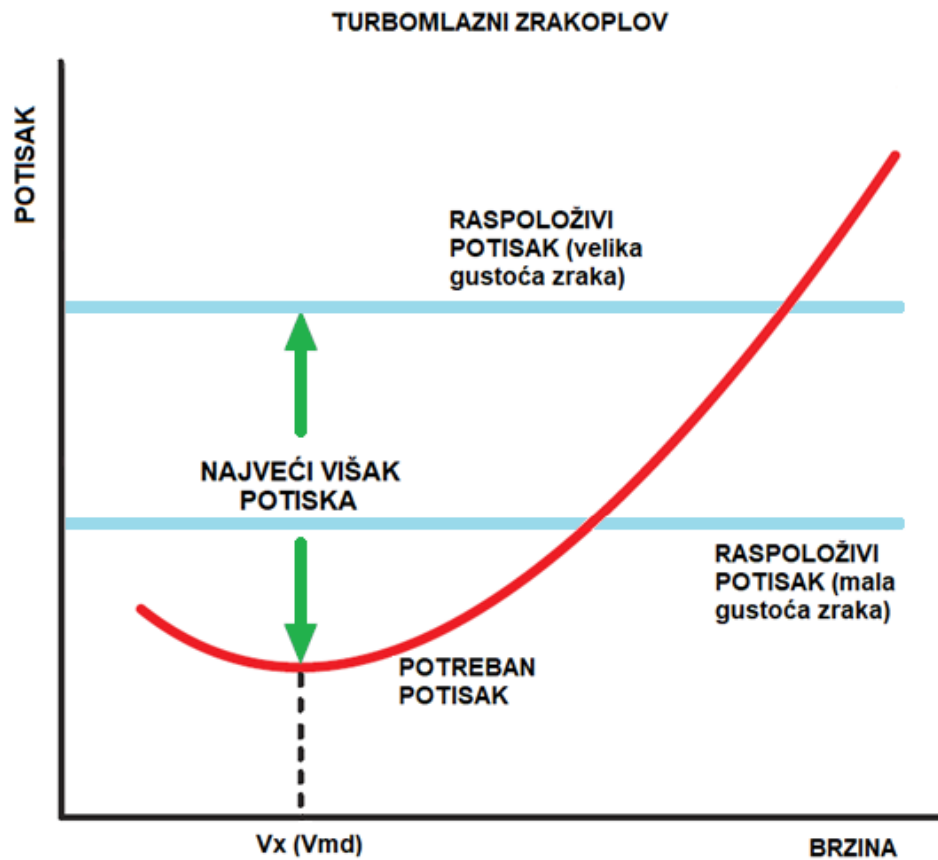
Kako se za svaku visinu ne bi posebno računala vrijednost C_{PA} , za male visine leta (v. tablicu 3) prihvatljivo je uzeti vrlo točnu aproksimaciju od 28 ili 30 ft/hPa, ovisno o razini tražene točnosti. Ovu aproksimaciju uzima se i za veće visine zbog jednostavnosti izračuna, unatoč većem odstupanju. U ovom radu smatrat će se da koeficijent pretvorbe C_{PA} iznosi 30 ft/hPa. Valja napomenuti kako mehanički osjetljivi barometarski visinomjeri lineariziraju kružni pomak kazaljke visine za kalibriranu aproksimiranu vrijednost koeficijenta pretvorbe [12].

3.3. Visina po gustoći

Maseni protok zraka ovisi o gustoći zraka koja se porastom visine smanjuje. Visina zrakoplova po tlaku na kojoj je gustoća zraka jednaka gustoći zraka na visini pri ISA uvjetima naziva se visinom po gustoći (engl. *Density Altitude – DA*) [9].

Smanjenje gustoće zraka uzrokuje smanjenje raspoloživog potiska zrakoplova zbog smanjenog masenog protoka. Kako bi zrakoplov zadržao sposobnosti penjanja pri određenoj brzini i određenom kutu penjanja, raspoloživi potisak motora mora biti veći od potrebnog potiska koji je definiran krivuljom ukupnog otpora zrakoplova što je prikazano slikom 3. Razlika između raspoloživog potiska i potrebnog potiska naziva se viškom potiska i izravni je pokazatelj performansi zrakoplova na određenoj visini. Brzina zrakoplova pri kojoj je višak potiska najveći naziva se brzinom najvećeg kuta penjanja (V_x) ili brzinom najmanjeg otpora (V_{md}). Izračunom visine po gustoći

omogućuje se određivanje performansi zrakoplova u specifičnim atmosferskim uvjetima na aerodromu [9].



Slika 3. Ovisnost viška potiska o gustoći zraka
Izvor: [9]

Visina po gustoći, uzevši u obzir visinu po tlaku, ovisi o odstupanju temperature zraka od standardnih vrijednosti, što je vidljivo i iz jednadžbe (2) za izračun gustoće. Prema tome, jednadžba za izračun visine po gustoći glasi:

$$DA = PA + C_{DA} \cdot (t_a - t_{std}) \quad (14)$$

pri čemu je:

- DA – visina po gustoći [ft]
- PA – visina po tlaku [ft]
- C_{DA} – koeficijent ispravke [ft/°C]
- t_a – trenutna temperatura zraka na visini po tlaku [°C]
- t_{std} – standardna temperatura zraka na visini po tlaku [°C] [11].

Standardna temperatura zraka na visini po tlaku računa se pomoću ISA definiranog smanjenja temperature s visinom u troposferi za koju se uzima da je 2°C svakih 1000 ft što je prikazano jednadžbom (15) [11].

$$t_{std} = 15 - \frac{2}{1000} \cdot PA \quad (15)$$

Koeficijent ispravke pokazuje odnos promjene visine s obzirom na promjenu temperature od 1°C od standardne vrijednosti. Kako se promjena gustoće, zbog odstupanja temperature, i visina leta ne mogu izravno preračunati, korišten je sljedeći postupak za izračun C_{DA} :

- pomoću jednadžbe stanja idealnog plina (2) za dobivanje gustoće zraka, uz pretpostavku da je tlak zraka konstantan što predstavlja konstantnu visinu leta, temperatura zraka povećana/smanjena je za 1 K, što odgovara promjeni od 1°C
- dobivena gustoća uspoređena je sa standardnim gustoćama na dvjema susjednim visinama iz [6]
- interpoliran je položaj dobivene gustoće između dvije poznate visine čime se dobije visina koja odgovara koeficijentu ispravke C_{DA} .

Postupak izračuna koeficijenta ispravke razrađen je na primjeru visine 0 m. Nakon izračuna prikazana je tablica s vrijednostima C_{DA} za visine 0, 2000, 4500 i 9000 m. U tablici 4 navedeni su ISA parametri korišteni u izračunima za navedene visine i prve sljedeće/prethodne visine.

Tablica 4. ISA temperatura, tlak i gustoća na promatranim visinama

h [m]	T [K]	p [Pa]	ρ [kg/m ³]	h [m]	T [K]	p [Pa]	ρ [kg/m ³]
-100	288,81	102530	1,2368	4400	259,58	58517	0,7854
0	288,15	101325	1,2250	4500	258,93	57752	0,7770
100	287,51	100130	1,2133	4600	258,28	56995	0,7688
1900	275,81	80493	1,0167	8900	230,39	31260	0,4727
2000	275,16	79501	1,0066	9000	229,74	30800	0,4671
2100	274,51	78520	0,9965	9100	229,09	30346	0,4615

Izvor: [6]

Za visinu 0 m iz jednadžbe (2) dobivena je vrijednost gustoće u uvjetima kad je temperatura zraka za 1 K (ili 1°C) veća od standardne vrijednosti temperature na visini (ISA+1 slučaj) i u uvjetima kad je temperatura za 1 K (1°C) manja (ISA-1 slučaj).

$$\rho_{ISA+1} = \frac{p_0}{R \cdot (T_0 + 1)} = \frac{101325}{287,053 \cdot 289,15} = 1,22076 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{ISA-1} = \frac{p_0}{R \cdot (T_0 - 1)} = \frac{101325}{287,053 \cdot 287,15} = 1,22927 \text{ kg/m}^3$$

Dobivene gustoće zatim se zasebno uvrštavaju u jednadžbu (16) iz koje se interpolacijom iz dvije poznate gustoće na dvjema susjednim visinama dobiva promjena visine uzrokovana odstupanjem temperature od ISA uvjeta. Ta promjena visine predstavlja koeficijent ispravke C_{DA} . Kako je koeficijent dobiven posrednim putem, u jednadžbi (16) ne postoji parametar koji izravno opisuje mjernu jedinicu za temperaturu [°C] u izrazu [ft/°C]. Pretpostavljeno je da će izračunata promjena u [ft] odgovarati promjeni za 1°C uzevši u obzir istovremeno jednadžbe (2) i (16).

$$dh_{\rho_{ISA\pm 1}} = (h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_{ISA\pm 1}}{\rho_1 - \rho_2} \right) \quad (16)$$

Pri čemu je:

- $dh_{\rho_{ISA\pm 1}}$ – promjena visine zbog promjene gustoće uzrokovane ISA temperaturnim odstupanjem [m]
- h_2 – prva sljedeća/prethodna visina [m]
- h_1 – promatrana visina [m]
- ρ_1 – gustoća na promatranoj visini [kg/m³]
- $\rho_{ISA\pm 1}$ – gustoća na promatranoj visini pri odstupanju temperature ISA±1 [kg/m³]
- ρ_2 – gustoća na prvoj sljedećoj/prethodnoj visini [kg/m³].

Za gustoću pri ISA+1 iznos koeficijenta je sljedeći:

$$dh_{\rho_{ISA+1}} = (100 - 0) \cdot \left(\frac{1,225 - 1,22076}{1,225 - 1,2133} \right)$$

$$dh_{\rho_{ISA+1}} = 36,24 \text{ m} \cdot 3,28 \text{ ft/m} = 118,87 \text{ ft}$$

$$C_{DA(ISA+1)} = 118,87 \text{ ft/}^\circ\text{C}$$

Za gustoću pri ISA-1 koeficijent ispravke iznosi:

$$dh_{\rho_{ISA-1}} = (-100 - 0) \cdot \left(\frac{1,225 - 1,22927}{1,225 - 1,2368} \right)$$

$$dh_{\rho_{ISA-1}} = -36,19 \text{ m} \cdot 3,28 \text{ ft/m} = -118,7 \text{ ft}$$

Kako je u jednadžbi (14) uzeta u obzir činjenica na povećanje, odn. smanjenje visine po gustoći u ovisnosti o razlici temperatura, uzima se apsolutna vrijednost dobivenog koeficijenta ispravke pri ISA-1.

$$C_{DA(ISA-1)} = 118,7 \text{ ft/}^\circ\text{C}$$

Provođenjem navedenog postupka za ostale visine dobivaju se iznosi koeficijenata ispravke za izračun visine po gustoći prikazani tablicom 5.

Tablica 5. Koeficijenti ispravke na promatranim visinama

Visina [m]	$C_{DA(ISA+1)}$ [ft/°C]	$C_{DA(ISA-1)}$ [ft/°C]
0	118,87	118,7
2000	120,75	116,84
4500	119,46	117,74
9000	122,2	115,95
Prosjek C_{DA}	120,32	117,31

Koeficijenti ispravke ujednačeni su za sve promatrane visine i u izračunu visine po gustoći pomoću jednadžbe (14) u ovom radu smatrat će da C_{DA} iznosi 120 ft/°C. Kada je temperatura zraka veća od ISA vrijednosti, visina po gustoći će rasti što indicira na smanjenje performansi zrakoplova. Analogno tome, u slučaju niskih temperatura u odnosu na ISA uvjete, gustoća zraka na promatranjoj visini se povećava čime se visina po gustoći smanjuje što povoljno utječe na performanse.

U nastavku ovog potpoglavlja bit će razrađeni izabrani primjeri zadatka iz [6] koji se odnose na visinu po tlaku i gustoći. Tekst primjera preveden je na hrvatski od strane autora, vodeći računa da se ne izgubi smisao zadatka. Cilj je prikazati osnovne principe upotrebe jednadžbi i odnose fizikalnih veličina u izračunima.

Primjer 1. Zrakoplov leti na nekoj apsolutnoj visini. Okolni tlak i temperatura zraka su $2,65 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$, odn. 220 K . Izračunati visinu po tlaku i po gustoći.

Visina po tlaku iščita se iz tablice ISA atmosfere, uz poznatu vrijednost tlaka zraka. Naime, visina po tlaku jednaka je onoj visini u ISA modelu atmosfere na kojoj se vrijednost zadanog tlaka i ISA tlaka zraka podudaraju. Pomoću tablice priložene u [6] lako je uočljivo kako je visina kojoj odgovara tlak zraka od $2,65 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ (26.500 Pa) jednaka 10.000 m , što predstavlja visinu po tlaku.

Za izračun visine po gustoći potrebno je posrednim putem prvo odrediti gustoću pri zadanom tlaku i temperaturi zraka iz jednadžbe (2) te potom iščitati iznos visine za proračunatu gustoću. Nakon izračuna dobiva se gustoća zraka od $0,4196 \text{ kg/m}^3$. S poznatom gustoćom zraka opet se ulazi u priloženu tablicu standardne atmosfere. Vidljivo je kako se tražena visina po gustoći nalazi između poznatih visina od 9800 i 9900 m . Kako bi se točno odredila visina po gustoći, potrebno je interpolirati vrijednosti visina i gustoća kako slijedi:

$$DA = h_1 + (h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho}{\rho_1 - \rho_2} \right) \quad (17)$$

gdje su: DA tražena visina po gustoći [m]; h_1 prva promatrana visina [m]; h_2 druga promatrana visina [m]; ρ_1 gustoća na h_1 [kg/m^3]; ρ_2 gustoća na h_2 [kg/m^3] i ρ gustoća na traženoj DA [kg/m^3]. Odabir prve i druge promatrane visine proizvoljan je između vrijednosti dviju gore navedenih poznatih visina. U ovom primjeru uzeto je da h_1 iznosi 9800 m , a h_2 9900 m . Uvrštavanjem poznatih podataka o visini te o gustoći zraka dobiva se iznos visine po gustoći od 9880 m .

Primjer 2. Zračna struja u testnoj sekciji zračnog tunela ima tlak od $0,92 \text{ atm}$. Koja se visina po tlaku simulira kada se u testnu sekciju stavi model zrakoplova?

Prvo je potrebno preračunati vrijednost tlaka zraka u zračnom tunelu. Kako je, prema [6], 1 atm jednaka $1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, onda je vrijednost $0,92 \text{ atm}$ ekvivalentna 92.920 Pa . S poznatim tlakom zraka, slično kao i u prethodnom primjeru, ulazi se u tablicu ISA atmosfere. Uočljivo je kako se zadani tlak zraka nalazi između visina od 700 i 800 m , stoga je potrebno izvršiti interpolaciju na sličan način kao što je napravljeno u jednadžbi (17). Potrebno je izmijeniti izraze za gustoće s izrazima za tlakove kako slijedi:

$$PA = h_1 + (h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{p_1 - p}{p_1 - p_2} \right) \quad (18)$$

pri čemu su: PA tražena visina po tlaku; p_1 tlak na h_1 [Pa]; p_2 tlak na h_2 [Pa] i p tlak na traženoj PA koji je zadan u zadatku [Pa]. Odabir prve i druge promatrane visine opet je proizvoljan. U ovom primjeru uzima se h_1 od 700 m, a h_2 od 800 m. Nakon uvrštavanja podataka dobiva se vrijednost simulirane visine po tlaku u zračnom tunelu koja je 724,5 m.

Primjer 3. *Promatra se zrakoplov koji leti na visini po tlaku od 33.500 ft i na visini po gustoći od 32.000 ft. Izračunati vanjsku temperaturu zraka.*

Za izračun vanjske temperature zraka t_a koristit će se jednadžba (14) za izračun visine po gustoći. Standardna ISA temperatura na visini po tlaku dobiva se izrazom (15). Uvrštavanjem podataka o visini po tlaku izračunata standardna temperatura t_{std} na 33.500 ft iznosi -52°C . Preoblikovanjem jednadžbe (14), tako da se izrazi nepoznanica t_a i uvrste poznati podaci o DA , PA i t_{std} , jednostavno se može izračunati vanjska temperatura zraka koja iznosi $-64,5^\circ\text{C}$.

4. Visina leta zrakoplova

Visina leta ključan je parametar koji se prikazuje visinomjerom. Visinomjer je kalibriran prema ISA uvjetima. Određivanje visine leta koristi se u navigacijskim postupcima čiji je cilj, među ostalima, nadvišenje prepreka, mogućnost izračuna prikladne udaljenosti za jedrenje u slučaju otkaza motora, zadovoljenje uvjeta u prilaznim i odlaznim postupcima, smanjenje potrošnje goriva te smanjenje buke.

Mjerenje visine u konvencionalnom zrakoplovstvu moguće je na dva načina: mjerenjem statičkog tlaka i pomoću radio-visinomjera. Standardni način mjerenja kojim se pomoću statičkih otvora na trupu zrakoplova mjeri statički tlak zraka koristi se na svim zrakoplovima. Naime, kao što je objašnjeno u ranijim poglavljima, tlak zraka pada porastom visine leta i upravo se ta poveznica koristi u ovom načinu mjerenja. Korištenje radio-visinomjera svojstveno je zrakoplovima koji su certificirani za slijetanje u uvjetima male vidljivosti, a pouzdano je do visine od 600 do 800 metara iznad Zemlje. Antena radio-visinomjera na donjoj strani trupa zrakoplova emitira radijski signal prema Zemlji. Poznatim vremenom potrebnim da se signal vrati do antene i brzinom rasprostiranja signala dobiva se prijeđeni put [13].

Kako je objašnjeno u drugom poglavlju, određivanje visine prema tlaku zraka vrši se od određene referentne točke. Tlak zraka koji se postavlja na visinomjeru ovisi o promatranoj referentnoj točki (v. 2.4. Tlak zraka). Prema tome, razlikuju se tri moguća prikaza visine:

- apsolutna visina – postavka tlaka QNH
- relativna visina – postavka tlaka QFE
- razina leta – postavka tlaka SPS [12, 13].

Zbog konstantnih odstupanja parametara stvarne atmosfere od ISA modela, očekivano je da će i visinomjer griješiti u prikazivanju visine. Najveće greške prikazivanja visine nastupaju zbog odstupanja tlaka zraka i temperature zraka od standardnih vrijednosti.

Greška uzrokovana nestandardnim tlakom zraka djelomično se ispravlja pomoću osjetljivog barometarskog visinomjera, namještanjem trenutnog referentnog tlaka zraka. Takva korekcija ne mora nužno biti točna na svim visinama leta zbog različite distribucije tlaka, temperature i gustoće zraka po visini. Međutim, kako svi zrakoplovi koriste istu vrijednost početnog tlaka zraka na malim visinama, pruženu od strane

kontrole zračnog prometa, tako će i moguće greške u prikazivanju visine leta biti jednake za sve korisnike određenog zračnog prostora [14].

Greška zbog nestandardne temperature puno je opasnija zbog nemogućnosti trenutnog ispravljanja i bit će objašnjena kasnije u ovom poglavlju.

4.1. Osjetljivi barometarski visinomjer

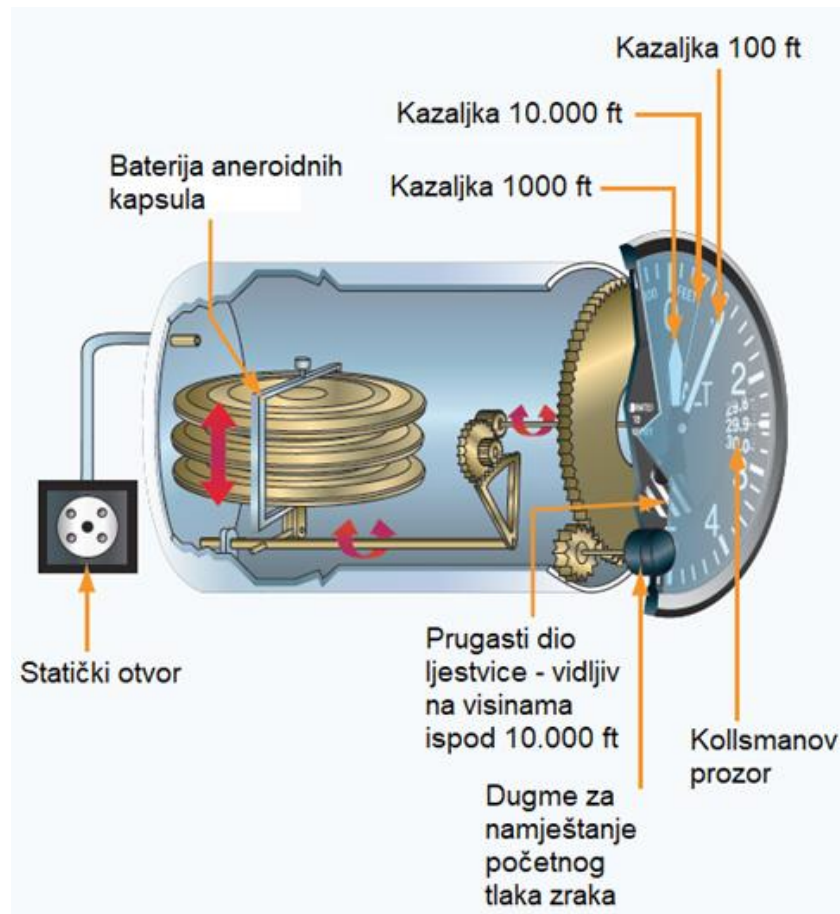
Osjetljivi barometarski visinomjer izveden je kao barometarski visinomjer kojem se može namještati početna vrijednost tlaka zraka. Princip rada zasniva se na mjerenju statičkog tlaka zraka i njegovoj pretvorbi u visinu leta.

Kada bi stanje atmosfere bilo prema ISA uvjetima prava visina leta zrakoplova podudarala bi se s visinom po tlaku. Jedino u tom slučaju visinomjer bi pokazivao apsolutno točnu visinu iznad referentne točke. Kako u stvarnoj atmosferi to nije slučaj, visinomjer griješi u prikazivanju visine po tlaku. Visina leta prikazana na visinomjeru naziva se indiciranom visinom, a u realnim uvjetima odstupa od prave visine zbog razlike u tlaku i temperaturi zraka od ISA uvjeta [14].

Kućište instrumenta hermetički je zatvoreno i u njega ulazi samo statički tlak iz statičkih otvora. Kao osjetilo apsolutnog tlaka zraka koristi se baterija aneroidnih kapsula u kojima je tlak konstantnog standardnog iznosa od 1013,25 hPa. Kapsule se, ovisno o iznosu dovedenog statičkog tlaka, skupljaju ili šire. Statički tlak zraka veći od 1013,25 hPa uzrokuje skupljanje baterije kapsula, dok manji tlak uzrokuje širenje kapsula. Prijenosni mehanizam povezuje bateriju aneroidnih kapsula s kazaljka koje prikazuju visinu leta. Skupljanje aneroidnih kapsula prenosi se kao smanjenje visine, a širenje kapsula kao povećanje visine leta. Namještanje vrijednosti početnog tlaka zraka ovisno o referentnoj točki mjerenja vrši se pomoću dugmeta. Prikaz postavljenog tlaka zraka potom je vidljiv na Kollsmanovom prozoru. Na slici 4 prikazani su dijelovi OBV-a [12, 15].

U slučaju začepljenja statičkog otvora na trupu zrakoplova trenutni statički tlak u kućištu visinomjera ostat će zarobljen. Kako se statički tlak zraka više ne mijenja, visinomjer će nastaviti prikazivati zadnju visinu prije začepljenja sustava. Neki zrakoplovi opremljeni su rezervnim statičkim izvorom u pilotskoj kabini. Ako se blokira glavni izvor statičkog tlaka, pilot ima mogućnost aktivacije rezervnog koji koristi statički tlak iz pilotske kabine. Budući da je tlak zraka u pilotskoj kabini niži od tlaka zraka

izvan zrakoplova, zbog efekta Venturijeve cijevi, visinomjer će prikazivati malo veću visinu leta nego inače [15].



Slika 4. Dijelovi osjetljivog barometarskog visinomjera, [15]

4.2. Utjecaj temperature zraka na prikaz visine leta

Temperatura zraka utječe na međusobnu udaljenost izobarnih ploha u atmosferi. Kada je atmosfera hladnija od ISA uvjeta, molekule zraka gube energiju i gravitacija ih privlači bliže površini Zemlje. Posljedično, gustoća i tlak zraka padaju brže s porastom visine nego u ISA uvjetima. Kada je atmosfera toplija od ISA uvjeta, molekule zraka imaju veću energiju i mogu se jače oduprijeti gravitaciji nego u prethodnom slučaju. Samim time, promjena gustoće i tlaka zraka s visinom je manja [16].

Kako visinomjer prikazuje visinu leta mjereći tlak zraka, a baždaren je prema ISA parametrima, vrlo je važno pokazati promjenu vertikalne udaljenosti izobarnih ploha zbog odstupanja vrijednosti temperature zraka od standardne. Utjecaj temperature zraka na udaljenost izobara u atmosferi može se prikazati hipsometrijskom jednačbom. Ta jednačba nastaje kombinacijom hidrostatičke jednačbe (1) i jednačbe stanja idealnog plina (2) što je prikazano u nastavku.

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh$$

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Uvrštavanjem gustoće zraka ρ iz (2) u (1) i sređivanjem izraza dobiva se integralna jednačba:

$$\int_{p_1}^{p_2} -\frac{1}{p} dp = \int_{h_1}^{h_2} \frac{g}{R \cdot T} dh$$

Daljnijim rješavanjem i sređivanjem gornjeg izraza dobiva se hipsometrijska jednačba koja glasi:

$$h_2 - h_1 = \frac{R \cdot \bar{T}}{g} \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad (19)$$

gdje je:

- h_2-h_1 – visina između dvije izobare [m]
- R – specifična plinska konstanta suhog zraka 287,053 [J/(kg·K)]
- \bar{T} – srednja temperatura zraka [K]
- g – ubrzanje Zemljine sile teže [m/s²]
- p_1 – tlak zraka na visini h_1 [Pa]
- p_2 – tlak zraka na visini h_2 [Pa] [17].

Srednja temperatura zraka za dovoljno male slojeve atmosfere može se prikazati kao jednostavna aritmetička sredina.

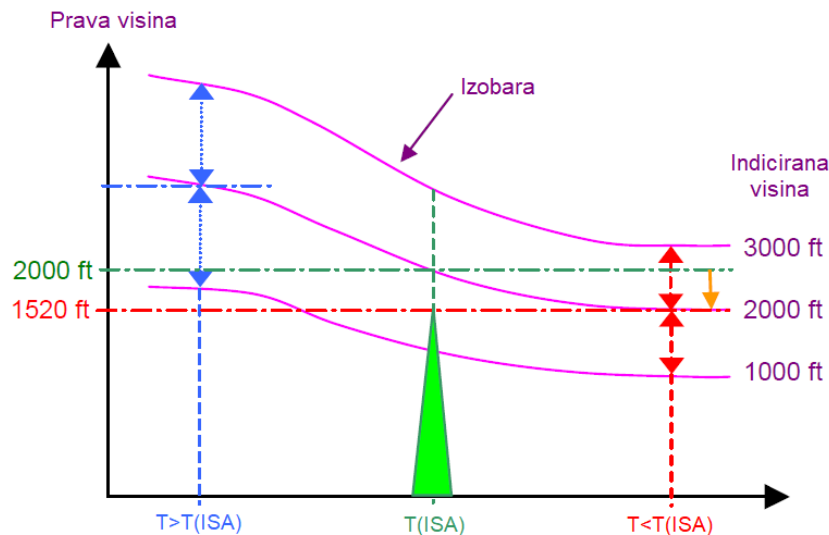
$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (20)$$

Pri čemu je:

- \bar{T} – srednja temperatura zraka [K]
- T_1 – temperatura zraka na visini h_1 [K]
- T_2 – temperatura zraka na visini h_2 [K] [17].

U hipsometrijskoj jednačbi (19) navodi se postupak izračuna udaljenosti izobara u atmosferi sa suhim zrakom. Zanimljivo je sekundarni učinak vlažnosti zraka na gustoću zraka koji dodatno uslođnjava izračun. Neovisno o tome, iz izraza (19) vidljivo je kako je vertikalna udaljenost izobara proporcionalno ovisna o temperaturi zraka što

je prikazano slikom 5. Smanjenjem temperature zraka od standardnih vrijednosti, izobare će biti bliže; dok će povećanjem temperature visina između izobara biti veća. Samim time, prava visina leta zrakoplova bit će manja od indicirane visine pri nižim temperaturama. Pri većim temperaturama prava visina bit će veća od indicirane visine zrakoplova.



Slika 5. Utjecaj temperature zraka na visinu leta, [18]

Nakon što je poznat utjecaj temperature na vertikalni raspored izobara u atmosferi, potrebno je odrediti grešku visinomjera kako bi se ona mogla ispraviti. Relativna greška visinomjera izražena je kao:

$$E \equiv \left(\frac{h_{ISA} - h}{h} \right) \quad (21)$$

gdje je:

- E – relativna greška visinomjera [/]
- h_{ISA} – visina izobare u ISA uvjetima (indicirana visina leta) [m]
- h – visina izobare u stvarnoj atmosferi (prava visina leta) [m] [17].

Nadalje, kako bi se relativna greška izrazila preko temperature zraka koristi se supstitucija preko hipsometrijske jednadžbe (19). Visina izobare uzima se kao razlika visina između referentnog tlaka postavljenog na visinomjeru i tlaka zraka na trenutnoj visini zrakoplova (h_2-h_1) pa iz toga slijedi:

$$E = \left(\frac{\bar{T}_{ISA} - \bar{T}}{\bar{T}} \right) \quad (22)$$

pri čemu je:

- E – relativna greška visinomjera [/]
- \bar{T}_{ISA} – srednja temperatura sloja u standardnoj atmosferi [K]
- \bar{T} – srednja temperatura sloja u stvarnoj atmosferi [K] [17].

Za izračun srednje temperature sloja u standardnoj atmosferi koristi se sljedeći izraz:

$$\bar{T}_{ISA} = 288,15 - 0,5 \cdot L_0 \cdot h \quad (23)$$

gdje je:

- \bar{T}_{ISA} – srednja temperatura sloja u standardnoj atmosferi [K]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,0065 K/m ili 0,00198 K/ft]
- h – visina promatranog sloja atmosfere [m ili ft] [17].

Za izračun srednje temperature sloja u stvarnoj atmosferi polazi se od pretpostavke da je pad temperature zraka s visinom linearan i jednak kao u ISA uvjetima. Prema tome slijedi da je:

$$\bar{T} = T_0 - 0,5 \cdot L_0 \cdot h \quad (24)$$

gdje je:

- \bar{T} – srednja temperatura sloja u stvarnoj atmosferi [K]
- T_0 – stvarna temperatura zraka na MSL-u [K]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,0065 K/m ili 0,00198 K/ft]
- h – visina promatranog sloja atmosfere [m ili ft] [17].

Uvrštavanjem jednadžbi (23) i (24) u izraz (22) dobiva se izraz za izračun relativne greške visinomjera u ovisnosti o stvarnoj temperaturi zraka i visini promatranog sloja, koja u ovom slučaju odgovara visini iznad MSL-a.

$$E = \left(\frac{288,15 - T_0}{T_0 - 0,5 \cdot L_0 \cdot h} \right) \quad (25)$$

Pri čemu je:

- E – relativna greška visinomjera [/]
- T_0 – stvarna temperatura zraka na MSL-u [K]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,0065 K/m ili 0,00198 K/ft]
- h – visina promatranog sloja atmosfere [m ili ft] [17].

Kako je pretpostavljeno da visina promatranog sloja atmosfere u (23) i (24) odgovara ISA uvjetima, može se zaključiti da je to indicirana visina leta. Apsolutna greška visinomjera pri srednjoj razini mora određuje se kao umnožak indicirane visine leta i relativne greške visinomjera kako slijedi:

$$C = h \cdot \left(\frac{288,15 - T_0}{T_0 - 0,5 \cdot L_0 \cdot h} \right) \quad (26)$$

gdje je:

- C – apsolutna greška visinomjera na MSL-u [ft]
- h – indicirana visina leta [ft]
- T_0 – stvarna temperatura zraka na MSL-u [K]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,00198 K/ft] [17].

Za izračun greške visinomjera kada se visina referentne točka (najčešće nadmorska visina aerodroma) ne nalazi pri MSL-u može se pretpostaviti da se temperatura zraka na MSL-u dobiva po ovom izrazu:

$$T_0 = T_{AD} + L_0 \cdot h_{AD} \quad (27)$$

gdje je:

- T_{AD} – stvarna temperatura zraka na h_{AD} [K]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,00198 K/ft]
- h_{AD} – nadmorska visina referentne točke (najčešće aerodroma) [ft] [16].

Supstitucijom izraza (27) u izraz (26), dodavanjem nadmorske visine referentne točke u izračun, te preobrazbom temperature zraka u [°C] napokon se dobiva jednačba za izračun apsolutne greške visinomjera koja je objavljena u [19].

$$C = h \cdot \left(\frac{15 - t_0}{273 + t_0 - 0,5 \cdot L_0 \cdot (h + h_{AD})} \right) \quad (28)$$

Gdje je:

- C – apsolutna greška visinomjera [ft]
- h – relativna visina leta iznad referentne točke (uobičajeno aerodroma) [ft]
- t_0 – temperatura zraka na MSL-u [°C]
- L_0 – pad temperature zraka s visinom [0,00198°C/ft]
- h_{AD} – nadmorska visina referentne točke [ft].

Dobivene pozitivne vrijednosti apsolutne greške visinomjera predstavljaju iznos korekcije koje pilot mora nadodati na indiciranu visinu leta kako bi nadoknadio manju pravu visinu leta zbog razlike u visini izobarnih ploha. Takve vrijednosti znače da je temperatura zraka niža od standardne vrijednosti.

Jednadžba (28) izvedena je s pretpostavkom da temperatura zraka linearno pada porastom visine, što u stvarnoj atmosferi nije slučaj. Stoga ova jednadžba daje rezultate unutar 5% točnosti od točne korekcije za nadmorske visine referentne točke do 10.000 ft i za minimalne relativne visine do 5000 ft iznad te referentne točke [19].

Kako se vrijednosti korekcije, odn. apsolutne greške visinomjera zaokružuju na vrijednost koja se može operativno koristiti, prihvatljivo je koristiti izraz (28) za ispravak visina koje se koriste u letačkim operacijama [16]. Korištenjem navedene jednadžbe bit će rađeni svi daljnji proračuni koji se tiču utjecaja temperature zraka na prikaz visine leta u ovom radu.

Pojednostavljena jednadžba za izračun prave visine leta, uz poznatu indiciranu visinu i stvarnu temperaturu zraka na površini Zemlje, može se dobiti iz Gay-Lussacovog plinskog zakona. Zakon opisuje da tlak plina pri konstantnom volumenu izravno ovisi o temperaturi plina. Omjer tlaka i temperature plina pri konstantnom volumenu bit će jednak za bilo koje odnose tlakova i temperatura, što je prikazano jednadžbom (29).

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (29)$$

pri čemu je:

- p_1 – tlak promatranog plina u uvjetima 1 [Pa]
- T_1 – temperatura promatranog plina u uvjetima 1 [K]
- p_2 – tlak promatranog plina u uvjetima 2 [Pa]
- T_2 – temperatura promatranog plina u uvjetima 2 [K] [20].

Uz pretpostavku da je na visini h tlak zraka jednak vrijednosti p [21], gornji izraz može se napisati kao:

$$\frac{h_1}{T_1} = \frac{h_2}{T_2}$$

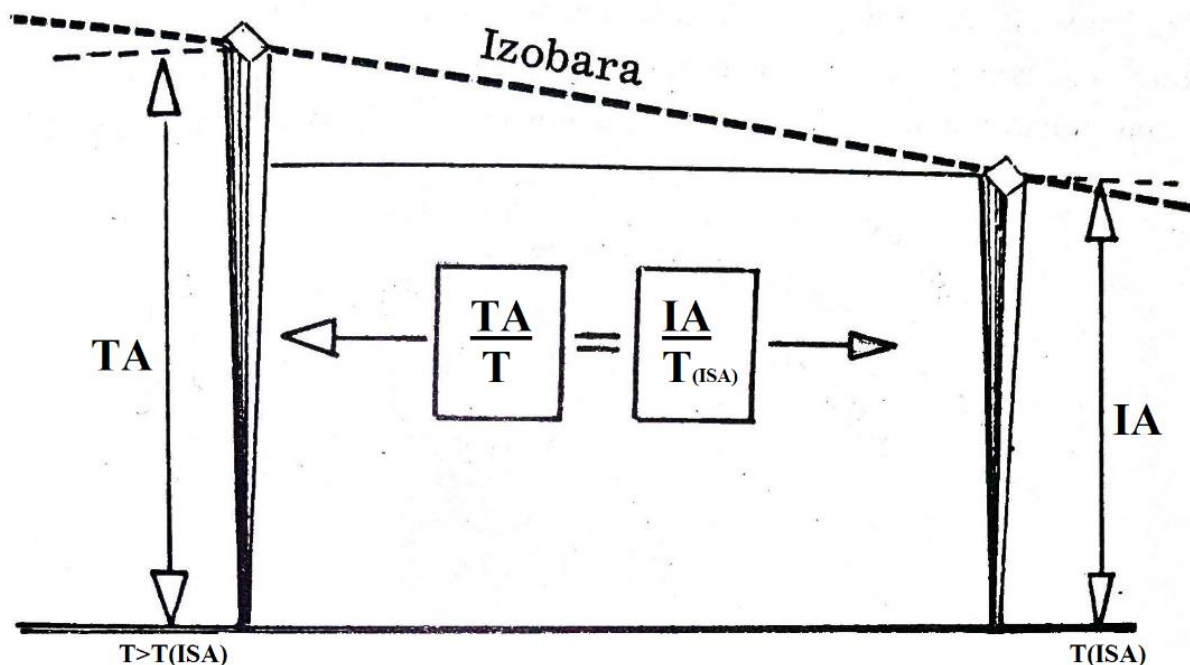
Nadalje, iz prethodnog izraza, može se izraziti odnos indicirane visine IA i stvarne visine TA ovisno o temperaturi zraka kao:

$$TA = IA \cdot \frac{T}{T_{ISA}} \quad (30)$$

pri čemu je:

- TA – prava visina leta [ft]
- IA – indicirana visina leta [ft]
- T – stvarna temperatura zraka na površini Zemlje [K]
- T_{ISA} – standardna temperatura zraka na MSL-u [288,15 K] [7].

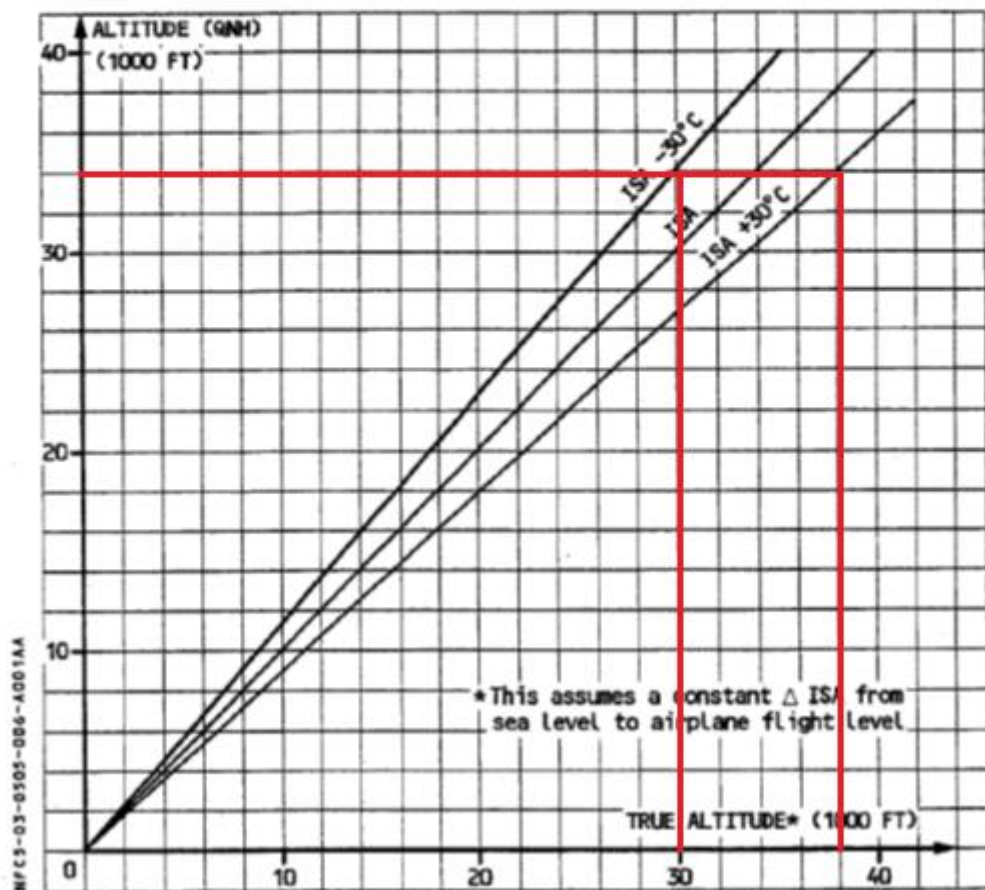
Iz izraza (30), koji je grafički prikazan slikom 6, napravljene su brze tablice (grafički prikazi) korekcije za nestandardnu temperaturu na velikim visinama leta, odn. visinama tijekom krstarenja. Primjer jedne tablice prikazan je na slici 7. Takve tablice dostupne su pilotima u operativnim priručnicima. Za preciznije korekcije visine zbog odstupanja temperature, koje uzimaju u obzir nadmorsku visinu referentne točke, koristi se jednažba (28) [18].



Slika 6. Odnos prave visine i indicirane visine leta ovisno o temperaturi zraka, [21]

ALTITUDE TEMPERATURE CORRECTION

FOR HIGH ALTITUDE USE



Slika 7. Primjer tablice za brzu korekciju visine leta zbog odstupanja temperature zraka, [7]

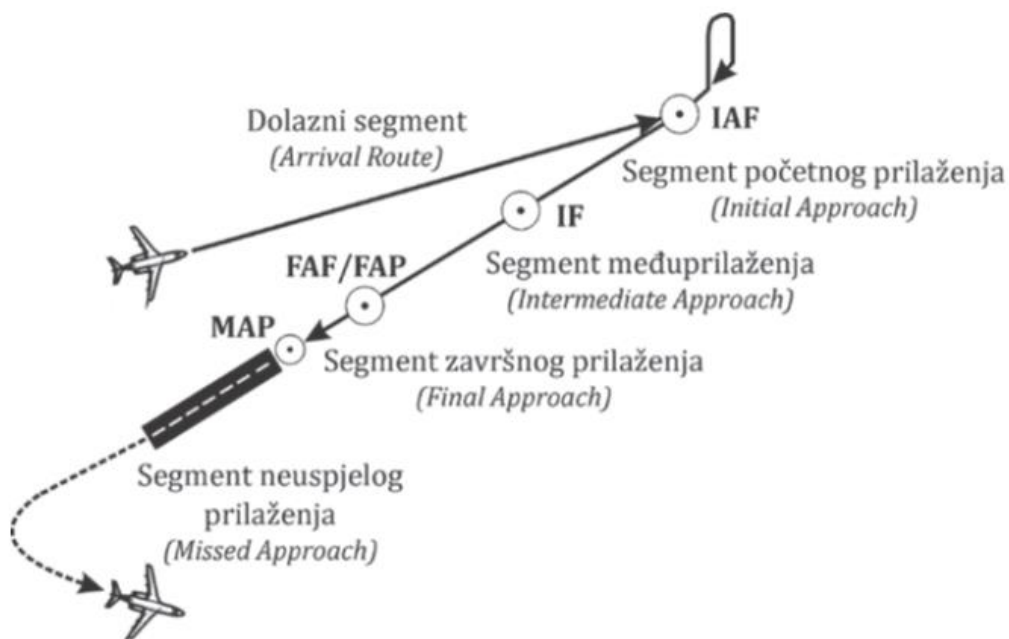
Iz slike 7 vidljivo je kako je grafičko određivanje odnosa prave visine leta i indicirane visine ovisno o odstupanju temperature zraka od ISA uvjeta uvjetno neprecizno. Primjerice, za indiciranu visinu 34.000 ft pri ISA-30 prava visina prema tablici iz slike 7 iznosit će 30.000 ft, a pri ISA+30 38.000 ft. Za manje visine linije ISA+30 i ISA-30 puno su bliže i teže je odrediti pravi odnos indicirane i prave visine leta. Stoga se ovakav grafički prikaz ne smije koristiti za proračune korekcije visine tijekom prilaženja. Umjesto njega, koriste se proračunate vrijednosti korekcije koje su razrađene u nastavku ovog rada.

5. Postupci instrumentalnog prilaženja

Prilaženje je faza leta u kojem se zrakoplov konfigurira i usmjerava s ciljem slijetanja na uzletno-sletnu stazu (USS). Jedna je od najkritičnijih faza zbog relativno male brzine zrakoplova, konfiguracije koja stvara veliki otpor te male visine leta koje, uparene s nepovoljnim atmosferskim uvjetima, predstavljaju izazov posadama zrakoplova. Tome u prilog govori podatak da se 36% zrakoplovnih nesreća dogodi u fazi prilaženja [22].

Kako bi se omogućilo slijetanje zrakoplova u nepovoljnim vremenskim uvjetima, ponajprije smanjenoj vidljivosti, te smanjilo opterećenje pilota u kritičnoj fazi leta, uvedeni su postupci instrumentalnog prilaženja (engl. jd. *Instrument Approach Procedure – IAP*). Takvi postupci sastoje se od niza unaprijed utvrđenih manevara koji se, korištenjem instrumenata u zrakoplovu, izvode s određenom zaštitom od prepreka. Postupak instrumentalnog prilaženja sastoji se od pet segmenata koji su još dodatno prikazani i na slici 8:

- dolazni segment (engl. *Arrival Route*)
- segment početnog prilaženja (engl. *Initial Approach*)
- segment međuprilaženja (engl. *Intermediate Approach*)
- segment završnog prilaženja (engl. *Final Approach*)
- segment neuspjelog prilaženja (engl. *Missed Approach*) [22].



Slika 8. Prikaz segmenata postupka instrumentalnog prilaženja, [22]

Cilj svakog segmenta postepeno je dovođenje zrakoplova u optimalan položaj za slijetanje pri čemu se osigurava sigurnost, redovitost i ekspeditivnost postupka prilaženja od preletišta početnog prilaženja (engl. *Initial Approach Fix – IAF*) ili od početka utvrđene dolazne rute do točke s koje se slijetanje može završiti, odn. ako se ne može završiti, do položaja na kojoj su primjenjiva pravila nadvišavanja prepreka u krugu čekanja ili fazi krstarenja [19, 22].

S obzirom na način elektroničkog vođenja zrakoplova IAP može biti:

- neprecizan (engl. *Non-precision approach – NPA*) – vođenje zrakoplova osigurano je jedino u horizontalnoj ravnini u svojstvu bočnog (engl. *lateral*) odstupanja od zadane putanje; radio-navigacijski uređaji koji se koriste u ovom prilaženju su: VOR, NDB, GNSS, LOC, SDF, SRA, uz mogućnost dodatnog korištenja DME-a za podatak o udaljenosti
- s vertikalnim vođenjem (engl. *Approach procedure with vertical guidance – APV*) – vođenje zrakoplova osigurano je u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini, ali postupak ne zadovoljava sve zahtjeve za precizan prilaz; u ovom prilaženju koristi se GNSS kao primarno sredstvo navođenja
- precizan (engl. *Precision approach – PA*) – vođenje zrakoplova osigurano je u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini korištenjem minimalnih visina propisanih operativnom kategorijom u prilaženju; radio-navigacijski sustav koji se aktivno koristi u tu svrhu je ILS [19, 22].

S obzirom na metode korištenja radio-navigacijskih sredstava, u ovom radu postupci instrumentalnog prilaženja podijeljeni su na konvencionalne i na RNP postupke. Pod konvencionalnim postupcima podrazumijevaju se svi oni kod kojih se ne primjenjuje metoda prostorne navigacije (engl. *Area navigation – RNAV*). Prostorna navigacija je metoda koja omogućava let zrakoplova na željenoj putanji koja se nalazi unutar područja pokrivanja zemaljskih radio-navigacijskih sredstava, ili unutar ograničenja sposobnosti autonomnog navigacijskog sustava na zrakoplovu, ili kombinacijom oba navedena [22]. RNP postupci prilaženja implementirani su unutar ICAO koncepta navigacije bazirane na performansama (engl. *Performance Based Navigation – PBN*) [23] i bit će detaljno razrađeni u ovom poglavlju.

5.1. Konvencionalni postupci prilaženja

Konvencionalni postupci instrumentalnog prilaženja dijele se na neprecizne i precizne. Instrumentalni dio postupka može se nastaviti vizualnim dijelom ukoliko položaj USS-a ne omogućava prilaženje iz pravca (engl. *straight-in approach*). Najkorišteniji među konvencionalnim postupcima je instrumentalni sustav za slijetanje (engl. *Instrument Landing System – ILS*), koji je trenutno jedini operativni precizni postupak prilaženja. Od nepreciznih postupaka, kada ILS sustav ili RNP postupci nisu dostupni, najviše se koriste prilaženja uz pomoć radio-navigacijskih sredstava kao što su LOC (engl. *Localizer*), VOR (engl. *Very high frequency (VHF) omnidirectional radio range*) i NDB (engl. *Non-directional beacon*). Uparivanjem navedenih sredstava s uređajem DME (engl. *Distance Measuring Equipment*), koji šalje podatak o udaljenosti zrakoplova, postiže se veća preciznost navođenja zrakoplova u prilaženju i mogućnost dodatne kontrole položaja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini [19, 22].

ILS je sustav koji omogućava sigurno i precizno navođenje zrakoplova u svim uvjetima vidljivosti, ovisno o kategoriji sustava te osposobljenosti zrakoplova i posade. Sastoji se od zemaljske opreme i opreme na zrakoplovu. Postoje tri zemaljske komponente koje čine ILS: odašiljač usmjerivača pravca prilaženja (engl. *Localizer – LOC*), odašiljač signala putanje poniranja (engl. *Glide path – GP*) i radiomarkeri. Opremu na zrakoplovu sačinjavaju: prijamnik LOC signala, prijamnik GP signala, prijamnik s prikaznikom signala radiomarkera i prikaznik ILS LOC i GP signala [22].

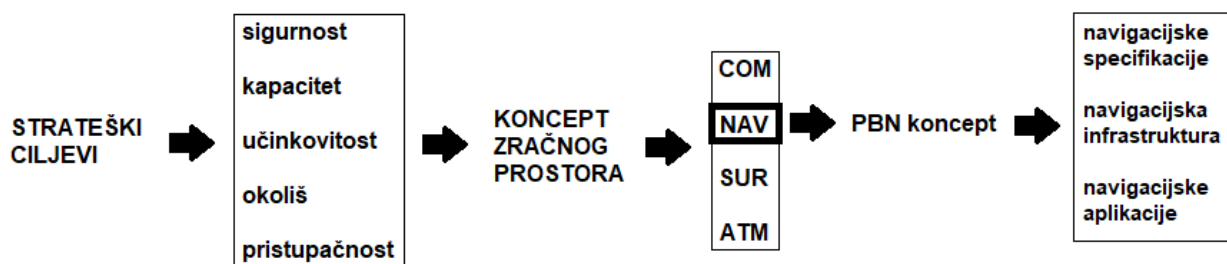
Neprecizni postupci prilaženja korištenjem VOR i NDB stanice od pilota zahtijevaju praćenje određene putanje od/do radio-navigacijskog sredstva pomoću kojeg se navode do uzletno-sletne staze. Zrakoplov stoga mora biti opremljen prijamnikom i prikaznikom VOR signala, te prijamnikom i prikaznikom NDB signala. Nedostatak VOR-a tijekom prilaženja je njegova svesmjernost gdje može doći do pogreške pilota u podešavanju pravca. Nedostatak NDB-a je njegova podložnost atmosferskim smetnjama.

U slučaju da zbog određenih ograničenja, primjerice konfiguracije terena, na aerodromu nije moguće implementirati ILS, postoji mogućnost osposobljavanja samo jedne komponente tog sustava – LOC. Time se osigurava veća preciznost horizontalnog elektroničkog vođenja zrakoplova nego kod VOR i NDB postupaka prilaženja.

5.2. RNP postupci prilaženja

Razvojem sustava prostorne navigacije došlo je do velike razlike u njihovim mogućnostima, načinima korištenja i implementaciji. Stoga je ICAO, s ciljem definiranja i sjedinjenja standarda, implementirao PBN koncept. Koncept navigacije bazirane na performansama standardizira zahtjeve navigacijske opreme zrakoplova i standarde zračnog prostora u kojem se odvija zračni promet. Zbog toga su definirani pojmovi navigacijske infrastrukture, navigacijskih specifikacija i navigacijskih aplikacija kao osnovnih komponenata u primjeni PBN-a [22].

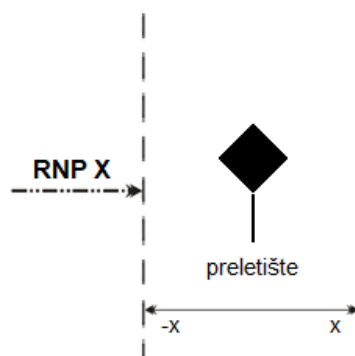
PBN pripada jednoj od temeljnih struktura u širem konceptu – konceptu zračnog prostora. Zadaća koncepta zračnog prostora udovoljiti je strateškim ciljevima dionika u zračnom prometu, a ICAO ih definira kao: sigurnost (engl. *safety*), kapacitet (engl. *capacity*), učinkovitost (engl. *efficiency*), okoliš (engl. *environment*) i pristupačnost (engl. *access*). Kako bi se ciljevi realizirali temeljne strukture kao što su komunikacijska mreža (engl. *Communication – COM*), navigacijska mreža (engl. *Navigation – NAV*), nadzorna mreža (engl. *Surveillance – SUR*) i mreža upravljanja zračnim prometom (engl. *Air Traffic Management – ATM*) moraju međusobno standardizirano djelovati [23]. Ovisnost strateških ciljeva o konceptu zračnog prostora i temeljnim strukturama unutar samog koncepta, s naglaskom na PBN, prikazani su slikom 9.



Slika 9. PBN koncept u ovisnosti o konceptu zračnog prostora, [23]

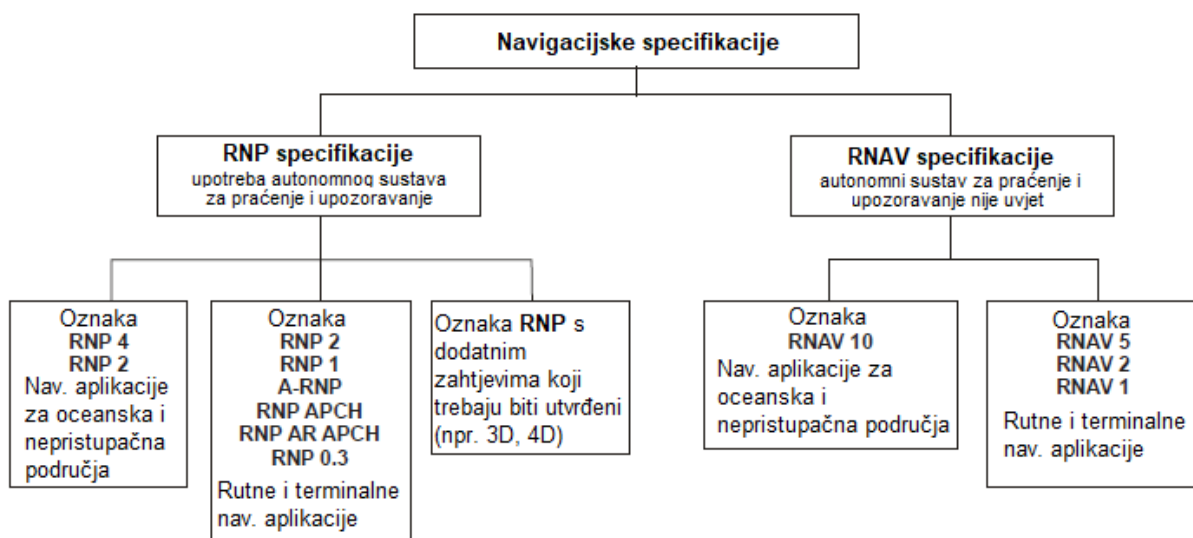
Navigacijska infrastruktura čini svu raspoloživu zemaljsku i satelitsku potporu koju zrakoplovi koriste tijekom leta (npr. VOR, DME, GNSS). Zahtjevi performansi sustava prostorne navigacije u smislu točnosti, cjelovitosti, raspoloživosti, kontinuiteta i funkcionalnosti definirani su navigacijskim specifikacijama, dok navigacijske aplikacije primjenjuju navedene specifikacije na pripadajuću infrastrukturu i određuju operativne procedure kao što su postupci instrumentalnog prilaženja [22].

Navigacijske specifikacije dijele su na RNP specifikaciju i RNAV specifikaciju. RNP (engl. *Required Navigation Performance*) specifikacija propisuje upotrebu autonomnog sustava na zrakoplovu za praćenje navigacijskih sposobnosti i upozoravanje posade u slučaju odstupanja od namjeravane putanje leta, što RNAV specifikacija nema. Tolerancije odstupanja od horizontalne putanje leta navedene su oznakama pojedinih specifikacija, čime je propisano da se tolerancija mora zadržati tijekom 95% vremena trajanja leta. Primjerice, oznaka RNP X označava da će zrakoplov održavati točnost navigacije za vrijednost X u nautičkim miljama (NM) lijevo i desno od definirane putanje leta u trajanju 95% vremena leta što je prikazano slikom 10.



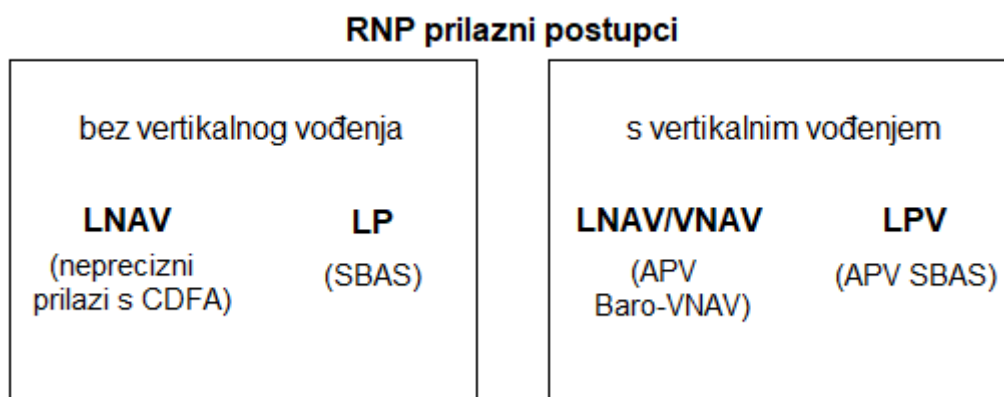
Slika 10. Tolerancije odstupanja od horizontalne putanje leta primjenom PBN koncepta, [23]

Podjela ICAO PBN navigacijskih specifikacija prikazana je slikom 11. Važno je napomenuti da su funkcionalni zahtjevi i zahtjevi performansi navigacijskih uređaja specifični za svaku specifikaciju. Tako zrakoplov koji ima odobrenje RNP 0,3 nema nužno automatski odobrenje za obavljanje operacija u uvjetima RNP 4 [23].



Slika 11. Oznake ICAO PBN navigacijskih specifikacija, [23]

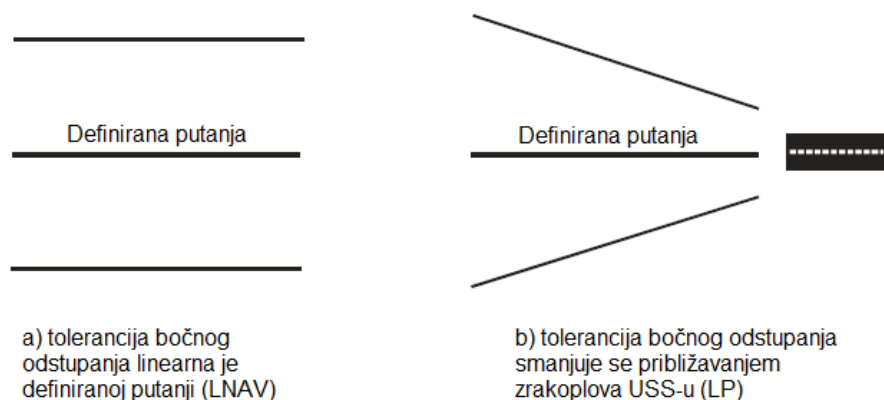
Kod svih RNP postupaka prilaženja koristi se navigacijska specifikacija RNP APCH. Specifikacija RNP AR APCH koristi se kod postupaka sa zakrivljenim putanjama u segmentu završnog prilaženja, a za čije je izvođenje potrebna dodatna certifikacija zrakoplova i obuka posade. Preduvjet za izvođenje svih RNP postupaka je upotreba GNSS-a. Postupci su definirani tehnikom završnog prilaženja s neprekinutim snižavanjem (engl. *Continuous Descent Final Approach – CDFA*) čime se smanjuje potrošnja goriva i postiže stabilizirano prilaženje. Postupci su podijeljeni na one bez vertikalnog vođenja, koji su definirani kao neprecizni postupci prilaženja; i na one s vertikalnim vođenjem, definiranim kao APV postupcima. Ovisno o navigacijskoj sposobnosti zrakoplova postupci su dalje podijeljeni prema točnosti određivanja položaja o čemu ovise i minimalne visine u prilaženju. Najveća preciznost trenutno dostupnih i operativnih RNP postupaka prilaženja dobiva se korištenjem satelitskog sustava dopune (engl. *Satellite Based Augmentation System – SBAS*) [23]. Podjela postupaka vidljiva je na slici 12.



Slika 12. Podjela RNP postupaka prilaženja, [22]

U ovom radu naglasak će biti stavljen na vertikalni profil RNP postupaka prilaženja zbog daljnjeg određivanja utjecaja temperature zraka na proračun visina u prilaženju. Cilj RNP postupaka je eliminacija potrebe za zemaljskim radio-navigacijskim sredstvima koja su skupa za održavanje; omogućavanje kreiranja instrumentalnih postupaka prilaženja za uzletno-sletne staze na kojima to prije nije bilo moguće zbog reljefa ili novčanih sredstava; optimizacija dolazne putanje i putanje prilaženja zrakoplova primjenom CDFA metode kojom se, uz precizno vertikalno navođenje, smanjuje mogućnosti kontroliranog leta u teren (engl. *Controlled Flight into Terrain – CFIT*); te smanjenje buke i emisija ispušnih plinova maksimalnim iskorištenjem zračnog prostora [22].

LNAV (engl. *Lateral Navigation*) je RNP postupak prilaženja uz kontrolu bočnog odstupanja. Točnost pozicioniranja u segmentima početnog prilaženja, međuprilaženja i neuspjelog prilaženja je 1 NM sa svake strane definirane putanje. U segmentu završnog prilaženja zahtjev točnosti iznosi 0,3 NM. Točnost mora biti zadovoljena tijekom najmanje 95% vremena trajanja leta. LP (engl. *Localizer Performance*) implementiran je na određenim aerodromima zbog nemogućnosti osiguravanja adekvatne kontrole zrakoplova u vertikalnoj ravnini. Zahtijeva korištenje GNSS-a uz dopunu SBAS-om zbog čega je točnost pozicioniranja u segmentu završnog prilaženja proporcionalno veća što je zrakoplov bliže USS-u. Razlike u tolerancijama bočnog odstupanja korištenjem GNSS-a i korištenjem GNSS-a uz dopunu SBAS-om u završnom segmentu prilaženja prikazane su slikom 13. Valja napomenuti kako je u slučaju korištenja LNAV i LP postupka prilaženja pilot odgovoran za vođenje zrakoplova u vertikalnoj ravnini, slično kao i kod konvencionalnih postupaka nepreciznog prilaženja. Stoga se i ova dva postupka smatraju nepreciznim postupcima prilaženja [23].

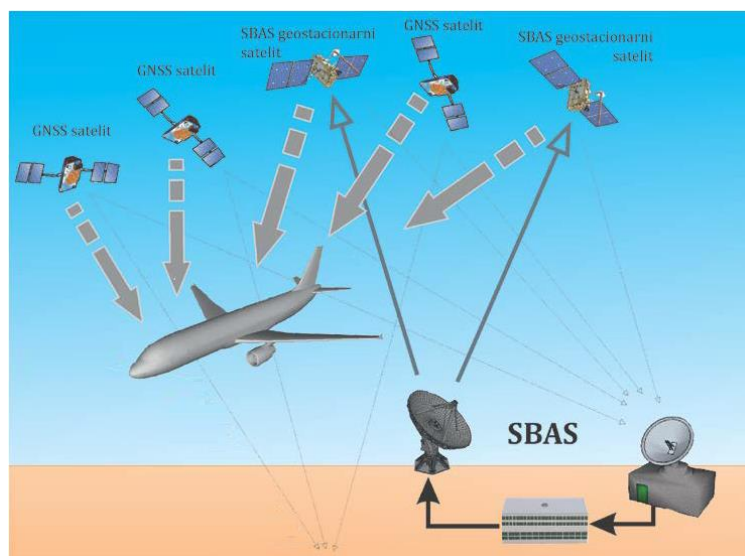


Slika 13. Tolerancije bočnog odstupanja korištenjem LNAV i LP postupaka prilaženja, [23]

Vođenje zrakoplova u vertikalnoj ravnini postupkom LNAV/VNAV (engl. *Lateral Navigation/Vertical Navigation*) pruža se korištenjem podataka o visini dobivenim visinomjerom ugrađenim u zrakoplovu. Zrakoplov potom slijedi propisan vertikalni profil RNP postupka prilaženja uz kontrolu pilota. Ovakav postupak naziva se i APV Baro-VNAV budući da se podaci o vertikalnom vođenju dobivaju putem barometarskog visinomjera. APV postupci, za razliku od nepreciznih postupaka prilaženja, definiraju apsolutnu, odn. relativnu visinu odluke (engl. *Decision Altitude (Height) – DA(H)*) budući da je vođenje vertikalnog profila prilaženja elektronički kontrolirano [22, 23].

U slučaju kad je GNSS dopunjen SBAS-om, vođenje vertikalnom putanjom određuje se visinom dobivenom iz satelitskog sustava. Takav način prilaženja naziva se LPV (engl. *Localizer Performance with Vertical Guidance*). U kontroli bočnog odstupanja primjenjuje se isti princip kao i kod LP navođenja. Ova vrsta prilaženja pruža visoku preciznost uz strogo osiguranje integriteta sustava. Samim time, u slučaju horizontalnog odstupanja u završnom segmentu prilaženja od 40 m i više, a odstupanju u vertikalnoj ravnini od 50 m i više (35 m za LPV prilaženje s visinom odluke do 200 ft) sustav u roku 6 sekundi mora upozoriti posadu o greški [23].

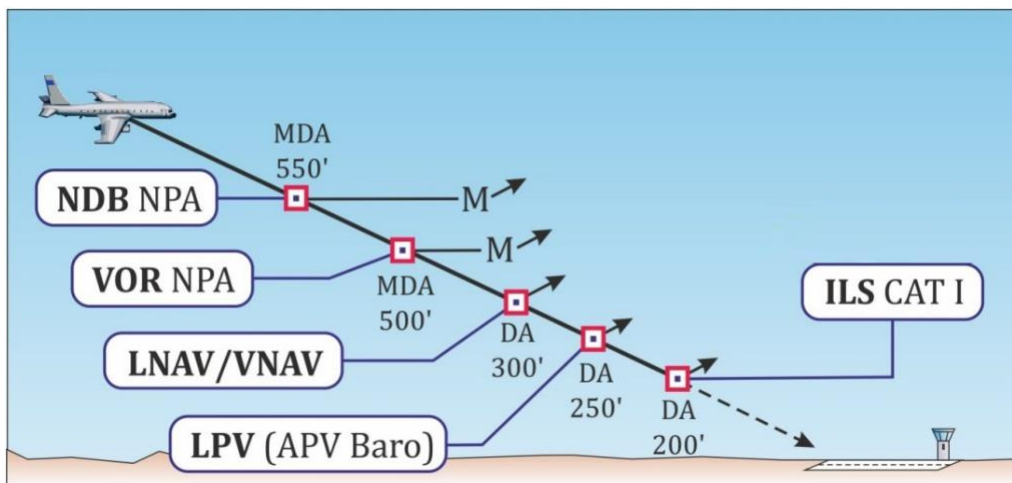
Satelitski sustav dopune (SBAS), koji se koristi prilikom izvođenja LP i LPV postupaka RNP prilaženja, u Europi se pruža sustavom EGNOS (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service*). Sastoji se od tri segmenta: svemirskog, zemaljskog i korisničkog. Zemaljski segment čini mreža 36 pratećih postaja raspoređenih Europom i Sjevernom Afrikom, četiri kontrolna središta, šest komunikacijskih postaja Zemlja-svemir te komunikacijska mreža koja povezuje gore navedene postaje. Prateće postaje, kojima je precizno određena pozicija, primaju GPS signal i izračunavaju razliku između stvarne pozicije i GPS-om određene pozicije. Potom se ti podaci šalju u kontrolna središta koja računaju greške putanja satelita i satelitskih satova te ionosfersku korekciju. Te korekcije šalju se komunikacijskim postajama koje onda odašilju proračunate informacije trima geostacionarnim satelitima, odn. svemirskom segmentu sustava. Opremljeni zrakoplovi, kao korisnički segment, zaprimaju podatke o korekciji pozicije od geostacionarnih satelita, a sami sateliti služe i kao dodatani izvor za proračun položaja [22]. Grafički prikaz načina rada SBAS-a prikazan je na slici 14.



Slika 14. Prikaz načina rada SBAS-a, [22]

Za razliku od LPV postupka prilaženja, LNAV/VNAV prilaženje podložno je određenim greškama zbog faktora koji utječu na prikazivanje visine na visinomjeru. Ti su faktori, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, tlak i temperatura zraka. Provedba APV Baro-VNAV postupka prilaženja nije dopuštena kada nije dostupna informacija o tlaku zraka na aerodromu prilaženja. Isto tako, provedba nije dopuštena kada je temperatura zraka niža od vrijednosti određene za svaki postupak prilaženja posebno. Ove greške primjenjive su i na LNAV i LPV postupke prilaženja budući da vertikalnu putanju kod ovih postupaka izračunavaju piloti koristeći barometarski visinomjer [19, 23, 24].

Odnos visina odluke za APV i precizne prilaze te minimalnih visina snižavanja (engl. *Minimum Descend Altitude – MDA*) za neprecizne prilaze prikazan je na slici 15, a služi kao pokazatelj stupnja preciznosti RNP postupaka prilaženja.



Slika 15. Odnos minimalnih visina za različite postupke instrumentalnog prilaženja, [22]

6. Proračun putanje RNP postupka prilaženja

U ovom poglavlju analizira se vertikalni profil završnog segmenta RNP prilaženja prilikom korištenja Baro-VNAV postupka ili postupaka nepreciznog prilaženja (LNAV i LP) u uvjetima nestandardne temperature zraka. Prije izračuna odstupanja visine za specifičan postupak, pomoću jednadžbe (28) izračunate su i tablično prikazane primjenjive korekcije visina leta u uvjetima različitih temperatura zraka pri tri različite nadmorske visine referentne točke, odn. aerodroma.

6.1. Analiza odstupanja temperature zraka od ISA uvjeta

Korištenjem jednadžbe (28) u nastavku će biti izračunate korekcije visine za temperature zraka koje odstupaju od standardnih vrijednosti u ISA uvjetima. ICAO je propisao korekciju visine samo u slučajevima kada je temperatura niža od standardne jer tada je stvarna visina zrakoplova manja od indicirane visine na visinomjeru (v. 4. Visina leta zrakoplova) što može uzrokovati narušavanje minimalnog nadvišavanja terena i prepreka [19]. Međutim, u ovom radu analizirat će se i uvjeti povećane temperature zraka u odnosu na ISA parametre zbog uspoređivanja razlika u iznosima korekcija za oba slučaja (manje i veće temperature od standardne vrijednosti).

Za nadmorske visine promatranih referentnih točaka h_{AD} uzete su 0, 1000 i 2000 ft. Raspon relativnih visina iznad referentnih točaka prikazan je do 5000 ft jer se jednadžbom (28) dobivaju rezultati unutar 5% točnosti od točne korekcije do te relativne visine [19]. Temperatura na aerodromu označena je kao t_{AD} [°C]. Tablice vrijednosti korekcije prikazane su dolje. Pozitivan iznos korekcije znači da se korekcija nadodaje na indiciranu visinu, dok se negativan iznos oduzima od indicirane visine.

Tablica 6. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=0$ ft)

t_{AD} [°C]	Relativna visina iznad $h_{AD}=0$ ft [ft] i iznosi korekcija [ft]								
	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000
30	-10	-15	-20	-25	-50	-100	-150	-201	-252
20	-3	-5	-7	-9	-17	-34	-52	-69	-87
10	4	5	7	9	18	36	54	72	90
0	11	17	22	28	55	111	167	223	280
-10	19	29	38	48	95	192	288	386	484
-20	28	42	55	69	139	279	420	562	706
-30	37	56	74	93	186	373	562	753	945

Tablica 7. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=1000$ ft)

t_{AD} [°C]	Relativna visina iznad $h_{AD}=1000$ ft [ft] i iznosi korekcija [ft]								
	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000
30	-11	-17	-22	-28	-56	-112	-169	-226	-284
20	-5	-7	-10	-12	-24	-48	-72	-96	-121
10	2	3	4	5	11	21	32	43	54
0	10	14	19	24	48	96	144	193	242
-10	17	26	35	44	88	176	265	354	444
-20	26	39	52	65	131	262	395	528	663
-30	35	53	71	88	177	356	535	717	900

Tablica 8. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=2000$ ft)

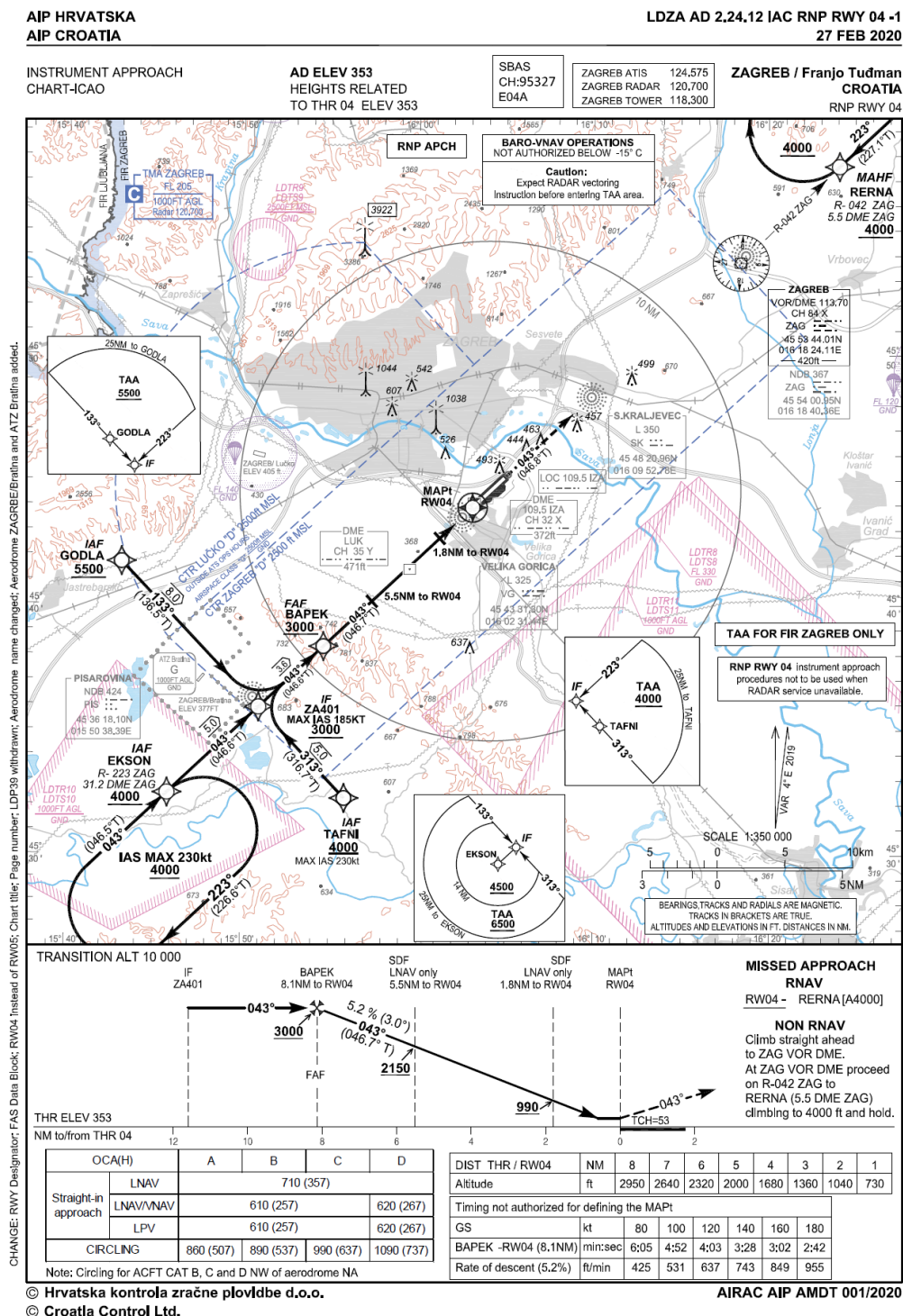
t_{AD} [°C]	Relativna visina iznad $h_{AD}=2000$ ft [ft] i iznosi korekcija [ft]								
	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000
30	-12	-19	-25	-31	-62	-125	-188	-252	-316
20	-6	-9	-12	-15	-30	-61	-92	-123	-154
10	1	1	1	2	4	7	11	15	19
0	8	12	16	20	40	81	122	163	204
-10	16	24	32	40	80	160	241	322	405
-20	24	37	49	61	122	245	370	495	621
-30	34	50	67	84	168	338	509	681	855

Iz priloženih tablica vidljivo je kako se iznos korekcije za određenu relativnu visinu smanjuje porastom nadmorske visine referentne točke, odn. aerodroma. Stoga je za izračun korekcije visine tijekom leta prihvatljivo uzeti vrijednosti dobivene za nadmorsku visinu 0 ft. Korekcije visina za praktičnu upotrebu uzimaju se kada vrijednost korekcije iznosi 20% minimalne visine nadvišavanja prepreka u segmentu početnog prilaznja (obično korekcija od 200 ft i više) [19].

U operativnoj upotrebi iznosi korekcija se, zbog jednostavnosti, zaokružuju na iduću veću deseticu, npr. -226 ft na -220 ft; 223 ft na 230 ft. Isto tako, iz tablica se može zaključiti da je korekcija visine za temperature veće od ISA vrijednosti manja od korekcija visine za niže temperature.

6.2. Postupak RNP prilaznja za stazu 04 u Zagrebu

U ovom dijelu opisat će se RNP postupak prilaznja za uzletno-sletnu stazu (engl. Runway – RWY) 04 u Zagrebu. Nakon opisa samog postupka, analizirat će se utjecaj odstupanja temperature zraka ISA+20 i ISA-20 na visine u segmentu završnog prilaznja. Karta postupka prilaznja prikazana je na slici 16.



Slika 16. Prilazna karta RNP RWY 04 na Zagrebu, [25]

Za korištenje ovog postupka koristi se EGNOS kao sustav satelitske dopune. Navedeno je operativno ograničenje temperature zraka za korištenje Baro-VNAV postupka (LNAV/VNAV) od -15°C. Iznad ove temperature piloti nisu obavezni primjenjivati korekciju visine u segmentu završnog prilaženja jer je kut vertikalne putanje prilaženja (engl. *Vertical Path Angle – VPA*), koji u ovom postupku iznosi 3,0°, zaštićen od probijanja minimalnih visina nadvišavanja dizajnom samog postupka. Za temperature niže od navedene piloti su dužni primjenjivati korekcije visina u segmentu završnog prilaženja, odn. koristi se LNAV prilaženje gdje nije osigurano elektroničko vođenje u vertikalnoj ravnini [19].

Neovisno o iznosu gore navedene minimalne temperature, piloti su dužni uvijek korigirati (pomoću tablica korekcije visine, v. tablicu 6):

- visine u segmentu početnog prilaženja i međuprilaženja
- visine odluke (DA/H)
- visine u segmentu neuspjelog prilaženja [19].

Segment završnog prilaženja započinje na točki završnog prilaženja (engl. *Final Approach Fix – FAF*) BAPEK na apsolutnoj visini 3000 ft. Korištenjem LNAV postupka prilaženja definirane su minimalne visine na još dvije dodatne točke u ovom segmentu. Te točke nazivaju se točkama sigurnog snižavanja (engl. *Stepdown Fix – SDF*), a cilj im je omogućiti sigurno nadvišavanje prepreka u postupku nepreciznog prilaženja pri čemu se zadržava CDFA metoda prilaženja [26]. Visine u ovom postupku određene su iznosom VPA, a računajući od referentne visine na pragu USS-a. Referentna visina na pragu USS-a (engl. *Threshold Crossing Height – TCH*) iznosi 53 ft za ovaj postupak. Izračun vrijednosti VPA vrši se na sljedeći način:

$$VPA = \arctg\left(\frac{h_{QNH} - h_{AD} - TCH}{D}\right) \quad (31)$$

pri čemu je:

- *VPA* – kut vertikalne putanje prilaženja [°]
- *h_{QNH}* – apsolutna (prava) visina na preletištu [ft]
- *h_{AD}* – nadmorska visina aerodroma [ft]
- *TCH* – referentna visina na pragu USS-a [ft]
- *D* – udaljenost preletišta od praga USS-a [ft], gdje 1 NM iznosi 6076,115 ft.

6.2.1. Odstupanje temperature zraka ISA+20

Kako je nadmorska visina aerodroma u Zagrebu 353 ft, jednadžbom (15) određeno je da je ISA temperatura zraka jednaka 14,3°C. Stoga je temperatura ISA+20 u Zagrebu jednaka 34,3°C. Uvrštavanjem ISA+20 temperature i poznatih visina na određenim udaljenostima od praga staze 04 u izraz (28) dobivene su vrijednosti u tablici 9. Oznaka *D* predstavlja udaljenost od praga staze, *IA* je indicirana visina leta koja je objavljena na prilaznoj karti (v. sliku 16), *TA* je prava visina leta zrakoplova, a *C* predstavlja iznos korekcije indicirane visine.

Tablica 9. Odnos indicirane i prave visine leta u uvjetima ISA+20 za RNP prilaženje RWY 04

D [NM]	IA [ft]	TA [ft]	C [ft]
8,1 (BAPEK)	3000	3174	-174
8	2950	3120	-170
7	2640	2790	-150
6	2320	2449	-129
5,5 (SDF)	2150	2267	-117
5	2000	2108	-108
4	1680	1767	-87
3	1360	1426	-66
2	1040	1085	-45
1,8 (SDF)	990	1031	-41
1	730	755	-25
0	406	409	-3

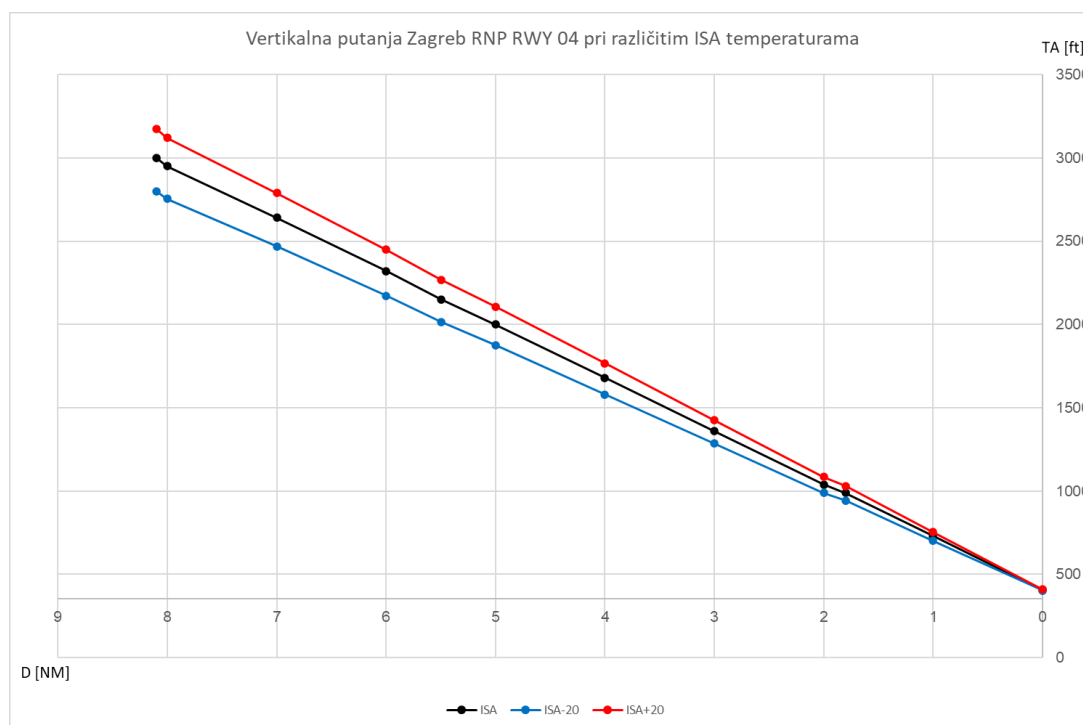
Vidljivo je kako je prava visina leta veća od indicirane visine zbog veće međusobne udaljenosti izobara pri temperaturi zraka većoj od ISA vrijednosti. Zbog relativno malog odstupanja visina (manjem od 200 ft, odn. 20% vrijednosti minimalne visine nadvišavanja) i osiguranog nadvišavanja prepreka, ICAO ne propisuje postupke korekcije visine u prilaženju za slučaj veće temperature zraka od ISA uvjeta. Isto tako, kako je prava visina leta veća, iznos VPA bit će veći, tj. vertikalna putanja prilaženja bit će strmija od propisane vrijednosti od 3,0°.

6.2.2. Odstupanje temperature zraka ISA-20

Slično kao i u prethodnom slučaju, u jednadžbu (28) uvrštena je ISA-20 temperatura koja u Zagrebu iznosi $-5,7^{\circ}\text{C}$. Izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 10.

Tablica 10. Odnos indicirane i prave visine leta u uvjetima ISA-20 za RNP prilaženje RWY 04

D [NM]	IA [ft]	TA [ft]	C [ft]
8,1 (BAPEK)	3000	2800	200
8	2950	2754	196
7	2640	2468	172
6	2320	2172	148
5,5 (SDF)	2150	2015	135
5	2000	1876	124
4	1680	1580	100
3	1360	1284	76
2	1040	989	51
1,8 (SDF)	990	942	48
1	730	702	28
0	406	402	4



Slika 17. Prikaz vertikalne putanje prilaženja u završnom segmentu RNP RWY 04 pri različitim ISA uvjetima

U ovom slučaju, prava visina leta manja je od indicirane što smanjuje udaljenost zrakoplova od prepreka. Kako je minimalna temperatura upotrebe Baro-VNAV postupka prilaženja -15°C , piloti u uvjetima ISA-20 nisu dužni vršiti korekciju visina navedenih u tablici 10. U slučaju LNAV prilaženja, piloti trebaju korigirati visine u segmentu završnog prilaženja. Postupak korekcije objašnjen je u nastavku ovog rada.

Na slici 17 prikazani su odnosi pravih visina leta u uvjetima ISA, ISA+20 i ISA-20. Vidljivo je kako je kut prilaženja u ISA+20 strmiji od propisanog VPA od $3,0^{\circ}$, dok je u slučaju ISA-20 kut prilaženja manji od propisanog. Ipak, kut prilaženja u ISA+20 i u ISA-20 slučaju unutar tolerancija je za ovu vrstu prilaženja, a tolerancije su od $3,5^{\circ}$ do $2,5^{\circ}$ [26]. Preko izraza (31) dobije se da je VPA za ISA+20 $3,22^{\circ}$, dok VPA za ISA-20 iznosi $2,78^{\circ}$.

7. Postupci korekcije putanje leta

Vertikalna putanja prilaženja RNP prilaženja korigira se u segmentima početnog prilaženja (započinje na IAF-u), međuprilaženja (započinje na preletištu međuprilaženja (engl. *Intermediate Fix – IF*)) i neuspjelog prilaženja (započinje na točki neuspjelog prilaženja (engl. *Missed Approach Point – MAPt*)). Visine odluke, odn. minimalne visine snižavanja isto tako se korigiraju. Za temperature iznad -15°C korekcije visina sigurno se mogu vršiti tako da se za svakih 10°C ispod standardne temperature na indiciranu visinu nadoda 4% indicirane visine. Ispod -15°C posada mora koristiti tablicu korekcija visine za niske temperature (v. tablicu 6) [16].

U segmentu završnog prilaženja korištenje Baro-VNAV (LNAV/VNAV) postupka dopušteno je bez korekcija visine do određene temperature zbog načina dizajna postupka. Ispod propisane temperature, koja za Zagreb RNP RWY 04 iznosi -15°C , korištenje LNAV/VNAV postupka prilaženja nije dopušteno. Piloti su dužni ručno kontrolirati vertikalni profil spuštanja u segmentu završnog prilaženja, primjenjujući korekcije visina na FAF-u, SDF-u i minimalnoj visini snižavanja za LNAV postupak.

Konkretno, u uvjetima vanjske temperature -20°C na Zagrebu, korekcije visina za specifične točke postupka RNP prilaženja za stazu 04 (v. sliku 16) prikazane su tablicom 11. Korekcije su vršene koristeći jednadžbu (28), zaokruživanjem na operativno prihvatljivu visinu. Isto se moglo postići upotrebljavajući tablicu 6, što bi i bio glavni način izračuna korekcije visine tijekom pripreme leta.

Tablica 11. Korigirane visine za RNP RWY 04 u uvjetima temperature -20°C

Položaj korekcije visine	Propisana visina [ft]	Korigirana visina [ft]
GODLA (IAF)	5500	6250
EKSON (IAF)	4000	4500
TAFNI (IAF)	4000	4500
ZA401 (IF)	3000	3400
BAPEK (FAF)	3000	3400
5,5NM SDF	2150	2400
1,8NM SDF	990	1100
LNAV MDA	710	760
RERNA	4000	4500

Vrlo je važno uočiti kako se VPA u segmentu završnog prilaženja ne mijenja, odn. piloti ne izračunavaju brzinu snižavanja pri većem VPA. Razlog tome je što bi podešavanje brzine snižavanja pri većem VPA od propisanog naposljetku zrakoplov dovelo na visinu nižu od propisane postupkom. Uzrok te greške je smanjenje korekcije s padom visine, tj. što je manja visina, to je manja i potrebna korekcija visine.

Operativno gledajući, piloti su dužni ručno korigirati vertikalni profil zrakoplova u segmentu završnog prilaženja tako da zadovolje proračunate korigirane visine navedene primjerom u tablici 11. Upravo je taj nadzor posade nad vertikalnom putanjom svojstvo nepreciznog prilaženja, zbog čega se za LNAV postupak propisuje MDA.

8. Zaključak

Fizikalne osobine zraka neizostavan su čimbenik u planiranju letenja, proračunima vezanim uz performanse zrakoplova, sigurno nadvišavanje prepreka i izvođenju postupaka u letenju. U proučavanju atmosferskih uvjeta ključan parametar je temperatura zraka koja utječe na tlak i gustoću zraka. Njihova međupovezanost prikazana je jednadžbom stanja idealnog plina. Radi mogućnosti definiranja i međusobne usporedbe performansi zrakoplova u različitim uvjetima leta definirana je međunarodna standardna atmosfera u kojoj je jednoznačno određen odnos tlaka, temperature i visine.

Prikaz visine leta zrakoplova ovisi o tlaku i temperaturi zraka. Zrakoplovni visinomjeri standardno rade na principu mjerenja promjene vrijednosti statičkog tlaka zraka. Kako su visinomjeri na zrakoplovu baždareni prema ISA uvjetima potrebno je, zbog točnosti prikazivanja visine, omogućiti korekciju visine u stvarnoj atmosferi. Ispravak za odstupanje tlaka zraka omogućen je OBV-om koji pilotu daje mogućnost podešavanja iznosa referentnog tlaka zraka. Odstupanje visine zbog razlike u temperaturi zraka od ISA uvjeta nije kompenzirano. Pri temperaturi zraka nižoj od standardne izobarne plohe bit će međusobno bliže što će uzrokovati grešku u prikazu indicirane visine na visinomjeru. Indicirana visina bit će veća od prave visine leta zbog bržeg pada tlaka zraka s visinom. U ovom radu izvedena je jednadžba kojom se dobiva iznos potrebne korekcije visine zbog odstupanja temperature zraka. Primjenom navedene jednadžbe u radu su izrađene tablice korekcije visine pri različitim temperaturama zraka na aerodromu. Tablice služe posadi zrakoplova za brzo i točno određivanje korigirane visine leta u prilaženju.

Implementacijom PBN koncepta, uz već postojeća precizna i neprecizna prilaženja, uvedena su APV prilaženja koja su bazirana na GNSS-u. Naglasak u radu stavljen je na LNAV/VNAV postupak prilaženja u kojem se vertikalni profil prilaženja računa iz podataka dobivenih barometarskim visinomjerom na zrakoplovu. Zbog toga je takav postupak prilaženja ograničen minimalnom temperaturom zraka na aerodromu slijetanja. Analizirani su iznosi korekcija visine i iznosi temperatura zraka u kojima bi se omogućila sigurna upotreba ovakvog načina prilaženja. Proračunata je vertikalna putanja prilaženja u uvjetima ISA+20 i ISA-20 za RNP prilaženje u Zagrebu. Dobiveni rezultati pokazuju da su visine u oba slučaja unutar propisanog VPA (tolerancije od

3,5° do 2,5°) zbog čega nije nužno vršiti korekciju visina u segmentu završnog prilaženja. Valja naglasiti kako su piloti i dalje dužni primijeniti korekciju visina u segmentima početnog prilaženja, međuprilaženja te neuspjelog prilaženja. Isto tako, piloti moraju korigirati propisane visine odluke. U slučaju da je temperatura zraka manja od minimalne propisane postupkom prilaženja, koja je u slučaju Zagreba -15°C, piloti su dužni ručno izvršiti korekciju visina tijekom završnog prilaženja. Korekcija se vrši upotrebom tablica i postupaka koje se nalaze u svakom letačkom priručniku.

Literatura

- [1] Leksikografski zavod Miroslav Krleža. *Atmosfera. Hrvatska enciklopedija*, Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=4464> [Pristupljeno: 2. ožujka 2020.]
- [2] CAE Oxford Aviation Academy. *Meteorology*. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014.
- [3] Tutiš V. *Meteorologija - Priručnik za studente*. Zagreb, 2012.
- [4] ICAO. *Manual of the ICAO Standard Atmosphere - extended to 80 kilometers (262 500 feet)*. International Civil Aviation Organization, 1993.
- [5] FAA. *Aviation Weather*. Washington, D.C., 1975.
- [6] Anderson JD. *Introduction to Flight*. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [7] Airbus S.A.S. *Getting to Grips with Aircraft Performance*. Blagnac, 2002.
- [8] SKYbrary (EUROCONTROL). *Altimeter Pressure Settings*, Preuzeto s: https://www.skybrary.aero/index.php/Altimeter_Pressure_Settings [Pristupljeno: 9. travnja 2020.]
- [9] CAE Oxford Aviation Academy. *Mass and Balance - Performance*. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014.
- [10] LibreTexts. *Combining the Gas Laws: The Ideal Gas Equation and the General Gas Equation*. *Chemistry LibreTexts*, Preuzeto s: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_General_Chemistry_\(Petrucci_et_al.\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_General_Chemistry_(Petrucci_et_al.)) [Pristupljeno: 10. travnja 2020.]
- [11] SKYbrary (EUROCONTROL). *Density Altitude*, Preuzeto s: https://www.skybrary.aero/index.php/Density_Altitude [Pristupljeno: 15. travnja 2020.]
- [12] Bucak T, Zorić I. *Zrakoplovni instrumenti i prikaznici*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, 2002.
- [13] Novak D. *Zrakoplovna računaska navigacija*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, 2012.

- [14] Pallett EHJ. *Aircraft Instruments and Integrated Systems*. Pearson Education Limited, 1992.
- [15] FAA. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. Federal Aviation Administration, 2016.
- [16] EUROCONTROL. Guidelines for Cold Temperature Corrections by ATS.
- [17] Guinn TA, Mosher FR. *Numerical Model Derived Altimeter Correction Maps for Non-Standard Atmospheric Temperature and Pressure*. 2015.
- [18] Airbus S.A.S. *Getting to Grips with Approach-and-Landing Accidents Reduction*. 2000.
- [19] ICAO. *Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations. Volume I - Flight Procedures*. International Civil Aviation Organization, 2006.
- [20] Davis RE, Frey R, Sarquis M, et al. *Modern Chemistry*. Austin: Holt, Rinehart and Winston, 2009.
- [21] Vukčević L. *Vazduhoplovna kompasna navigacija*. Beograd: Privredno finansijski vodič, 1974.
- [22] Novak D. *Zrakoplovna prostorna navigacija*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, 2015.
- [23] ICAO. *Performance-based Navigation (PBN) Manual*. International Civil Aviation Organization, 2013.
- [24] ICAO. Advisory Circular PBN Subject: Aircraft and Operators Approval for Approach Operations With Vertical Guidance/Barometric Vertical Navigation (APV/baro-VNAV).
- [25] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. Zbornik zrakoplovnih informacija Republike Hrvatske. *HKZP*, Preuzeto s: https://www.crocontrol.hr/UserDocsImages/AIS_produkti/eAIP/start.html [Pristupljeno: 20. ožujka 2020.]
- [26] ICAO. *Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations. Volume II - Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. International Civil Aviation Organization, 2014.

Popis kratica

APCH	(Approach) prilaženje
APV	(Approach Procedure with Vertical Guidance) postupak prilaženja s vertikalnim vođenjem
AR	(Authorization Required) potrebno posebno dopuštenje
ATM	(Air Traffic Management) mreža upravljanja zračnim prometom
CDFA	(Continuous Descent Final Approach) tehnika završnog prilaženja s neprekinutim snižavanjem
CFIT	(Controlled Flight into Terrain) kontrolirani let u teren
COM	(Communication) komunikacijska mreža
DA (1)	(Density Altitude) visina po gustoći
DA (2)	(Decision Altitude) apsolutna visina odluke
DH	(Decision Height) relativna visina odluke
DME	(Distance Measuring Equipment) oprema za mjerenje udaljenosti
EGNOS	(European Geostationary Navigation Overlay Service) satelitski sustav dopune u Europi
FAF	(Final Approach Fix) točka završnog prilaženja
FL	(Flight Level) razina leta
GNSS	(Global Navigation Satellite System) globalni navigacijski satelitski sustav
GP	(Glide Path) odašiljač signala putanje poniranja
GPS	(Global Positioning System) satelitski navigacijski sustav SAD-a
IA	(Indicated Altitude) indicirana apsolutna visina leta
IAF	(Initial Approach Fix) preletišta početnog prilaženja
IAP	(Instrument Approach Procedure) postupak instrumentalnog prilaženja

ICAO	(International Civil Aviation Organization) Organizacija međunarodnog civilnog zrakoplovstva
IF	(Intermediate Fix) preletište međuprilaženja
ILS	(Instrument Landing System) instrumentalni sustav za slijetanje
ISA	(International Standard Atmosphere) međunarodna standardna atmosfera
LNAV	(Lateral Navigation) vođenje zrakoplova kontrolom bočnog odstupanja
LOC	(Localizer) odašiljač usmjerivača pravca prilaženja
LP	(Localizer Performance) prilaženje performansama istovjetnima sustavu LOC
LPV	(Localizer Performance with Vertical Guidance) prilaženje performansama istovjetnima sustavu LOC s vođenjem u vertikalnoj ravnini
MAPt	(Missed Approach Point) točka neuspjelog prilaženja
MDA	(Minimum Descent Altitude) minimalna apsolutna visina snižavanja
MSL	(Mean Sea Level) srednja razina mora
NAV	(Navigation) navigacijska mreža
NDB	(Non-directional Beacon) neusmjereni radiofar
NPA	(Non-precision Approach) postupak nepreciznog prilaženja
OBV	osjetljivi barometarski visinomjer
PA (1)	(Pressure Altitude) visina po tlaku
PA (2)	(Precision Approach) postupak preciznog prilaženja
PBN	(Performance Based Navigation) navigacija bazirana na performansama
QFE	postavka tlaka zraka mjerena od aerodromske referentne točke
QNE	apsolutna visina pri standardnom tlaku zraka
QNH	postavka tlaka zraka mjerena od srednje razine mora
RNAV	(Area Navigation) prostorna navigacija

RNP	(Required Navigation Performance) specifikacija PBN koncepta
RWY	(Runway) uzletno-sletna staza
SBAS	(Satellite Based Augmentation System) satelitski sustav dopune
SDF (1)	(Simplified Directional Facility) pojednostavljena usmjerivačka stanica
SDF (2)	(Stepdown Fix) točka sigurnog snižavanja
SPS	(Standard Pressure Setting) standardni tlak zraka
SRA	(Surveillance Radar Approach) postupak prilaženja korištenjem nadzornog radara
SUR	(Surveillance) nadzorna mreža
TA	(True Altitude) prava apsolutna visina leta
TCH	(Threshold Crossing Height) referentna visina na pragu USS
USS	uzletno-sletna staza
VHF	(Very High Frequency) vrlo visoka frekvencija
VNAV	(Vertical Navigation) vođenje zrakoplova u vertikalnoj ravnini
VOR	(VHF Omnidirectional Radio Range) visokofrekvencijski svesmjerni radiofar
VPA	(Vertical Path Angle) kut vertikalne putanje prilaženja

Popis slika

Slika 1. Vertikalna promjena temperature zraka, [3]	3
Slika 2. Odnos različitih postavki tlaka zraka na visinomjeru, [7]	7
Slika 3. Ovisnost viška potiska o gustoći zraka	13
Slika 4. Dijelovi osjetljivog barometarskog visinomjera, [15]	21
Slika 5. Utjecaj temperature zraka na visinu leta, [18]	23
Slika 6. Odnos prave visine i indicirane visine leta ovisno o temperaturi zraka, [21]	27
Slika 7. Primjer tablice za brzu korekciju visine leta zbog odstupanja temperature zraka, [7].....	28
Slika 8. Prikaz segmenata postupka instrumentalnog prilaženja, [22]	29
Slika 9. PBN koncept u ovisnosti o konceptu zračnog prostora, [23]	32
Slika 10. Tolerancije odstupanja od horizontalne putanje leta primjenom PBN koncepta, [23]	33
Slika 11. Oznake ICAO PBN navigacijskih specifikacija, [23]	33
Slika 12. Podjela RNP postupaka prilaženja, [22]	34
Slika 13. Tolerancije bočnog odstupanja korištenjem LNAV i LP postupaka prilaženja, [23]	35
Slika 14. Prikaz načina rada SBAS-a, [22]	36
Slika 15. Odnos minimalnih visina za različite postupke instrumentalnog prilaženja, [22]	37
Slika 16. Prilazna karta RNP RWY 04 na Zagrebu, [25]	40
Slika 17. Prikaz vertikalne putanje prilaženja u završnom segmentu RNP RWY 04 pri različitim ISA uvjetima.....	43

Popis tablica

Tablica 1. Vrijednosti ledišta i vrelišta vode u različitim temperaturnim ljestvicama ...	5
Tablica 2. ISA vrijednosti tlaka zraka na različitim visinama	11
Tablica 3. Odnos koeficijenta pretvorbe i promatrane visine.....	12
Tablica 4. ISA temperatura, tlak i gustoća na promatranim visinama	14
Tablica 5. Koeficijenti ispravke na promatranim visinama.....	16
Tablica 6. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=0$ ft).....	38
Tablica 7. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=1000$ ft).	39
Tablica 8. Proračunate korekcije visine pri različitim temperaturama ($h_{AD}=2000$ ft).	39
Tablica 9. Odnos indicirane i prave visine leta u uvjetima ISA+20 za RNP prilaženje RWY 04	42
Tablica 10. Odnos indicirane i prave visine leta u uvjetima ISA-20 za RNP prilaženje RWY 04	43
Tablica 11. Korigirane visine za RNP RWY 04 u uvjetima temperature -20°C	45

Prilog 1. Promjena ISA parametara do visine 20 km

h [m]	T [K]	p [Pa]	ρ [kg/m ³]
0	288,15	101325	1,225
500	284,90	95460	1,167
1000	281,65	89873	1,112
1500	278,40	84554	1,058
2000	275,15	79493	1,006
2500	271,90	74680	0,957
3000	268,65	70105	0,909
3500	265,40	65760	0,863
4000	262,15	61636	0,819
4500	258,90	57724	0,777
5000	255,65	54015	0,736
5500	252,40	50502	0,697
6000	249,15	47176	0,660
6500	245,90	44030	0,624
7000	242,65	41056	0,589
7500	239,40	38246	0,557
8000	236,15	35595	0,525
8500	232,90	33094	0,495
9000	229,65	30737	0,466
9500	226,40	28519	0,439
10000	223,15	26431	0,413
10500	219,90	24469	0,388
11000	216,65	22627	0,364
11500	216,65	20916	0,336
12000	216,65	19330	0,311
12500	216,65	17864	0,287
13000	216,65	16510	0,265
13500	216,65	15258	0,245
14000	216,65	14101	0,227
14500	216,65	13032	0,210
15000	216,65	12044	0,194
15500	216,65	11131	0,179
16000	216,65	10287	0,165
16500	216,65	9507	0,153
17000	216,65	8786	0,141
17500	216,65	8120	0,131
18000	216,65	7504	0,121
18500	216,65	6935	0,112
19000	216,65	6409	0,103
19500	216,65	5923	0,095
20000	216,65	5474	0,088



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

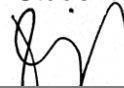
pod naslovom **Proračun putanje instrumentalnog prilaženja zrakoplova u**

nestandardnim atmosferskim uvjetima

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

U Zagrebu, _____ 14.7.2020.

Student:



(potpis)