

# Proračun elemenata leta tijekom dolazne procedure primjenom prostorne navigacije

---

**Rubil, Mario**

**Master's thesis / Diplomski 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:119:874358>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mario Rubil

PRORAČUN ELEMENATA LETA TIJEKOM DOLAZNE PROCEDURE  
PRIMJENOM PROSTORNE NAVIGACIJE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020..

Zagreb, 8. svibnja 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Avionika i IFR letenje**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 6020

Pristupnik: **Mario Rubil (0135235435)**  
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Proračun elemenata leta tijekom dolazne procedure primjenom prostorne navigacije**

Opis zadatka:

Uvodno opisati koncept navigacije bazirane na performansama. Navesti specifičnosti pojedinih specifikacija s naglaskom na RNP i RNAV aplikacije. Objasniti primjenu GNSS-a. Na primjeru aerodroma Dubrovnik (LDDU) kreirati putne točke za dolaznu proceduru. Razviti moguće scenarije dolaska i na temelju njih teorijskim proračunima i simulacijom odrediti potrošnju goriva i vrijeme trajanja leta. Međusobno usporediti proračunate parametre. Zaključna razmatranja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

prof. dr. sc. Doris Novak

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**PRORAČUN ELEMENATA LETA TIJEKOM DOLAZNE PROCEDURE  
PRIMJENOM PROSTORNE NAVIGACIJE**

**CALCULATION OF FLIGHT ELEMENTS DURING ARRIVING PROCEDURE  
USING AREA NAVIGATION**

Mentor: prof. dr. sc. Doris Novak

Student: Mario Rubil

JMBAG: 0135235435

Zagreb, rujan, 2020.

# PRORAČUN ELEMENATA LETA TIJEKOM DOLAZNE PROCEDURE PRIMJENOM PROSTORNE NAVIGACIJE

## SAŽETAK

Svaki let zrakoplova mora završiti svojom posljednjom fazom, slijetanjem na određeni aerodrom. Kako bi se zrakoplov s rutne faze leta doveo do uzletno-sletne staze, dizajnirane su dolazne procedure. Dolazne procedure imaju veliku ulogu u određivanju složenosti postupka slijetanja. Budući da se procedure mogu mijenjati i prilagođavati, cilj je kreirati ih tako da prilaz bude što brži, jednostavniji, učinkovitiji i ekonomski isplativiji. Namjera ovog rada konkretnim je proračunima i simulacijama u realnom vremenu ispitati neke nove dolazne procedure. Korištenjem naprednijih navigacijskih uređaja u zrakoplovima i na zemlji omogućeno je korištenje preciznijih navigacijskih aplikacija za dolazne procedure koje omogućuju smanjenje zaštitnih površina i tako oslobađaju dijelove zračnog prostora čime se povećava njegov kapacitet i efikasnost. Kako je svaki dio zračnog prostora jedinstven, potrebno je utvrditi kakve prednosti nose određene aplikacije na procedure u određenom zračnom prostoru, a to je moguće saznati proračunima i simulacijama. Sve informacije dobivene izradom ovog rada moći će koristiti široj zainteresiranoj publici koja bi trebala dobiti uvid u to na koji način primjena prostorne navigacije, otprilike, utječe na karakteristike zračnog prostora i dolazne procedure.

**KLJUČNE RIJEČI:** navigacija; GNSS; prilazna procedura; slijetanje; prostorna navigacija

## SUMMARY

Each flight of the aircraft must end with its final phase, landing at the destination airport. In order to bring the aircraft from the route phase of the flight to the runway, arrival procedures were designed. Arrival procedures play a major role in determining the complexity of the landing process. Since procedures can be changed and adjusted, the goal is to create them in such way that the approach is as fast, simple, efficient, and cost-effective as possible. The intention of this paper is to examine some new arrival procedures with concrete calculations and real-time simulations. By using the advanced navigation devices on board aircraft and on the ground, it is possible to use more precise navigation applications for arrival procedures that allow the reduction of protected areas and thus exempt portions of airspace, increasing its capacity and efficiency. As each part of the airspace is unique, it is necessary to determine what benefits certain applications bring to the procedures in a certain airspace, and this can be found out by calculations and simulations. All information

obtained by making this paper will be able to benefit a wider interested audience which should gain insight into how the application of area navigation, approximately, affects airspace characteristics and arrival procedures.

**KEYWORDS:** navigation; GNSS; arrival procedure; landing; area navigation

# SADRŽAJ

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Uvod .....                                                                | 1  |
| 2. Zrakoplovna navigacija .....                                              | 3  |
| 2.1. Navigacija bazirana na performansama.....                               | 4  |
| 2.2. Prostorna navigacija .....                                              | 8  |
| 2.3. <i>Required navigation performance</i> navigacijska specifikacija ..... | 11 |
| 3. Putne točke .....                                                         | 14 |
| 4. Sustavi satelitske navigacije .....                                       | 19 |
| 5. Dolazne procedure .....                                                   | 29 |
| 6. Zračna luka Dubrovnik.....                                                | 30 |
| 6.1. Lokacija i strateška važnost .....                                      | 30 |
| 6.2. Tehničke karakteristike.....                                            | 31 |
| 7. Primjena novog koncepta u završnom kontroliranom području Dubrovnik ..... | 33 |
| 7.1. Analiza zračnog prostora .....                                          | 33 |
| 7.2. Promjena koncepta rada .....                                            | 35 |
| 7.3. Metodologija .....                                                      | 35 |
| 7.4. Rezultati .....                                                         | 37 |
| 8. Zaključak.....                                                            | 39 |
| Literatura.....                                                              | 40 |
| POPIS KRATICA .....                                                          | 42 |

## 1. Uvod

Zrakoplovstvo postoji već jedno cijelo stoljeće. Tijekom ovog perioda utvrđivana su mnoga pravila letenja, definirane su procedure i izgrađivana je infrastruktura te se u nekim oblicima ta pravila, procedure i infrastrukture koriste i danas. Budući da je napredak tehnologije u onom dijelu koji je vezan za zrakoplovstvo otišao vrlo daleko i s činjenicom da su premašene gotovo sve prognoze rasta zračnog prometa u prošlosti, javila se nužnost prilagodbe starih sustava modernijim i učinkovitijim sustavima, a sukladno time i prilagodba zračnih prostora i navigacijskih procedura.

Ovaj rad bavi se prilagodbom instrumentalnih navigacijskih procedura u završnom kontroliranom području zračne luke Dubrovnik. Simulacijama leta namjeravala se ispitati mogućnost zamjene konvencionalne navigacijske procedure modernijom i nekoliko puta preciznijom navigacijskom specifikacijom RNAV-1 koja bi u bliskoj budućnosti trebala zamijeniti trenutne konvencionalne instrumentalne procedure. Rezultati dobiveni ispitnim letovima u simuliranom okruženju dostupni su u ovom radu. Naslov diplomskog rada je: Proračun elemenata leta tijekom dolazne procedure primjenom prostorne navigacije. Rad je podijeljen u osam cjelina:

1. Uvod
2. Zrakoplovna navigacija
3. Putne točke
4. Satelitski navigacijski sustavi
5. Dolazne procedure
6. Zračna luka Dubrovnik
7. Primjena novog koncepta u završnom kontroliranom području Dubrovnik
8. Zaključak

U drugom poglavlju definirana je zrakoplovna navigacija i pojašnjena podjela prema novim konceptima vođenja navigacije i korištenja zračnog prostora.

U trećem poglavlju pojašnjen je pojam putnih točki, vrste i njihovo kreiranje. Putne točke imaju vrlo važnu ulogu kod vođenja instrumentalne navigacije budući da bez jasno definiranih točaka niti piloti niti navigacijsko računalo ne mogu voditi zrakoplov u prostoru.

Četvrto poglavlje bavi se GNSS sustavom. U ovom poglavlju navedeni su neki najpoznatiji GNSS sustavi, pojašnjen je način rada prvenstveno GPS sustava kao najraširenijeg navigacijskog satelitskog sustava. GNSS je važan jer predstavlja primarni navigacijski senzor u RNAV-1 navigacijskoj specifikaciji i bez njega uvođenje RNAV-1 nije moguće.



Procedure koje dovode zrakoplov na ruti za dolazak na aerodrom zovu se dolazne procedure. Uvod u dolazne procedure napisan je u petom poglavlju.

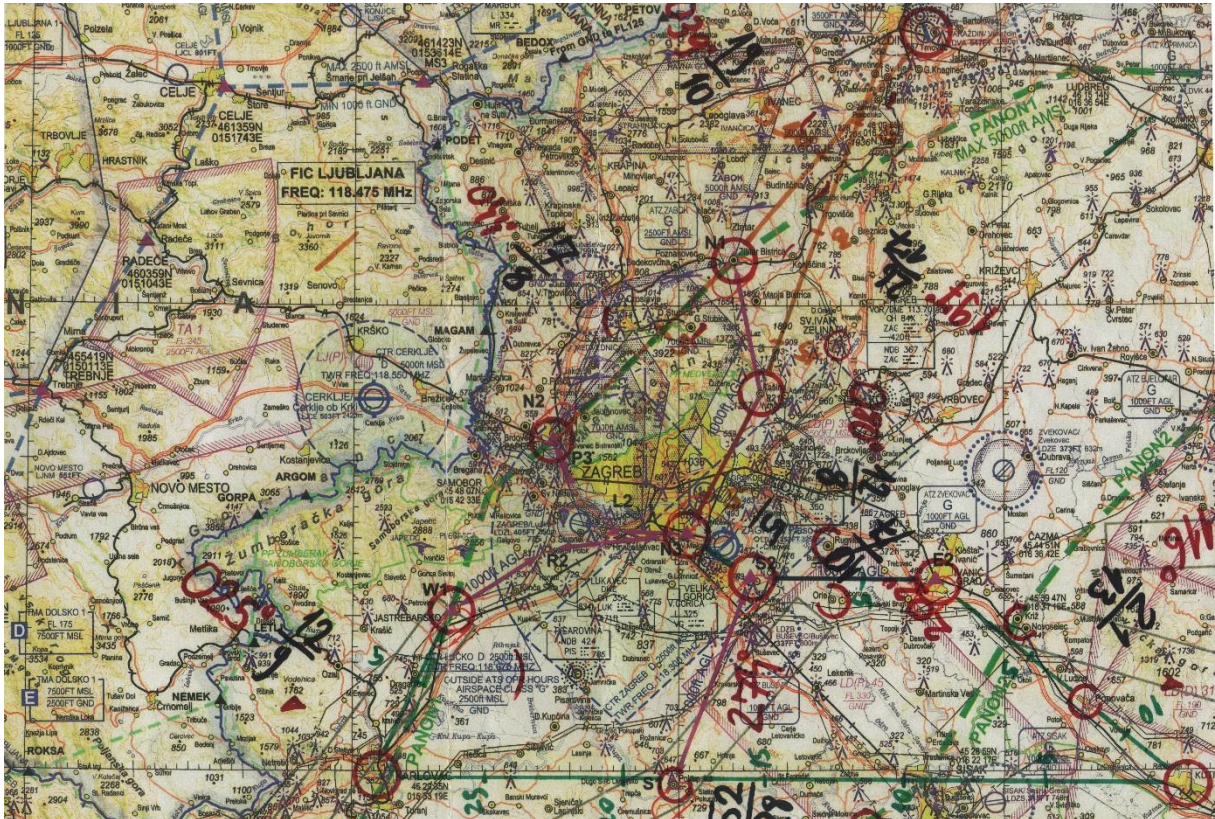
Kako je istraživanje ovog rada izvođeno na konkretnom slučaju zračne luke Dubrovnik, u šestom poglavlju predstavljene su neke osnovne karakteristike zračne luke kao što su smještaj, tehničke karakteristike i njen pripadajući zračni prostor.

Sedmo poglavlje predstavlja glavni, analitički, dio ovog diplomskog rada. U ovom poglavlju pojašnjeni su razlozi pisanja rada i provođenja simulacijskih letova. Pojašnjene su pripremne radnje koje su morale biti napravljene za uspješno izvođenje ispitnih letova i na kraju su prikazani dobiveni rezultati nakon izvršenih testnih letova u zrakoplovnom simulatoru.

## 2. Zrakoplovna navigacija

Navigacija je danas vrlo rasprostranjena i koristi se u raznim oblicima u svakodnevnom životu pa pojedinci toga gotovo da i nisu svjesni. Jedno od područja u kojem se upotrebljava navigacija je i zrakoplovstvo, posredno zrakoplovna navigacija, što je i tema ovog poglavlja. Glavni je cilj zrakoplovne navigacije osigurati dolazak zrakoplova optimalnom i zadanom rutom do određene točke na određenoj visini u predviđeno vrijeme. To se postiže korištenjem metoda za pripremu leta, određivanje pozicije i vođenja zrakoplova od jedne poznate pozicije na zemljinoj površini do druge u prostorno-vremenskoj dimenziji, [1].

Zrakoplovna se navigacija prema vrsti vođenja dijeli na vizualnu i instrumentalnu, ako se u obzir uzme način prikupljanja informacija. Pri korištenju vizualne navigacije pilot određuje svoju poziciju u prostoru promatranjem vizualnih orijentira na površini zemlje uspoređujući ih sa prikazom karte te tako može prepoznati točku ili prostor iznad kojeg se u danom trenutku nalazi, odnosno leti, [1]. Primjer navigacijske pripreme leta metodom vizualne navigacije prikazan je slikom 2.1. Važno je napomenuti da vizualna navigacija nije uvijek provediva budući da ovisi o trenutnim meteorološkim uvjetima. Meteorološki minimumi koji omogućuju korištenje vizualne navigacije definirani su Pravilima vizualnog letenja (engl. *Visual Flight Rules* ili VFR). Kada pilot nije u mogućnosti koristiti vizualnu navigaciju zbog definiranih pravila, za izvođenje leta morat će se koristiti instrumentalnom navigacijom. Instrumentalnom navigacijom pozicija zrakoplova određuje se pomoću navigacijskih uređaja na zemlji i u zrakoplovu, čije informacije se prikazuju na navigacijskim instrumentima i zaslonima, te na taj način pilot očitava trenutnu poziciju zrakoplova ili stvara mentalnu sliku položaja koristeći dobivene informacije od navigacijskih uređaja, ovisno o opremljenosti i složenosti zrakoplova. Korištenje instrumentalne navigacije definirano je Pravilima instrumentalnog letenja (engl. *Instrumental Flight Rules* ili IFR). Za razliku od vizualne navigacije, instrumentalna navigacija može se koristiti u svakom trenutku (ako je pilot ovlašten za instrumentalno letenje), [1].



Slika 2.1. Navigacijska priprema leta za letenje metodom vizualne navigacije

## 2.1. Navigacija bazirana na performansama

Osnovna oprema za prostornu navigaciju (engl. *Area Navigation* ili RNAV) obvezna je na zrakoplovima koji lete u zračnom prostoru zemalja članica ECAC-a (engl. *European Civil Aviation Conference*) na rutama iznad prve određene razine leta, dok su napredni sustavi za preciznu prostornu navigaciju obvezni za zrakoplove koji se koriste objavljenim RNAV dolaznim ili odlaznim instrumentalnim letnim postupcima unutar završnih kontroliranih oblasti (terminalnih zona).

Primjena metode prostorne navigacije u terminalnim zonama nije obavezna i zato se većina objavljenih procedura temelji na radionavigacijskim procedurama i sredstvima poput VOR-a (engl. *VHF Omnidirectional Radio Range*) i NDB-a. (engl. *Non-Directional Beacon*) Unatoč tome, procjenjuje se da je između 80 % i 90 % zrakoplova opremljeno i certificirano za korištenje P-RNAV (engl. *Precision RNAV*) procedura što otvara mogućnost zrakoplovnim vlastima za kreiranje i uvođenje takvih procedura u širu upotrebu u terminalnim zonama (engl. *Terminal Manoeuvring Area* ili TMA).

U kontekstu navigacije bazirane na performansama, navigacijskim specifikacijama smatraju se definirani kriteriji koje trebaju ispunjavati navigacijski sustavi, a navigacijskim aplikacijama primjena tih kriterija na konkretnu proceduru u instrumentalnom letenju, [1].

Pravci prema kojima je usmjeren razvoj navigacijskih aplikacija i infrastrukture mogu se razložiti na:

**a) Navigacijske specifikacije vezane uz rutno letenje.**

Radi se na razvoju i implementaciji napredne navigacijske specifikacije RNP-1 (engl. *Required Navigation Performance*).

**b) Navigacijske specifikacije u terminalnim zonama.**

Uvođenjem funkcije zahtijevanog vremena dolaska (engl. *Required Time of Arrival* ili RTA) povećat će se učinkovitost u iskorištenju zračnog prostora što će povećati kapacitet terminalnih zona.

**c) Navigacijske specifikacije za prilaženje na slijetanje.**

Sigurnost se povećava uporabom vođenja zrakoplova u vertikalnoj ravnini te prestankom upotrebe svih postupaka nepreciznih prilaženja (VOR, NDB). Poboľšanja u postojećim sustavima za precizno slijetanje te uvođenje novih GBAS/GLS (engl. *Ground-Based Augmentation System/GNSS Landing System*) trebalo bi povećati pristup aerodromima, njihov kapacitet prihvata, te povećati sigurnost tijekom operacija sa smanjenom vidljivošću.

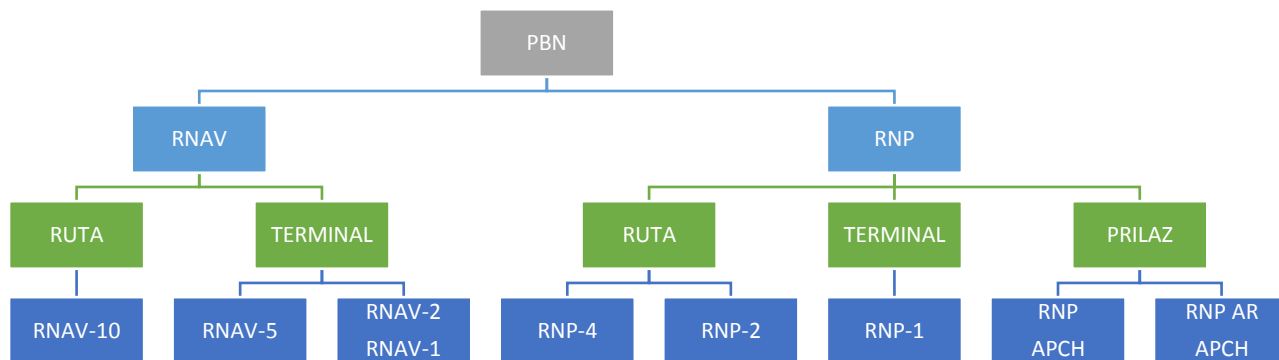
**d) Razvoj infrastrukture radionavigacijskih sredstava.**

Razvoj infrastrukture treba pratiti potrebe razvoja navigacijskih specifikacija koje se zasnivaju na primjeni metode prostorne navigacije. To se najprije odnosi na satelitske navigacijske sustave s dodatnim poboljšanjima pozicioniranja. Iz sigurnosnih razloga neka zemaljska radionavigacijska sredstva trebat će ostati u funkciji.

Kako su sustavi za prostornu navigaciju razvijani kroz dugo vremensko razdoblje, na različit način i različitim tempom u različitim krajevima svijeta, bilo je nužno standardizirati navigacijsku opremu zrakoplova, pa je ICAO (engl. *International Civil Aviation Organization*) 2007. g. predložio metodu definiranja zahtjeva za navigacijskom opremom zrakoplova. Zahtjevi su definirani tako da su precizno određene performanse koje navigacijska oprema zrakoplova mora imati. Tako je nastao pojam navigacije bazirane na performansama (engl. *Performance Based Navigation* ili PBN).

U ovom slučaju pojam performanse ne odnosi se na aerodinamičke sposobnosti zrakoplova već na sposobnost navigacijske opreme da udovolji traženim zahtjevima kako bi se omogućio let u nekom zračnom prostoru.

Radi lakšeg shvaćanja PBN koncepta i povezivanja naziva RNAV, PBN, RNP i RNAV-5, struktura PBN koncepta i međusobna povezanost elemenata prikazana je dijagramom na slici 2.2 ispod, [1].



**Slika 2.2.** Podjela PBN koncepta i pripadajućih navigacijskih specifikacija

Izvor: [2]

Dakle, kao što je prema slici 2.2 moguće zaključiti, koncept navigacije bazirane na performansama čine dvije navigacijske specifikacije, RNAV i RNP sa svojim oznakama i dijelom zračnog prostora gdje se primjenjuje. RNP navigacijske specifikacije propisuju uporabu samostalnog sustava zrakoplova (engl. *On-Board self-contained Performance Monitoring and Alerting system* ili OBPMAS) koji će kontinuirano pratiti poziciju zrakoplova, provoditi dodatne proračune i upozoravati posadu pri pojavi određenih odstupanja od namjeravane putanje leta. Za RNAV navigacijske specifikacije taj sustav nije potreban, što čini razliku između RNAV i RNP.

U naredna dva poglavlja RNAV i RNP biti će zasebno proučeni s tim da će veća pažnja biti dana RNAV sustavu iz kojeg zapravo RNP proizlazi, [1].

Prema PBN konceptu navigacijska oprema na zrakoplovu mora zadovoljiti definirane specifične zahtjeve, a to su:

- **Funkcionalnost**

Prikaz navigacijskih podataka i njihova uporaba od strane posade, mogućnosti autopilota za samostalno vođenje zrakoplova pri preletu definiranih točaka u pojedinim segmentima rute, kapacitet memorijske jedinice za pohranu podataka, način označavanja i prikazivanja ruta, prilaznih i odlaznih postupaka na prikaznicima te način označavanja i broj putnih točaka na ruti koje mogu biti selektirane.

- **Točnost**

Razina statističkog odstupanja od predviđene izmjerene ili željene putanje leta tokom ukupnog trajanja leta.

- **Cjelovitost**

Mogućnost sustava da na vrijeme obavijesti korisnika kada navigacijski sustav više nije operativan ili su informacije nepouzdana za vođenje navigacije.



- **Raspoloživost**

Sposobnost sustava u pružanju odgovarajuće navigacijske informacije tijekom namjeravane operacije zrakoplova unutar specifičnog zračnog prostora.

- **Kontinuitet**

Sposobnost funkcioniranja cjelokupnog navigacijskog sustava, odnosno skupa svih njegovih pojedinih elemenata nužnih za određivanje pozicije zrakoplova, [1].

Gore navedeni zahtjevi prikazani su dolje u tablici 1 sa vrijednostima za svaki kriterij te određenu vrstu operacije.

**Tablica 1.** Zahtjevi PBN koncepta koje mora zadovoljiti navigacijska oprema

| Vrsta operacije                                                                     | Točnost bočna<br>95 % | Točnost vertikalna<br>95 % | Cjelovitost                             | Vrijeme do upozorenja | Kontinuitet                                        | Dostupnost            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Početno prilaženje, međuprilaženje, neprecizno prilaženje i odlazni postupci</b> | 220 m                 | N/A                        | $1 \times 10^{-7}/h$                    | 10 s                  | od $1 \times 10^{-4}/h$<br>do $1 \times 10^{-8}/h$ | od 0,99 do<br>0,99999 |
| <b>Neprecizno prilaženje s vertikalnim navođenjem (APV I)</b>                       | 220 m                 | 20 m                       | $1 - 2 \times 10^{-7}$<br>po prilaženju | 10 s                  | $1 - 8 \times 10^{-6}$<br>unutar 15 s              | od 0,99 do<br>0,99999 |
| <b>Neprecizno prilaženje s vertikalnim navođenjem (APV II)</b>                      | 16 m                  | 8 m                        | $1 - 2 \times 10^{-7}$<br>po prilaženju | 6 s                   | $1 - 8 \times 10^{-6}$<br>unutar 15 s              | od 0,99 do<br>0,99999 |
| <b>ILS Cat I</b>                                                                    | 16 m                  | od 6 do<br>4,9 m           | $1 - 2 \times 10^{-7}$<br>po prilaženju | 6 s                   | $1 - 8 \times 10^{-6}$<br>unutar 15 s              | od 0,99 do<br>0,99999 |

Izvor: [1]

PBN koncept čine tri komponente:

- 1. Navigacijska infrastruktura** — odnosi se na zemaljska radionavigacijska sredstva VOR i DME (engl. *Distance Measuring Equipment*) ili satelitsku navigacijsku infrastrukturu (engl. *Global Navigation Satellite System* ili GNSS).
- 2. Navigacijske specifikacije** — definiraju zahtjeve performansi RNAV sustava u smislu točnosti, raspoloživosti, integriteta i kontinuiteta unutar definiranog koncepta zračnog prostora.
- 3. Navigacijske aplikacije** — primijenjene su navigacijske specifikacije na pripadajuću navigacijsku infrastrukturu. Dakle, navigacijske su aplikacije definirani postupci vođenja zrakoplova tijekom leta prema propisanoj putanji i odnose se na konkretne rute, postupke instrumentalnog prilaženja i sektore zračnog prostora.

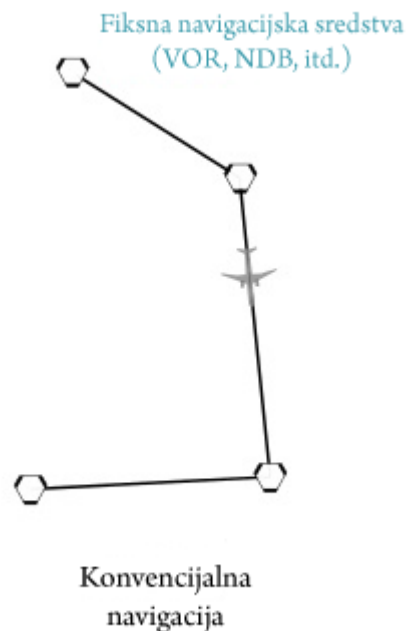
Brojke koje se nalaze uz oznake RNAV/RNP predstavljaju najveće dopušteno bočno odstupanje od zadanog pravca leta koje ne smije biti premašeno u najmanje 95 % vremena trajanja leta. Ta širina koridora odnosi se na različite dijelove zračnog prostora koji može biti na ruti ili u instrumentalnim postupcima (dolasci, odlasci, prilazi za slijetanje). Definirani zračni prostor propisuje pravila letenja prema RNP ili RNAV navigacijskim postupcima i u tom zračnom prostoru moći će letjeti samo zrakoplovi koji su opremljeni pripadajućom opremom i sustavima, [1].

## 2.2. Prostorna navigacija

Prema definiciji ICAO-a, prostorna navigacija (RNAV) metoda je zrakoplovne navigacije koja omogućuje letove zrakoplova na bilo kojim izabranim rutama, koje se nalaze unutar područja pokrivanja zemaljskih radionavigacijskih sredstava ili unutar ograničenja mogućnosti autonomnih navigacijskih sustava zrakoplova ili u njihovoj međusobnoj kombinaciji, [3].

Kako bi se ova definicija potpuno shvatila, potrebno je razjasniti neke modele i način funkcioniranja zračnog prostora koji su postojali prije nego je RNAV uveden u zrakoplovstvo. Rastom komercijalnog letenja u 20. st. na nebu se počinje stvarati sve veća gužva te se javlja nužnost za razdvajanjem zrakoplova jednih od drugih, održavajući ih na dovoljnoj udaljenosti i zahtijevajući letenje po definiranim zračnim putevima (engl. *Airways*). Zračni putevi definirani su pomoću različitih zemaljskih radionavigacijskih uređaja koji su bili strateški postavljeni na potrebnim udaljenostima i koji su se nalazili na važnim navigacijskim točkama kao što su granice područja letnih informacija (engl. *Flight Information Region* ili FIR), sjecišta zračnih putova ili točke skretanja. Let zračnim putovima zahtijevao je prelete preko radionavigacijskih uređaja ili eventualno let vrlo blizu njih. Slika 2.3 prikazuje kako je izgledao

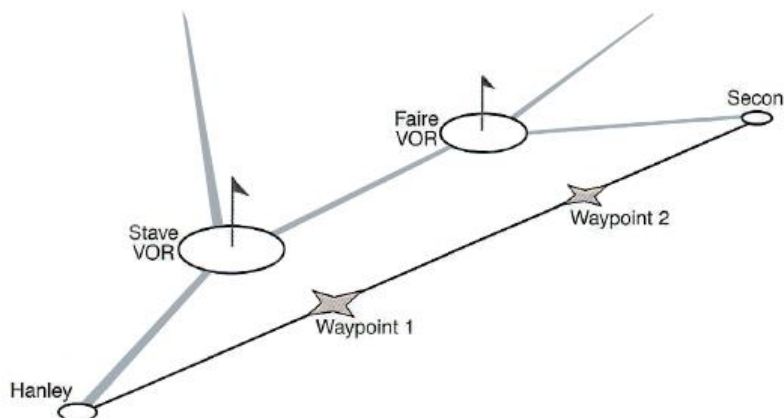
let po zračnim putevima. Takav koncept letenja u zračnom prostoru značio je da rute leta od polazišta do destinacije nisu optimalne, odnosno najkraće moguće, što je cilj svakog zračnog prijevoznika. Daljnje povećanje zračnog prometa dovodi do zagušenja mreže zračnih puteva, kašnjenja i restrikcija, a to u kombinaciji sa potrebom za direktnijim rutama leta prema odredištima i potrebom za smanjenjem troškova postaje razlog za uvođenje prostorne navigacije odnosno RNAV.



**Slika 2.3.** Primjer letenja preko navigacijskih sredstava po principu radionavigacije  
Izvor [4]

RNAV sustav omogućava direktnije letenje prema odredištima i fleksibilnije korištenje zračnog prostora tako što više nije potrebno letjeti od sredstva do sredstva već i prema drugim, novim uvedenim točkama, putnim točkama (engl. *Waypoints* ili WPT) koje će biti detaljnije pojašnjene u 3. poglavlju. Način leta u RNAV prostoru pojašnjen je slikom 2.4. Ako bi kao polazište bila pozicija *Hanley* a odredište *Secon*, RNAV rutu bi predstavljala crna linija koja ide preko WPT1 i WPT2, a ne preko *Stave* i *Faire* VOR-ova kako bi išla da je radionavigacija u pitanju.





**Slika 2.4.** Način letenja prema prostornoj navigaciji korištenjem putnih točaka, [5]

Zbog svoje specifičnosti u korištenju zračnog prostora koje dozvoljava let kroz zračni prostor van zračnih putova koji daju sigurnost u odvijanju leta, sustavi za navigaciju u zraku i na zemlji moraju imati bolje mogućnosti za pozicioniranje nego što je bio slučaj u konvencionalnoj navigaciji. Zbog te činjenice na RNAV rutama smiju letjeti samo oni zrakoplovi koji su propisno opremljeni navigacijskim uređajima koji zadovoljavaju tražene zahtjeve za preciznost navigacije, odnosno imaju odobrenje za let u takvom prostoru, (engl. *RNAV approved*). Također, ti zahtjevi moraju biti ispunjeni i na zemlji, zemaljskim navigacijskim sredstvima i/ili nebeskim, satelitskim sustavima, što je zapravo početna točka za uvođenje u funkciju takvog tipa zračnog prostora. Kako ovo nije novost u zrakoplovstvu, gotovo svi današnji zrakoplovi opremljeni su sustavima koji omogućavaju RNAV navigaciju i većina zračnog prostora u svijetu podržava mogućnost RNAV-a.

Ako je zrakoplov propisno opremljen, u mogućnosti je koristiti sljedeće RNAV rute:

- **Fiksne objavljene RNAV rute**  
Ove su dostupne za korištenje u planu leta samo ako zrakoplov ima RNAV sposobnost.
- **Nepredviđene RNAV rute**  
Objavljene rute koje mogu koristiti odgovarajuće opremljeni zrakoplovi tijekom definiranih vremena.
- **Nasumične RNAV rute**  
To su neobjavljene rute i mogu biti planirane unutar definiranih područja.

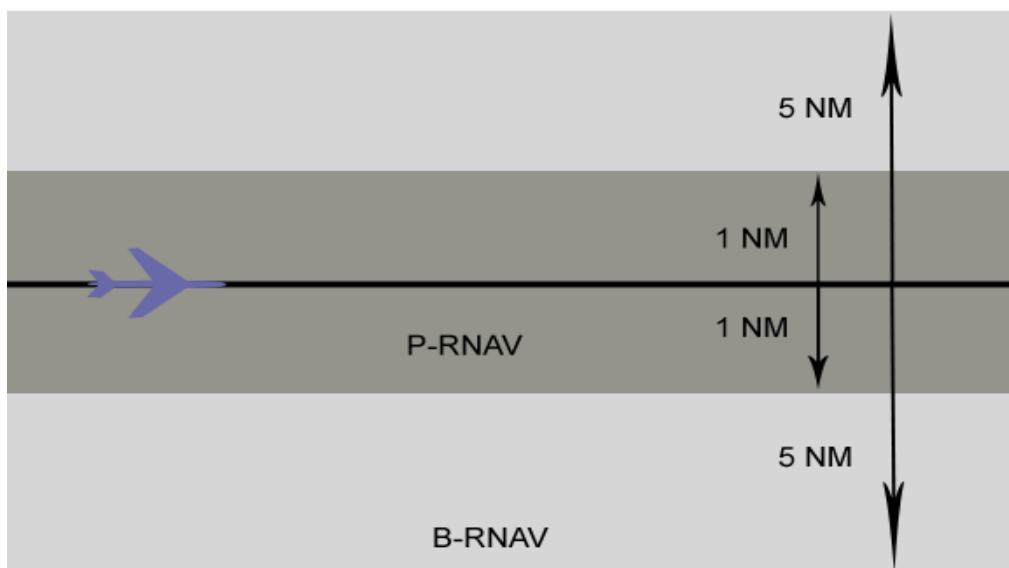
RNAV navigacija dijeli se na dvije vrste i tri razine. Podjela na vrste definirana je preciznošću pozicioniranja pa postoji:

– **Opća RNAV (engl. *Basic RNAV* ili **B-RNAV**)** koja mora dati točnost pozicije do 5 NM<sup>1</sup> u 95 % slučajeva. Svi zrakoplovi koji lete u europskom zračnom prostoru i prevoze 30 i više putnika moraju posjedovati B-RNAV sposobnost navigacije.

– **Precizna RNAV (engl. *Precision RNAV* ili **P-RNAV**)** mora biti precizna do 1 NM u 95 % slučajeva. P-RNAV navigacija tek treba biti implementirana.

Procedure P-RNAV omogućene su uporabom sljedećih navigacijskih sustava: VOR/DME, DME/DME, INS/IRU (engl. *Inertial Navigation System* ili *Inertial Reference System/Unit*) i GNSS. GNSS sustav bit će upotrebljen za izradu putnih točaka i simulaciju.

Usporedba B-RNAV i P-RNAV u odnosu na zahtijevanu preciznost prikazana je na slici 2.5.



**Slika 2.5.** Usporedba P-RNAV i B-RNAV prema zahtijevanoj bočnoj preciznosti navigacije

Nadalje, RNAV se dijeli na tri razine mogućnosti:

- 2D RNAV koje se odnosi na mogućnosti vođenja zrakoplova samo u horizontalnoj ravnini.
- 3D RNAV u kojoj je uključena mogućnost vođenja u vertikalnoj ravnini.
- 4D RNAV je 3D RNAV kojoj je pridodana funkcija vremena, [5], [6].

### 2.3. *Required navigation performance* navigacijska specifikacija

<sup>1</sup> Nautička milja (*Nautical Mile*). 1 NM = 1852 m

Kako je ranije napisano, RNP navigacijska specifikacija proizlazi iz RNAV navigacije, te se razlikuju samo po tome što RNP zahtijeva postojanje OBPMA sustava.

Kada zrakoplov leti prema navigacijskoj specifikaciji RNAV-1, bočno odstupanje od zadane putanje unutar 95 % vremena leta mora biti 1 NM. Ako, slučajno, to odstupanje u jednom trenutku bude veće od 1 NM, RNAV-1 navigacijska specifikacija ne predviđa mogućnost informiranja posade o tome da navigacijski sustav ne osigurava dovoljnu točnost navigacije. S druge strane, RNP-1 navigacijska specifikacija ima iste zahtjeve navigacijske točnosti kao RNAV-1, ali ovdje sustav na zrakoplovu ima mogućnost upozorenja posade u slučaju nedovoljno preciznog vođenja navigacije.

RNP navigacijski instrumentalni postupci uvedeni su u ICAO standarde 1996. godine te su bili prethodnica postojećeg PBN koncepta. Za njihovu su uporabu bile unaprijed definirane potrebne performanse navigacijske opreme zrakoplova. Međutim, zbog nedovoljno preciznih definicija pojedinih navigacijskih specifikacija i pripadajućih operativnih zahtjeva, nije se mogla jasno definirati razlika između RNP i RNAV. Upravo zbog toga je ICAO izdao priručnik u kojemu se definiraju koncepti i specifikacije, ali zbog višegodišnje opće neusuglašenosti vezane uz terminologiju, neke kratice još uvijek mogu biti višeznačne.

RNP navigacijske specifikacije namijenjene su postupcima instrumentalnog prilaženja. Međutim, važno je naglasiti da se konstrukcija procedura prema RNP specifikacijama ne temelji samo na jednom određenom senzoru, odnosno radionavigacijskom sredstvu. To je od značaja za aerodrome koji su okruženi prirodnim preprekama (planine) te koji zbog toga nisu mogli imati definiranu radionavigacijsku proceduru instrumentalnog prilaženja pa se slijetanje moglo provoditi jedino danju u vizualnim uvjetima. Razlog nemogućnosti implementiranja postupka prilaženja metodom radionavigacije primarno je činjenica da područja sigurnog nadvisivanja prepreka nisu mogla postojati zbog malog raspoloživog prostora unutar samog reljefa. Uporaba i odabir prikladnih RNP procedura temelji se na zahtjevima koje postavlja zračni prostor, raspoloživa navigacijska infrastruktura na zemlji, te na operativnim mogućnostima zrakoplova za koje se očekuje da će upotrebljavati takve navigacijske procedure.

Prema ICAO PBN konceptu, planirane su sljedeće RNP specifikacije:

- **RNP-4** navigacijska specifikacija kojom se propisuje 30 NM bočno i uzdužno razdvajanje zrakoplova iznad velikih kopnenih i morskih površina. Primarni navigacijski senzor su sustavi satelitske navigacije.
- PBN koncept predviđa i **RNP-2** navigacijsku specifikaciju, ali ona nije posebno definirana te je ostavljena mogućnost njezina daljnjeg razvoja, [1].

- **Basic RNP-1** navigacijska specifikacija namijenjena je instrumentalnim letnim postupcima koji određuju prijelazne segmente između faze rutnog leta i završnih terminalnih zona u kojima ne postoje usluge kontrole zračnog prometa ili su one ograničene. Dakle, moguće je konstruirati dolazne i odlazne procedure, kao i segmente prilazne procedure (osim segmenta završnog prilaženja), pri čemu gustoća zračnog prometa treba biti mala do umjerena. Koncept PBN predvidio je i **Advanced RNP-1** specifikaciju, ali elementi i standardi te specifikacije još nisu razvijeni i definirani.
  
- **RNP APCH**
  
- **RNP AR APCH, [1].**

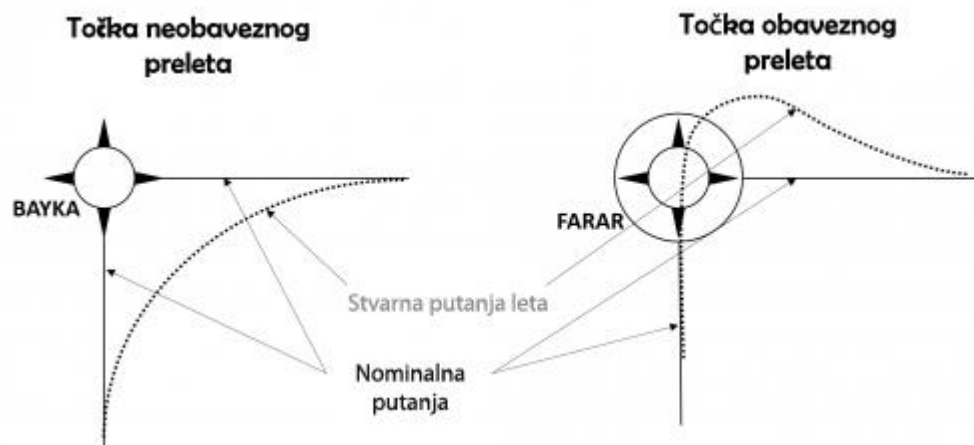
### 3. Putne točke

Prema definiciji, putna točka je određena zemljopisna lokacija koja se koristi za definiranje rute u prostornoj navigaciji ili putanje leta zrakoplova koji koristi prostornu navigaciju.

Putne su točke identificirane kao:

- I. točka neobaveznog preleta (engl. *Fly-by waypoint*) – putna točka koja zahtijeva izvršetak zaokreta kako bi omogućila tangencijalno presijecanje sljedećeg segmenta rute ili procedure.
- II. točka obaveznog preleta (engl. *Flyover waypoint*) – putna točka kod koje je iniciran zaokret kako bi se uključilo u sljedeći segment rute ili procedure, [7].

Primjer takvih putnih točki prikazuje slika 3.1.



**Slika 3.1.** Vrste putnih točki

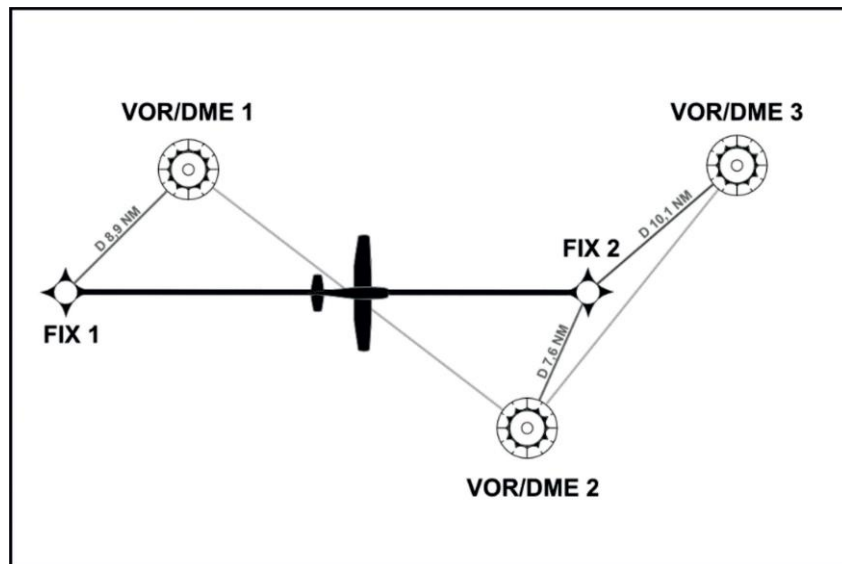
Izvor: [8]

Preletišta je određena točka pri konstrukciji zračnih putova i instrumentalnih procedura u terminalnim zonama na kojoj se između ostalog provodi razdvajanje zrakoplova na ruti, vrši promjena nadležnosti nad kontrolom zrakoplova, definiraju prilazni ili rutni segmenti, pozicije obaveznog javljanja i sličnih postupaka u svrhu provođenja sigurnog zračnog prometa. Preletišta čine i točke koje definiraju planiranu rutu leta.

U radionavigaciji su putne točke ili preletišta (engl. *fix*) definirana uglavnom smještajem zemaljskih radionavigacijskih postaja, pa je mreža zračnih putova prilagođena tom rasporedu. Najčešće neki zračni put počinje ili završava iznad određene VOR postaje.

Sustavi prostorne navigacije u zrakoplovu i na zemlji omogućuju vođenje navigacije s definiranom razinom točnosti bez potrebe za preletom iznad radionavigacijskih sredstava. Tako nestaje potreba za definiranim zračnim putovima ili propisanim rutama.

Kako je ranije objašnjeno, primjena RNAV metode omogućuje rasterećivanje zračnog prometa, smanjenje zagušenja i povećanje kapaciteta određenog sektora zračnog prostora tako što omogućuje kreiranje većeg broja virtualnih putnih točaka u blizini nekog navigacijskog sredstva ili sredstava iako te točke ne ovise o položaju same radionavigacijske postaje (slika 3.2). Tako kreirane točke, preletišta, definiraju se nazivom i zemljopisnim koordinatama, [1].



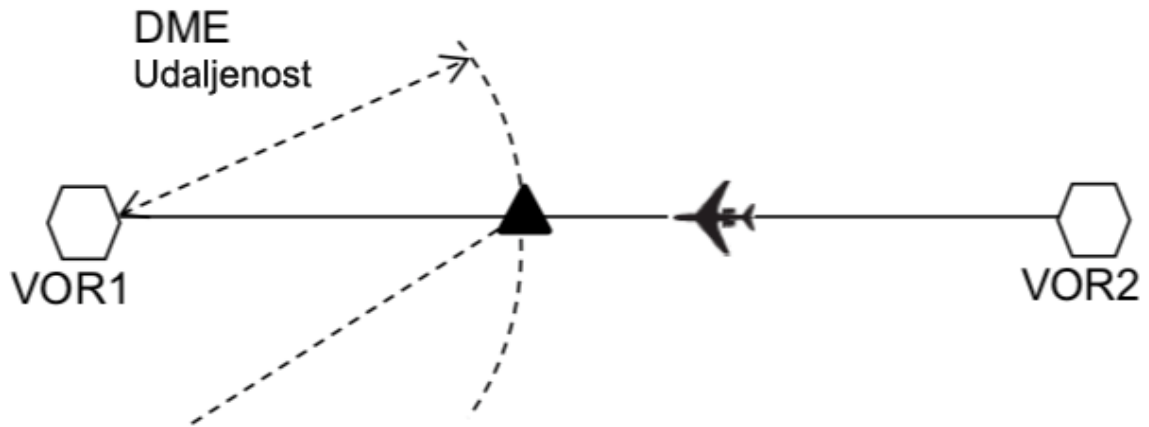
**Slika 3.2.** Način definiranja i izgled putnih točki, te letenja u odnosu na njih, [9]

Postoji nekoliko načina određivanja i kreiranja putnih točaka, a to su:

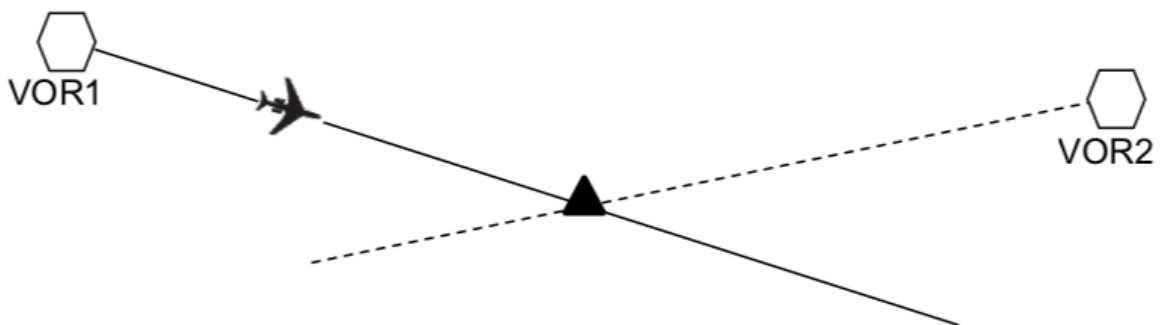
- presjecištem VOR radijala<sup>2</sup> i DME<sup>3</sup> udaljenosti (slika 3.3)
- presjecištem dva radijala (slika 3.4)
- presjecištem dviju DME udaljenosti (slika 3.5)
- navigacijskim sredstvom (slika 3.6)
- zemljopisnim koordinatama (slika 3.6)
- vremenom leta na određenom radijalu (slika 3.7), [1].

<sup>2</sup> VOR stanica emitira elektromagnetske signale (polupravce - radijale) u svim smjerovima te tako zatvara kružnicu od 360°. Kaže se da je zrakoplov na radijalu R120 kada presijeca polupravac koji zatvara kut od 120° s pravcem magnetskog sjevera.

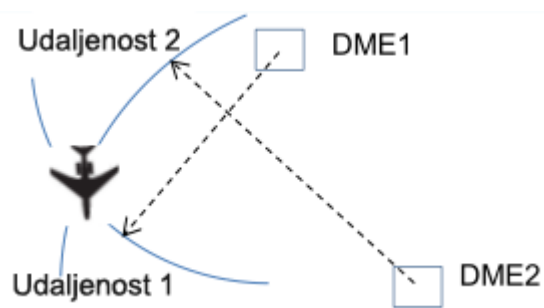
<sup>3</sup> DME je rutno ili prilazno radionavigacijsko sredstvo za određivanje kose udaljenosti zrakoplova od poznatoga zemljopisnog položaja na Zemlji.



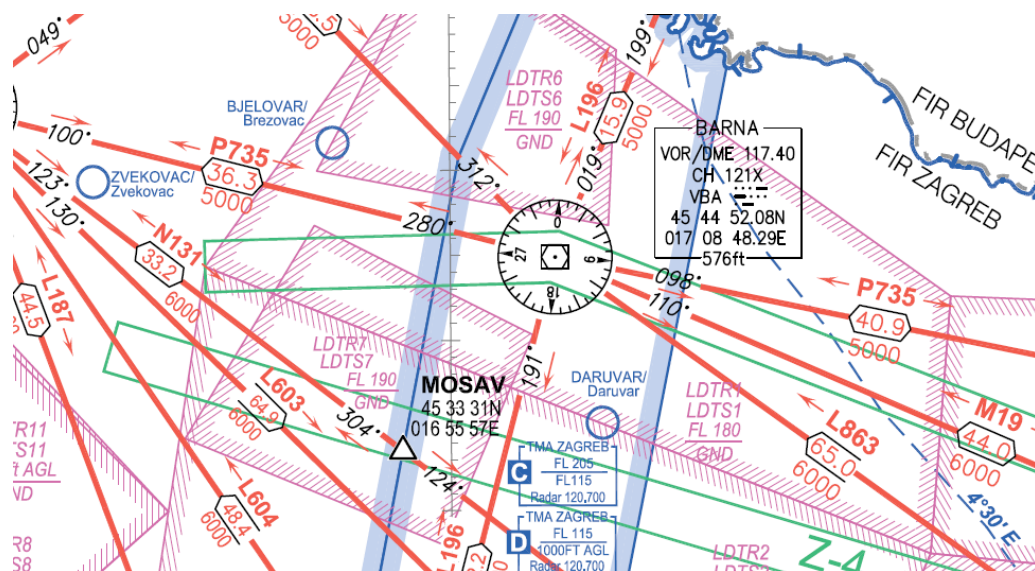
**Slika 3.3.** Preletište dobiveno sjecištem VOR radijala i DME udaljenosti  
Izvor: [10]



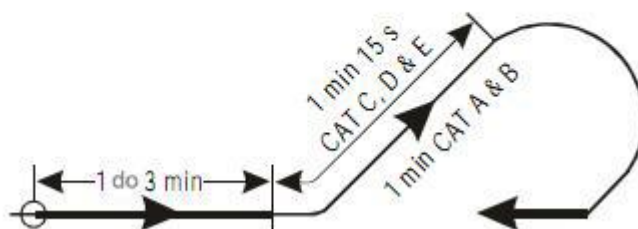
**Slika 3.4.** Preletište dobiveno sjecištem dva VOR radijala  
Izvor: [10]



**Slika 3.5.** Preletište dobiveno sjecištem dvije DME udaljenosti  
Izvor: [11]



**Slika 3.6.** Putna točka kao radionavigacijsko sredstvo (VBA VOR) i putna točka definirana pomoću zemljopisnih koordinata (MOSAV), [12]



**Slika 3.7.** Putna točka definirana vremenom leta po radijalu u izvođenju proceduralnog zaokreta  
Izvor: [13]

Budući da se pri vođenju zrakoplova metodom instrumentalne navigacije pretpostavlja letenje u uvjetima bez vanjske vidljivosti, što nije slučaj kod vođenja vizualne navigacije gdje se različitim vizualnim postupcima prikupljaju informacije o trenutnom položaju zrakoplova uglavnom prema orijentirima na površini zemlje, važno je naglasiti jednu stvar, a to je da putne točke ili preletišta ne predstavljaju nikakva zemljopisna obilježja na površini zemlje ili objekte na njoj, već su to isključivo radionavigacijske stanice i/ili izmišljene točke.

Okosnica prostorne navigacije svakako je navigacijsko RNAV računalo. Ono u svom radu koristi inercijski navigacijski sustav INS/IRS. INS određuje poziciju zrakoplova prema zemljopisnoj širini i dužini i omogućuje kreiranje točaka kojima se može definirati navigacijska ruta leta. Računalo u zrakoplovu vodit će zrakoplov programiranom putanjom. Kada u letu po toj ruti dođe u blizinu kreirane putne točke na kojoj je potrebno promijeniti smjer leta, ovisno o brzini leta, računalo proračunava trenutak uvođenja zrakoplova u



zaokret te potreban nagib za izvođenje tog zaokreta. Putanja tijekom zaokreta definirana je tako da dovede zrakoplov točno na putanju odleta od preletišta, pa tako nije potreban prelet preko putne točke. Dakle, računalo, iz podataka s INS-a i preko navigacijskih prikaznika i instrumenata, proračunava i prikazuje sve relevantne navigacijske informacije o poziciji zrakoplova u odnosu na tu putnu točku. Ono sve tako kreirane točke 'doživljava' kao zemaljske radionavigacijske postaje iako one to nikako nisu pa zbog toga imaju naziv fantomske stanice (engl. *phantom stations*).

Nadalje, RNAV sustavi na zrakoplovu imaju jednu veliku prednost, a to je mogućnost spremanja unaprijed definiranih i kreiranih ruta i navigacijskih procedura u bazu podataka RNAV računala odakle se mogu ponovo koristiti na drugim letovima. To smanjuje radno opterećenje posade prije i tijekom leta.

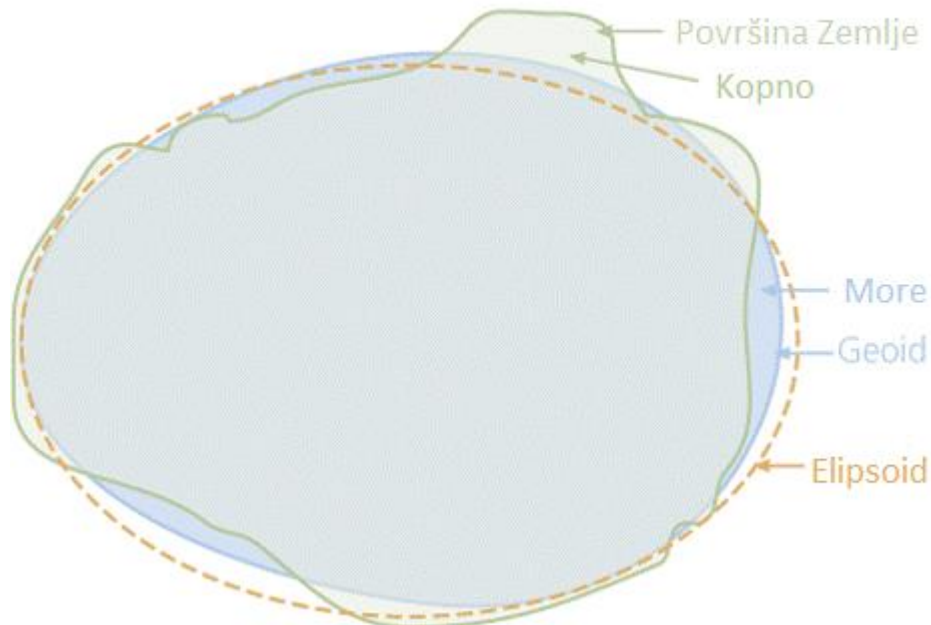
## 4. Sustavi satelitske navigacije

Satelitski navigacijski sustavi su sustavi koje u današnje vrijeme koristimo u svakodnevnom životu i doslovno su nam dostupni na dlanu, na primjer, mobilni telefoni, navigacijski uređaji, automobili novije proizvodnje s ugrađenom navigacijom. Koristimo ih kako bi nam dali informaciju za putovanje do određenog mjesta nekim vozilom, javnim prijevozom ili pješke. Također, GNSS sustavi sve se više počinju upotrebljavati za pozicioniranje u zrakoplovstvu, što je i tema ovog poglavlja. Kako bi bilo moguće pojasniti način rada, različite sustave, način primjene u zrakoplovstvu, te prednosti i nedostatke, potrebno je iznijeti i pojasniti neke osnove.

Zemlja kao svemirsko tijelo ima oblik elipse koja je spljoštena na polovima. Površina Zemlje pokrivena je kopnenim i vodenim površinama. Površina na kopnu nije ujednačena te na njoj nalazimo različite udubine, ravnice, brežuljke, brda i planine. Radi te činjenice površina zemlje aproksimira se kako bi se ta aproksimacija ujednačeno mogla koristiti na različitim lokacijama. Geoid bi bila ekvipotencijalna površina koja bi se potpuno podudarala sa srednjom razinom mora kad bi sva mora i oceani na Zemlji bili u ravnoteži. Zbog nepravilnosti rasporeda zemljine mase i različite gustoće, geoid je nepravilno tijelo. Osobina geoida je da u svakoj točki na površini sila teže djeluje okomito.

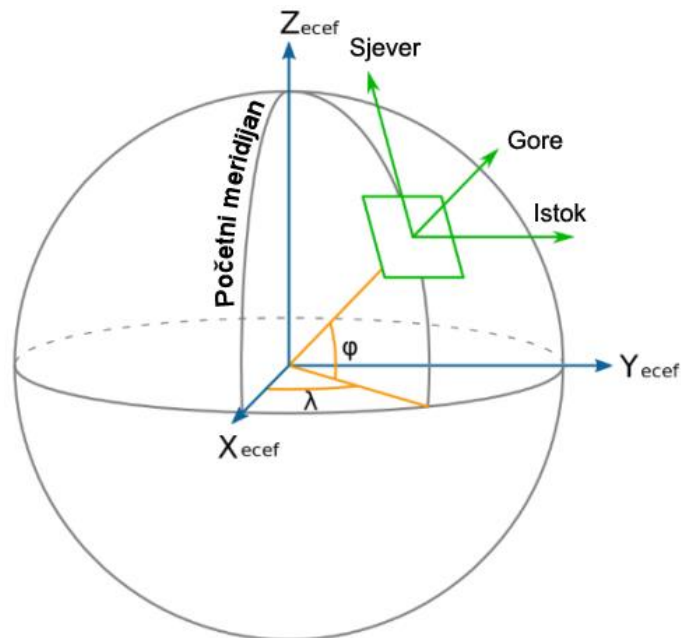
Referentni elipsoid je elipsoid na koji se svode geodetska mjerenja i na kojem se onda ona obrađuju. Referentni elipsoid uzima se kao najbolja matematička aproksimacija nepravilne površine geoida. Svjetski elipsoid je elipsoid koji najbolje aproksimira Zemlju u cjelini, dok lokalni elipsoid najbolje aproksimira određeni dio Zemljine površine. Na toj određenoj površini ploha geoida minimalno odstupa od plohe elipsoida. Na slici 4.1 prikazan je izgled i odnos svih definiranih površina, [14].

## Model Zemlje



**Slika 4.1.** Izgled elipsoida i geoida u odnosu na površinu Zemlje  
Izvor: [15]

WGS84 (engl. *World Geodetic System 1984.*) je naziv za elipsoid koji se koristi u GNSS sustavima. Ima ishodište u središtu mase Zemlje, os  $z$  usmjerena je u pravcu konvencionalnog zemljinog pola, os  $x$  je presjek ravnine referentnog meridijana koji se nalazi 100 m istočno od nultog meridijana, os  $y$  zatvara desni, odnosno pozitivni ECEF (engl. *Earth Centered Earth Fixed*) ortogonalni koordinatni sustav, mjereno u ravnini ekvatora  $90^\circ$  istočno od osi  $x$  (slika 4.2), [14].



**Slika 4.2.** ECEF koordinatni sustav

Izvor: [16]

Trenutno u svijetu postoji nekoliko GNSS sustava, a to su:

- GPS (engl. *Global Positioning System*) – sustav Sjedinjenih Američkih Država
- GLONASS (engl. *GLobal Orbiting NAVigation Satellite System*) – sustav Ruske federacije
- GALILEO – sustav EU
- BeiDou – sustav Kine
- itd.

GPS je najstariji GNSS sustav. S funkcijom je započeo 1978., a za svjetsku upotrebu dostupan je od 1994. Potreba za neovisnom vojnom navigacijskom sposobnošću potaknula je njezinu inovaciju. Tako je GPS svoj rad započeo kao vojni projekt koji se koristio za pružanje informacija o lokaciji i navigacije raketnim podmornicama, brodovima, kao i za hidrografske snimanje i geodetske izmjere američke vojske. S vremenom je GPS otvoren za javnu upotrebu. Trenutno GPS ima 33 satelita u konstelaciji, od čega je 31 u orbiti i funkciji. Održavaju ga američke zračne snage kojima je zadatak držati najmanje 24 funkcionalna GPS satelita. Do danas je GPS lansirao 72 satelita.

GLONASS je navigacijski sustav Rusije. Počeo je s radom 1993. godine s 12 satelita u 2 orbite na visini od 19 130 km. Trenutno je u orbiti ukupno 27 satelita i svi su operativni. GLONASS-om upravljaju ruske zrakoplovne obrambene snage i drugi je alternativni navigacijski sustav u upotrebi.

Galileo je GNSS konstelacija Europske unije koju sastavlja Europska svemirska agencija i njime će upravljati Europska GNSS agencija. Galileo je navigacijski sustav dostupan za civilnu i komercijalnu upotrebu. Potpuno implementirani sustav sastojat će se od 30 operativnih satelita i 6 rezervnih satelita u orbiti. Do danas su 22 od 30 satelita u orbiti. Galileo je počeo nuditi ranu probnu uporabu od 2016. godine, a očekuje se da će dostići punu operativnu sposobnost do 2020. godine.

BeiDou je satelitski navigacijski sustav Kine. U orbiti su ukupno 22 operativna satelita, a puna konstelacija trebala bi imati 35 satelita. BeiDou ima dvije odvojene konstelacije, BeiDou-1 i BeiDou-2.

BeiDou-1 je prva generacija sustava i bila je to konstelacija s 3 satelita. Počeo je s radom 2000. godine i nudio je ograničeno pokrivanje i navigacijske usluge uglavnom za korisnike u Kini i susjednim regijama. BeiDou-1 isključen je krajem 2012. godine.

BeiDou-2, poznat kao COMPASS, druga je generacija sustava. Počeo je s radom 2011. godine s djelomičnom konstelacijom od 10 satelita u orbiti. Sljedeća generacija je BeiDou-3. Prvi satelit BDS-3 lansirao je u ožujku 2015. Od siječnja 2018. lansirano je devet satelita BDS-3. Očekuje se da će BeiDou-3 biti u potpunosti funkcionalan do kraja 2020. godine, [17].

U tablici 2 napravljen je pregled GNSS sustava s njihovim pripadajućim karakteristikama.

**Tablica 2.** Karakteristike najpoznatijih GNSS sustava

| Sustav                  | GPS                                               | GLONASS                                                                                                           | BeiDou                                                                              | Galileo                                                                                                          |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vlasnik</b>          | SAD                                               | Rusija                                                                                                            | Kina                                                                                | EU                                                                                                               |
| <b>Orbitalna visina</b> | 20 180 km                                         | 19 130 km                                                                                                         | 21 150 km                                                                           | 23 222 km                                                                                                        |
| <b>Period</b>           | 11 h 58 min                                       | 11 h 16 min                                                                                                       | 12 h 38 min                                                                         | 14 h 5 min                                                                                                       |
| <b>Broj satelita</b>    | 32 (najmanje 24 prema dizajnu)                    | 28 (najmanje 24 prema dizajnu) uključujući: 24 operativna, 2 pod kontrolom glavnog izvođača, 2 u fazi ispitivanja | 5 geostacionarnih (GEO) satelita, 30 (MEO) satelita u srednje visokoj orbiti Zemlje | 4 satelita u orbiti za provjeru + 8 potpuno funkcionalnih satelita u orbiti. 22 funkcionalna satelita u budžetu. |
| <b>Frekvencija</b>      | 1,57542 GHz (L1 signal)<br>1,2276 GHz (L2 signal) | Oko 1,602 GHz (SP)<br>Oko 1,246 GHz (SP)                                                                          | 1,561098 GHz (B1)<br>1,589742 GHz (B1-2)<br>1,20714 GHz (B2)<br>1,26852 GHz (B3)    | 1,164-1,215 GHz (E5a i E5b)<br>1,260-1,300 GHz (E6)<br>1,559-1,592 GHz (E2-L1-E11)                               |
| <b>Status</b>           | U funkciji                                        | U funkciji                                                                                                        | 22 funkcionalna satelita, 40 dodatnih satelita od 2016 – 2020.                      | 8 satelita u funkciji, 22 dodatna satelita od 2016. – 2020.                                                      |

Izvor: [17]

Princip rada nabrojanih satelitskih sustava je sličan i u nastavku će ukratko biti pojašnjen način rada GPS sustava budući da je najrasprostranjeniji što se tiče šire upotrebe, te se također primjenjuje u zrakoplovstvu.

Sustav GPS sastoji se od tri segmenta:

1. Svemirski segment – čine ga 24 satelita od kojih je svaki opremljen sa 4 atomska sata. Sateliti su raspoređeni u 6 orbita s po 4 satelita u svakoj, 21 je u uporabi, 3 su pričuvna. U svakom trenutku vidljivo je 5 satelita. Prosječna visina mu je 20 180 km. Vrijeme preleta putanje je 11 h i 58 min. Nagib (inklinacija) orbitalne ravnine je 55° prema ekvatoru. Dvije su frekvencije u upotrebi: L1 – 1575,42 MHz (C/A i P kodovi) i L2 – 1227,60 MHz (P kod). Satelit se smatra nevidljivim kada je manje od 5° iznad vidljivog horizonta.
  
2. Upravljački (kontrolni) segment – GPS sustav nadzire se s pomoću sustava zemaljskih stanica raspoređenih po cijeloj Zemlji i on obuhvaća:
  - MCS (engl. *Master Control Station*) (Colorado Springs) – sakuplja podatke monitorskih stanica, računa precizne efemeride (pozicije satelita u orbiti), korekcije točnog vremena i parametre sustava, te prosljeđuje te podatke zemaljskim stanicama za slanje korekcija prema satelitima.  
*Back up* MCS (Onizuka) – pričuvna postaja.
  - MS (engl. *Monitoring Station*) (Ascension, Hawaii, Kwajalein, Diego Garcia) – stanice neprekidno mjere pseudo-udaljenosti od svih satelita na obzoru. Mjerenja se obavljaju svakih 1,5 s, a svakih 15 min šalju se podatci u kontrolnu postaju.
  
3. Korisnički segment – čine ga:
  - višekanalni prijamnik – prati sve vidljive satelite i selektira samo 4 najbolja.
  - sekvencijski prijamnik – raspoređuje satelite u grupe po 4 te kombinira najbolju grupu
  - Složeniji prijamnik – brzo određuje poziciju, a sustav je jedno ili dvokanalni.

GPS je sustav koji se zasniva na mjerenjima udaljenosti od satelita, što se svodi na mjerenje vremena potrebnog da signal emitiran sa satelita s poznatom pozicijom stigne do prijarnika. Vrijeme rasprostiranja signala pomnoženo s brzinom putovanja signala (brzina svjetlosti) daje udaljenost od satelita do korisnika. Mjereći vrijeme rasprostiranja signala dvaju satelita i računajući udaljenost od njih, prijamnik može utvrditi svoju lokaciju. Dvoznačnost pozicije može se izbjeći mjerenjem udaljenosti do trećeg satelita. Da bi se osigurala što preciznija mjerenja pozicije koja se svode na precizno utvrđivanje trenutka prijema, potrebno je osigurati što precizniju usklađenost satova satelita i prijarnika. Svi GPS sateliti istodobno odašilju signale na dvjema prijenosnim frekvencijama, L1 i L2. Frekvencije nosilaca precizno se nadziru s pomoću atomskih satova. Prijenosni signali su modulirani binarnom bifaznom modulacijom (engl. *Binary Phase Shift Keying* ili BPSK). Kodna sekvenca C/A (engl. *Coarse/Acquisition code*) i P (engl. *Precision code*) kodova ima pseudoslučajni oblik koda (engl. *Pseudo Random Noise* ili PRN). Ovi kodovi ako su istodobno primljeni s različitih satelita ne koreliraju međusobno; svi signali mogu biti primljeni na istoj frekvenciji i svaki se

pojedini signal može selektivno izdvojiti. Kod nije u potpunosti slučajan, nego slijedi matematički proces, tako da je predvidljiv (zato naziv pseudoslučajni kod). Za određivanje pozicije pomoću satelita potrebna su minimalno četiri vidljiva satelita. Četvrti satelit služi za eliminiranje pogreške u mjerenju vremena koja je posljedica netočnog mjerenja u prijamniku.

Osnovni princip određivanja pozicije je: sateliti emitiraju radiosignale s pomoću kojih se mogu mjeriti udaljenosti između satelita i prijamnika, prijamnik prima te signale i bilježi vremenski pomak, vremensku razliku između početka odašiljanja i primitka signala, te znajući udaljenost satelita, izračuna našu poziciju (slika 4.3).



**Slika 4.3.** Grafički prikaz određivanja pozicije s četiri satelita

Izvor: [18]

Sateliti odašilju poziciju preko C/A i P kodova. C/A kod je kod za pozicioniranje standardnom razinom točnosti. Predviđen je za standardnu uslugu (engl. *Standard Position Service* ili SPS) i dostupan je svim korisnicima. C/A kod se ponavlja svake milisekunde na frekvenciji od 1,023 MHz. P kod je kod za pozicioniranje s višom razinom točnosti. Ograničen je na korisnike koje je odobrilo američko Ministarstvo obrane i pruža preciznu uslugu pozicioniranja (engl. *Precision Position Service* ili PPS). Ponavlja se svakih 7 dana na frekvenciji 10,23 MHz.

Kao i svaki sustav, i ovaj je sustav podložan pogreškama. Pogreške pozicioniranja GPS sustava dolaze iz dva izvora i dijele se na:

a) sistemske

- pogreške u efemeridama – pogreška uzrokovana pogrešno određenom pozicijom satelita (najveća pogreška 2,5 m).
- pogreške sata u satelitu – provjerava se svakih 12 h. Pogreška se prvo utvrđuje pa se sustav upozori jer je popravak neisplativ (najveća pogreška 1,5 m).

- ionosferske pogreške – nastale su širenjem signala kroz ionosferu, posljedica je solarne aktivnosti (najveća pogreška je 5 m).
- troposferske pogreške - nastale pod utjecajem radiovalova prolaskom kroz oblake, kišu, različite tlakove i sl. (najveća pogreška 0,5 m).
- šum u prijarniku – nastaje u slučaju neispravnih komponenti (najveća pogreška 0,3 m).
- prijem s više signala – uzrokovana odbijanjem signala od površine (najveća pogreška 0,6 m).

b) geometrijske

- geometrijska degradacija – nastaje kada avion svojim oblikom tijekom zaokreta zakloni signal koji ide prema prijarniku.
- geometrijska degradacija točnosti mjerenja (GDOP) – pogreška je veća kada su dva satelita bliže jedan drugom, nego u situacijama kada su dalje, tada je područje pozicije manje.

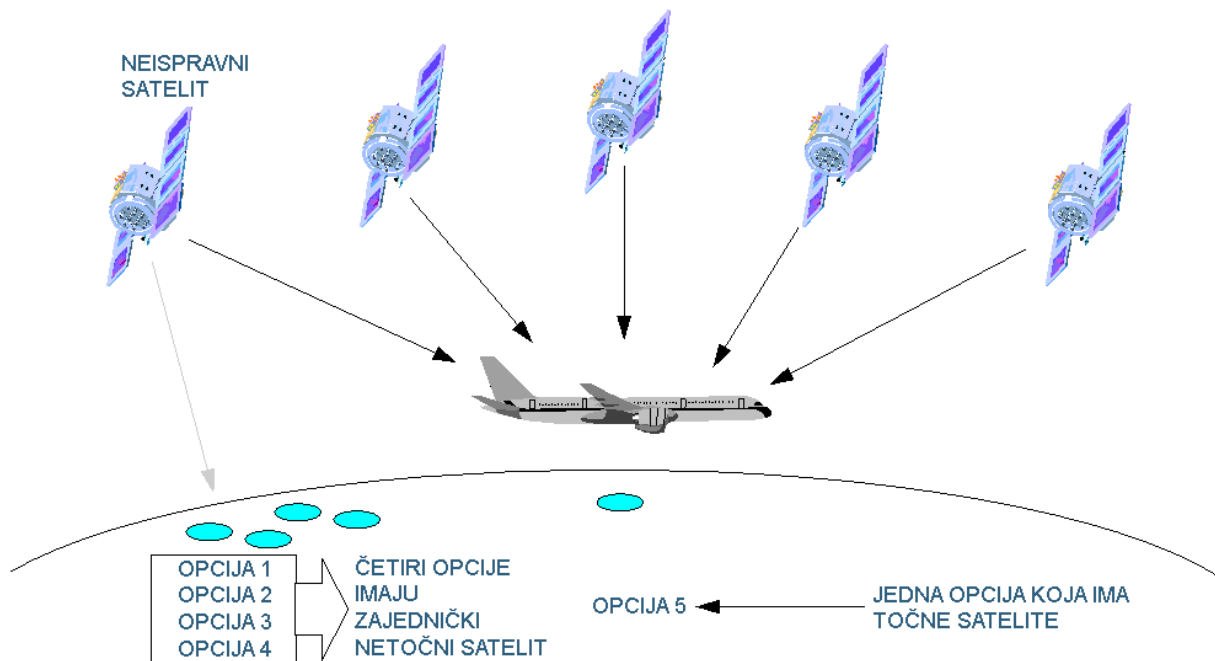
Najveće greške u SPS su horizontalno  $\leq 36$  m, a vertikalno  $\leq 77$  m. U PPS najveća je greška 5 m horizontalno, a vertikalno 27,7 m.

No, postoji nekoliko tipova ili poboljšanja GPS sustava koji se primjenjuju za navigaciju u zrakoplovstvu. To su:

- Zrakoplovni sustav dopune - (engl. *Aircraft-Based Augmentation System* – ABAS)
- Zemaljski sustav dopune - (engl. *Ground-Based Augmentation System* – GBAS)
- Satelitski sustav dopune - (engl. *Space-Based Augmentation System* – SBAS)

Kod ABAS sustava, GPS prijarnik koristi peti satelit za određivanje moguće pogreške nekog od satelita. Kompariranjem pozicija dobivenih kombiniranjem tih 5 satelita otkriva koji satelit griješi, isključuje ga za pozicioniranje i ostaje na 4 satelita. Da bi se takav sustav mogao koristiti potrebno je 6 vidljivih satelita jer u slučaju korištenja 5 i otkaza jednog više ne postoji mogućnost kontrole otkaza. Računalni algoritam zrakoplovnog sustava dopune (engl. *Receiver Autonomous Integrity Monitoring/Fault Detection and Exclusion* ili RAIM/FDE) upozorava na grešku i uklanja je. Potrebno je 30 satelita u orbiti da bi se ostvarila potrebna dostupnost (slika 4.4).



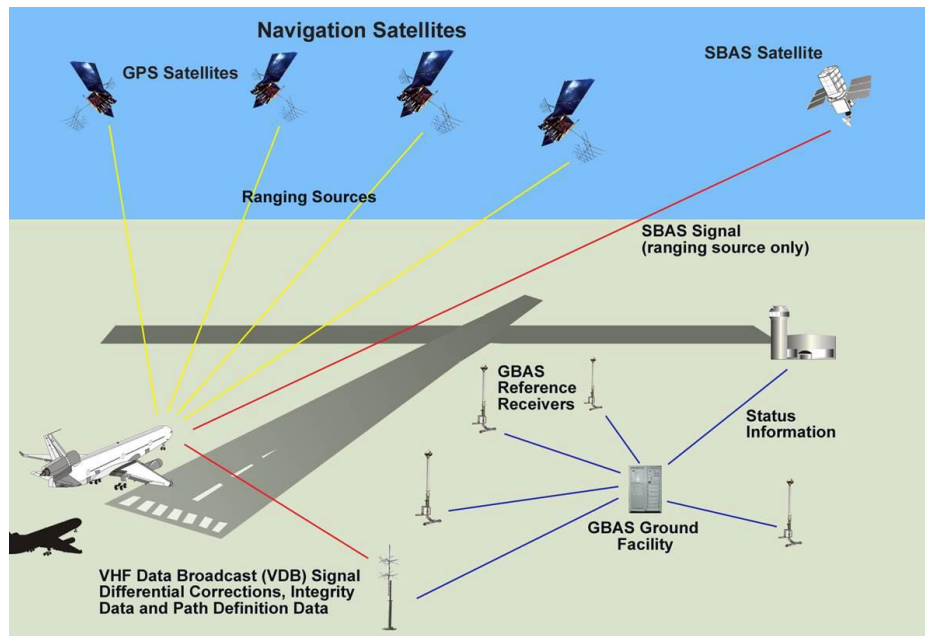


**Slika 4.4.** Način rada ABAS sustava

Izvor: [19]

GBAS služi za upozorenje otkaza i poboljšanje pozicioniranja prijavnika uklanjanjem grešaka. Uklanja greške efemeride, sata, troposfere i ionosfere, no ne uklanja greške šuma prijavnika i prijema odbijenih signala. Radi na principu stanice (psudeolita<sup>4</sup>) poznate pozicije sa GPS-prijavnikom te kompariranja poznate pozicije sa onom očitanoj na GPS. Greške u 3 osi se određuju i šalju zrakoplovu u prilazu. Emitiranje se vrši antenom u blizini aerodroma te prijavnik u zrakoplovu detektira tu stanicu kao satelit smješten na aerodromu (slika 4.5).

<sup>4</sup> Pseudolit (pseudo satelit) je stanica na zemlji koja uspoređuje svoju poznatu poziciju sa pozicijom koju dobiva na GPS prijavniku te šalje korekciju u zrakoplov koji je vidi kao satelit na zemlji. Imaju domet do 20 NM i koriste se za prilaze na aerodromima. Korekcija je bolja što je zrakoplov bliži pseudolitu.

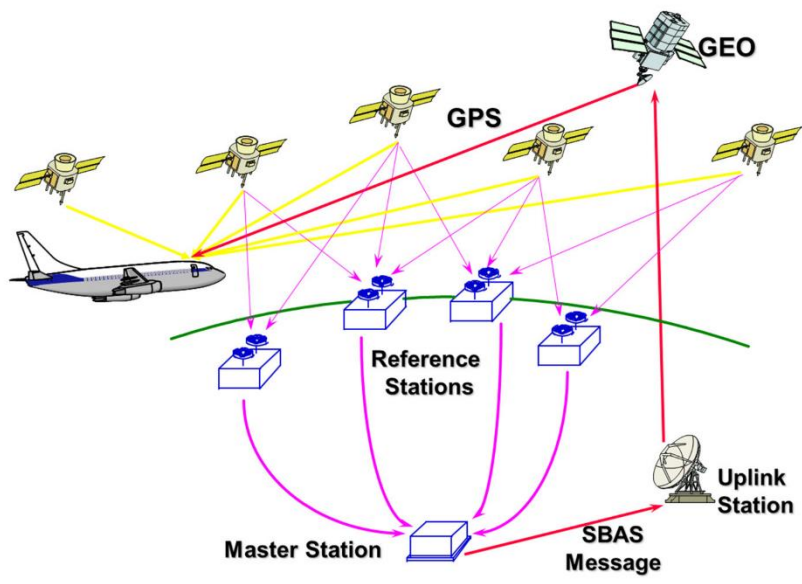


**Slika 4.5.** Način funkcioniranja i dijelovi GBAS sustava, [20].

SBAS pruža poboljšanje pozicioniranja zrakoplovima iznad velikog područja. To su sustavi EGNOS (Europa), WAAS (SAD), MSAS (Japan). Čine ga dva segmenta:

- svemirski segment (engl. *space segment*) – INMARSAT geostacionarni sateliti kod EGNOS-a
- zemaljski segment (engl. *ground segment*) – Referentne stanice koje mjere točnost svih podataka te ionosferske i troposferske utjecaje na propagaciju signala. Imaju točno određene pozicije, opremljene sa atomskim satovima, izračunavaju *Range error* za svaki satelit.

Referentne stanice šalju podatke u regionalne kontrolne stanice, one šalju u glavne kontrolne stanice, pa dalje u stanice za emitiranje koje šalju korekcije u GPS prijarnike. U Europi se GPS ne može koristiti u zrakoplovstvu ako nema prijarnik EGNOS signala te potvrdu koju nalaže agencija za zrakoplovstvo (slika 4.6), [14].



Slika 4.6. Arhitektura SBAS sustava, [21]

## 5. Dolazne procedure

Standardni instrumentalni dolazak (engl. *STandard Arrival Route* ili STAR) je utvrđena IFR dolazna ruta koja povezuje određenu značajnu točku, koja se obično nalazi na utvrđenoj ATS (engl. *Air Traffic Service*) ruti, s točkom od koje može započeti postupak instrumentalnog prilaznja.

STAR rute imaju specifičan način označavanja koji čine osnovni indikator, broj verzije i indikator rute. Osnovni indikator definiran je točkom na ulasku u proceduru. Broj verzije je broj od 1 do 9 koji označava broj valjanosti trenutne rute. Indikator rute je bilo koje slovo osim I i O. Primjer označavanja STAR rute je AMUGO2A. AMUGO je ulazna točka procedure, broj 2 govori da je ovo 2. verzija valjanosti ove rute odnosno da je prije postojala drugačija procedura koja je izmijenjena i A je indikator rute.

Svrha instrumentalnih prilaza na slijetanje je usporiti zrakoplov na potrebnu brzinu i pripremiti ga za slijetanje do točke gdje se vidi staza. Ako se radi o Instrumentalnim meteorološkim uvjetima (engl. *Instrumental Meteorological Conditions* ili IMC), odnosno uvjetima smanjene vidljivosti, tada je cilj dovesti zrakoplov do točke od koje se može započeti sigurno slijetanje ili započeti procedura neuspjelog slijetanja.

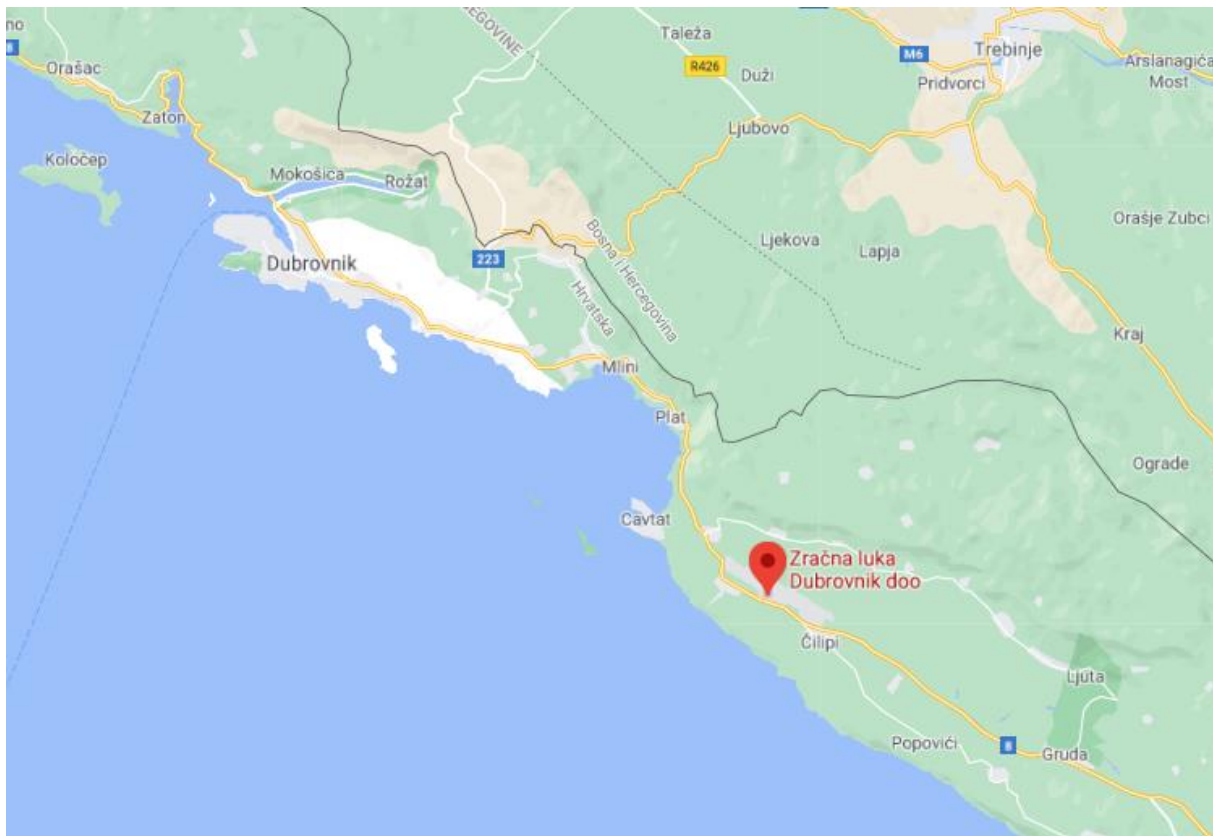
## 6. Zračna luka Dubrovnik

Zračna luka Dubrovnik/Čilipi jedna je od 9 međunarodnih zračnih luka u Hrvatskoj. Prema statistici ACI (engl. *Airports Council International*) iz 2019. godine, Dubrovačka zračna luka je 134. najprometnija zračna luka u Europi, [22] i 3. najprometnija zračna luka u Hrvatskoj sa 2 896 277 putnika i 25 962 operacija (polijetanja i slijetanja). Brojka od 2 896 277 predstavlja porast broja putnika od prilično velikih 14,05 % te je 25 962 operacija također porast od velikih 10,03 % u odnosu na 2018. godinu, što omogućuje vrlo optimistična predviđanja za budućnost što se tiče broja putnika i operacija, [23], [24]. Iako u europskom i svjetskom kontekstu spada u relativno malu zračnu luku, ona ima značajnu ulogu za putnički promet u Hrvatskoj.

Važna je karakteristika dubrovačke zračne luke velika sezonalnost prometa što je slučaj i kod drugih hrvatskih zračnih luka. Koliko je ona velika govori podatak da je u samo tri ljetna mjeseca (lipanj, srpanj, kolovoz) broj putnika veći od 50 % ukupnog broja putnika u 2019. godini. Sličan omjer vrijedi i za broj operacija.

### 6.1. Lokacija i strateška važnost

Zračna luka Dubrovnik smještena je na krajnjem jugu Hrvatske te je tako najjužnija zračna luka (slika 6.1). Nalazi se u općini Konavle u mjestu Čilipi po kojem i nosi ime. Udaljena je 13 km jugoistočno od grada Dubrovnika kojeg opslužuje i ujedno je to najveći grad u blizini. Grad Dubrovnik, kao i njegova okolica, poznata je svjetska turistička destinacija koja privlači mnogobrojne turiste iz cijelog svijeta. Zbog svog povijesnog nasljedstva, prirodne i urbanističke ljepote te ugodne klime, poželjna je turistička destinacija tijekom ljetnih mjeseci, ali i cijele godine. Zbog toga što je Dubrovnik najjužniji grad, povezanost s ostatkom zemlje vrlo je nepovoljna i neadekvatna za bilo kakav kopneni prijevoz zbog vrlo dugog vremena putovanja, posebno tijekom ljetne špice sezone, kada putovanje od npr. Splita koji je udaljen 230 km može trajati i po nekoliko sati. Zbog svega navedenog, zračni prijevoz, a time i zračna luka imaju stratešku važnost za održavanje povezanosti grada Dubrovnika s ostatkom zemlje, ali i gradovima izvan nje tijekom cijele godine. Povezanost zračne luke Dubrovnik s ostatkom zemlje provodi nacionalna kompanija Croatia Airlines, te kompanija Trade Air kroz određene linije u sklopu PSO (engl. *Public Service Obligation*) programa.



**Slika 6.1.** Položaj zračne luke Dubrovnik

## 6.2. Tehničke karakteristike

Zračna luka Dubrovnik nalazi se na nadmorskoj visini od 527 ft<sup>5</sup>. Manevarsku površinu čini stajanka, 8 vozniha staza, te jedna uzletno-sletna staza. Staza je orijentirana u smjeru sjeverozapad-jugoistok, odnosno u smjeru 118,21° i 298,23° što čini oznake smjera staze 11 i 29. Staza je duga 3230 m i široka 45 m. Zračni prostor čini CTR (engl. *Control zone*) Dubrovnik vertikalnih granica od površine zemlje do 4000 ft koji je D klasa zračnog prostora. Od 1000 ft iznad površine zemlje pa do razine leta 205 nalazi se TMA Dubrovnik koji je ispod 7500 ft klasa C, a iznad klasa D. Cijeli navedeni zračni prostor dio je FIR Zagreb. Usluge zračnog prometa koje su na raspolaganju su prilazna kontrola (DUBROVNIK RADAR) i aerodromska kontrola (DUBROVNIK TORANJ), [12].

Kopneni teritorij Republike Hrvatske uz Jadransku obalu počinje se sužavati prema jugu, pa tako krajnji jug ima gotovo oblik vrha. Dubrovačka zračna luka smještena je u tom uskom kopnenom području. Kako se granice kopnenih i zračnih prostora uglavnom podudaraju, tako je zračni prostor u području zračne luke vrlo uzak i ograničenih dimenzija.

<sup>5</sup> ft – engl. feet, stopa. 1 ft – 3,048 m

Uz to, na tom području spajaju se tri zračna prostora: hrvatski zračni prostor (FIR Zagreb), zračni prostor BiH (FIR Sarajevo) i zračni prostor Crne Gore (FIR Beograd). Nedaleko od zračne luke Dubrovnik, prema jugu, nalaze se dvije zračne luke; Tivat i Podgorica. To znači da kroz zračni prostor preko i u blizini dubrovačke zračne luke prolaze prilazne rute za navedene aerodrome, dakle na tom području kontrola zračnog prometa snižava i vektorira zrakoplove za slijetanje na odredišni aerodrom. To može predstavljati značajan sigurnosni problem, pogotovo u ljetnim mjesecima kada je povećan zračni promet, tako što se na malom području pojavljuje veći broj zrakoplova te se povećava i radno opterećenje kontrolora zračnog prometa koji moraju razdvajati i upravljati s povećanim brojem zrakoplova i koordinirati s nekoliko jedinica kontrole zračnog prometa. Još jedna važna informacija je visok planinski teren sjeverno i sjeveroistočno od aerodroma. To može značajno utjecati na sigurnost zrakoplova koji su u dolasku ili odlasku, posebno u uvjetima smanjene vidljivosti.

Zbog svih navedenih karakteristika, aerodrom Dubrovnik je, za razliku od ostalih hrvatskih aerodroma, idealni kandidat za uvođenje PBN naprednih navigacijskih specifikacija, s aplikacijama na dolazne procedure. U dijelu rada koji slijedi biti će predstavljena simulacija ispitnih letova napravljenih prema RNAV-1 specifikaciji na dolaznoj proceduri zračne luke Dubrovnik, u kojoj će biti izneseni podatci izvedivosti objavljenih procedura te njihove karakteristike kao što su potrošnja goriva i vrijeme leta.

## 7. Primjena novog koncepta u završnom kontroliranom području Dubrovnik

Navigacija bazirana na performansama (PBN) okvir je za definiranje zahtjeva performansi za navigacijske specifikacije koje sadrže detaljne zahtjeve za zrakoplove i operatore ili pilote, [25]. Definira skup standardnih funkcionalnih zahtjeva u zraku i na zemlji za navigacijske aplikacije i za navigacijsku infrastrukturu. Novi ICAO PBN koncept zahtijeva jedinstvenu klasifikaciju zračnog prostora. Ova klasifikacija zračnog prostora također se primjenjuje na završna kontrolirana područja i osnovni je preduvjet za implementaciju PBN procedura. Dodatni zahtjev je izrada Nacionalnog plana za implementaciju PBN-a zajedno s konceptom zračnog prostora koji je jasno definiran na strateškoj razini. Nacionalni plan krovni je strateški dokument koji definira kratkoročne, srednjoročne i dugoročne ciljeve za implementaciju odabranih PBN navigacijskih specifikacija. Te će specifikacije udovoljavati operativnim zahtjevima korisnika zračnog prostora i ostalim zahtjevima koji se odnose na zaštitu okoliša te će povećati sigurnost i kapacitet zračnog prostora. Koraci za implementaciju PBN-a definirani su od strane ICAO-a, i treba ih prihvatiti Državna vlast. Kako do 2017. godine smjernice za provedbu PBN-a nisu definirane kroz krovni strateški dokument u Republici Hrvatskoj, Hrvatska kontrola zračne plovidbe primijenila je internu ekspertizu i uobičajenu praksu prema kojoj države članice Eurocontrol-a definiraju koncept zračnog prostora za provedbu PBN-a.

U tekstu koji slijedi biti će predstavljeni rezultati istraživanja buduće STAR procedure u završnom kontroliranom području (TMA) Dubrovnik. Zemaljska procjena instrumentalnih letnih procedura uključivala je nadvisivanje prepreka, proračun putanje, kodiranje i mapiranje. Ispitivanje u simulatoru, kao sljedeći korak u postupku provjere valjanosti procedure prema ICAO PBN priručniku, usmjereno je na kvantitativnu procjenu manevriranja i provjeru valjanosti baze podataka na visokoj razini, [26]. Cilj procjene leta/simulacije bio je procijeniti izvedivost letenja kako bi se utvrdilo može li se procedura sigurno odletjeti te ocijenili i provjerili drugi operativni čimbenici. Dolazne rute utemeljene su na RNAV-1 navigacijskoj specifikaciji za A i B kategorije zrakoplova. U simulatoru leta (FNTP tip II) kao model korišten je zrakoplov King Air 200 za određivanje potrošnje goriva (engl. *fuel burned*) i vremena leta. Procedure su dizajnirane, upisane u računalo za vođenje simulatora i izveden je niz testnih letova. Cilj istraživanja bio je prikazati mogućnost manevriranja zrakoplovom unutar ovojnice leta prema predloženim scenarijima. Scenariji su definirani prema predviđenoj prometnoj situaciji.

### 7.1. Analiza zračnog prostora



U konvencionalnoj navigaciji, taktičko vektoriranje koje uključuje upute za pravac leta (engl. *heading*) uobičajena je metoda koja se koristi za spajanje i upravljanje dolaznih prometnih tokova. Štoviše, standardni instrumentalni postupci (STAR-ovi) zasnovani na konvencionalnim postupcima mogli bi se koristiti za upravljanje prometom gdje bi zrakoplovi trebali slijediti rutu koja je opisana zemaljskim navigacijskim sredstvom, [27]. PBN koncept iskorištava poboljšane navigacijske mogućnosti avionike zrakoplova i predstavlja pomak od konvencionalne navigacije sa satelitskim navigacijskim sustavom (GNSS) kao primarnim sensorom. Za dolaske, smanjuje vektoriranje zrakoplova u završnom području do završnog prilaznja i od staze do granice terminalnog zračnog prostora (TMA) za odlaske. Uz to, rezultati analize glasovnih podataka pokazuju smanjenje količine dvosmjerne komunikacije i do 40 % i smanjenje količine potrebnih informacija do 50 %, [28]. Plan provedbe PBN-a uključuje definiciju odgovarajućih navigacijskih specifikacija prema konceptu zračnog prostora. Stoga je provedena analiza zračnog prostora TMA Dubrovnik. Analiza se temeljila na usporedbi stvarnog i planiranog prometa. Analizirane su mogućnosti zrakoplova i oprema za komunikaciju, navigaciju i nadzor (engl. *Communication Navigation Surveillance* ili CNS) i povezane s dostupnim CNS funkcionalnostima pružatelja usluga zračne plovidbe (engl. *Air navigation service provider* ili ANSP). Analiza je pokazala da postoji prostor za poboljšanje razine usluge nadogradnjom novih i optimizacijom postojećih operativnih postupaka. To bi poboljšalo sigurnost i stvorilo preduvjete za povećanje kapaciteta zračnog prostora i ukupne učinkovitosti leta. Uz to, postupak je izrađen u skladu s ICAO PBN priručnikom Dubrovnik TMA. Također je definirana uporaba standardnog instrumentalnog odlaska (engl. *Standard Instrument Departure route* ili SID) i standardnog instrumentalnog dolaska (STAR), prema RNAV-1 navigacijskoj specifikaciji. Neadekvatno pokrivanje signala zemaljske opreme za mjerenje udaljenosti (DME) unutar TMA onemogućava integraciju DME/DME procedure koja bi se mogla koristiti kao pričuva u slučaju gubitka GNSS signala. GNSS je primarni sensor za naznačenu RNAV-1 navigacijsku specifikaciju. Stoga je potrebno definirati operativne procedure i instrumentalne letne procedure tako da zrakoplov kao sekundarnu proceduru može slijediti konvencionalne i dostupne SID/STAR procedure kako bi se omogućilo sigurno izvršavanje svih operacija tijekom cijelog leta. Stručnom analizom utvrđeno je da postojeći operativni postupci, povezani s koordinacijom s drugim završnim područjima, ne utječu štetno na sigurnost, kapacitet i učinkovitost letenja. Suprotno tome, provedba PBN-a i sporazumi o koordinaciji s drugim pružateljima usluga imaju velik potencijal za daljnje poboljšanje.

Trend rasta zračnog prometa u svim zračnim lukama u Republici Hrvatskoj kontinuirano se povećava. Predviđa se da bi mogao doseći i do 5% godišnje. Učinkovito planiranje letačkih operacija ograničeno je postojećim instrumentalni letnim procedurama koje se temelje na konvencionalnim zemaljskim radio-navigacijskim sredstvima (VOR, NDB). Dugoročno, to bi moglo uzrokovati operativne probleme u TMA jer su trenutno korištene

konvencionalne procedure posebno dizajnirane za neinstrumentalne staze i nisu fleksibilne za prilagodbu za buduće prometne situacije.

## 7.2. Promjena koncepta rada

Implementacija koncepta PBN u TMA uključuje dizajniranje, objavu i operativno korištenje potpuno novog organizacijskog koncepta zračnog prostora. To se prije svega odnosi na navigacijske rute PBN SID/STAR. Nadalje, ove rute moraju biti operativno povezane s prilaznim procedurama koje se također temelje na PBN (RNP APCH) konceptu za sve instrumentalne staze. To se odnosi i na one staze koje nisu tehnički opremljene sustavom za precizno prilaženje. Rezultati simulacije u naprednim tehnologijama upravljanja dolaskom ukazuju na postignute prednosti omogućavanjem PBN-a. Poboljšana je predvidljivost putanje leta, promet u dolasku snižava dulje vremena štedeći gorivo, a prema izjavi kontrolora njihovo je radno opterećenje smanjeno, [29]. Promjena koncepta operacija odnosi se na optimizaciju prometnih tokova, povećavajući tako predvidljivost letnih operacija. Predvidljivost smanjuje radno opterećenje kontrolora zračnog prometa i operativne troškove zrakoplovnih tvrtki, uz manje emisija ispušnih plinova u atmosferu. Da bi se postigla optimizacija, potrebno je kreirati, objaviti i operativno koristiti PBN koncept koji će povezati SID/STAR navigacijske rute i instrumentalne prilazne procedure. Stoga je potrebno osmisliti i objaviti RNP APCH procedure koje će također omogućiti vertikalno vođenje.

Pokazano je da bi povećanje maksimalno dopuštenog kuta putanje leta moglo rezultirati značajnom uštedom goriva, [30]. Važan element koji proizlazi iz opsega povećanja operativnih kapaciteta u zračnom prostoru je kreiranje, objavljivanje i operativna uporaba prilaženja s neprekinutim snižavanjem visine, operacija neprekinutog snižavanja visine, operacija kontinuiranog uspona zrakoplova (engl. *Continuous Descent Approach/Continuous Descent Operations/Continuous Climb Operations* ili CDA/CDO/CCO) za sve zračne luke/staze u TMA. Operativna upotreba ovih postupaka ne može se provesti bez provedbe PBN koncepta, iako se oni u određenoj mjeri operativno primjenjuju na taktičkoj razini. Primjenom PBN-a procedure dolaska i odlaska dizajnirale bi se tako da su zrakoplovi horizontalno i vertikalno razdvojeni. To, sa smanjenjem potrošnje goriva i ispušnih plinova, pozitivno utječe na radno opterećenje kontrolora zračnog prometa.

## 7.3. Metodologija

Utjecaj uvođenja PBN instrumentalnih navigacijskih procedura na tok zračnog prometa u TMA mora se ispitati na cijelom hrvatskom području letnih informacija (FIR) (ubrzane simulacije i simulacije u stvarnom vremenu). Također je potrebno utvrditi učinke PBN koncepta na postojeće procedure fleksibilne upotrebe zračnog prostora (engl. *Flexible Use of Airspace* ili FUA) prema kojima bi se svi sigurnosni preduvjeti trebali uzeti u obzir i održavati barem na istoj razini kao prije primjene PBN-a.

Svrha ovog istraživanja bila je dokazati da bi sadašnji zrakoplovi mogli sigurno slijediti predloženu RNAV-1 dolaznu proceduru u TMA Dubrovnik u različitim scenarijima koji mogu ovisiti o stvarnoj prometnoj situaciji. Uz to, razmotrena je mogućnost postizanja nesmetanog prijelaza s dolazne procedure na proceduru konvencionalnog prilaza (engl. *Instrumental Landing System* ili ILS). Na temelju toga razrađeni su scenariji koji su definirali putanju leta zrakoplova prema definiranim putnim točkama u RNAV-1 STAR proceduri za stazu 11 zračne luke Dubrovnik (ICAO kod LDDU) (tablica 3).

**Tablica 3.** Razni scenariji temeljeni na prometu za PBN RNAV-1 dolaznu proceduru za stazu 11 zračne luke Dubrovnik

| Scenarij | Putanja zrakoplova prema putnim točkama                                                                            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b> | TIKSA – NERRA – DU601 – (IAF) PILAP – DU402 – DU400 – RWY11 (slijetanje)                                           |
| <b>B</b> | TIKSA – NERRA – DU610 – DU607 – DU606 – ERASO – DU402 – DU400 – RWY11 (slijetanje)                                 |
| <b>C</b> | TIKSA – NERRA – DU610 – DU607 – DU606 – ERASO – DU605 – DU604 – DU601 – PILAP – DU402 – DU400 – RWY11 (slijetanje) |
| <b>D</b> | TIKSA – NERRA – DU610 – DU607 – DU606 – ERASO – DU605 – PILAP – DU402 – DU400 – RWY11 (slijetanje)                 |
| <b>E</b> | TIKSA – NERRA – DU610 – DU604 – DU601 – PILAP – DU402 – DU400 – RWY11 (slijetanje)                                 |

Navigacijska procedura i odgovarajući scenariji prikazani u tablici 3 temelje se na testu RNAV-1 STAR za RWY 11 LDDU koji je predložila Hrvatska kontrola zračne plovidbe, [31]. Uz to, dizajn predložene ispitne procedure zasnovan je na stvarnim putanjama leta na temelju konvencionalnih STAR-ova u TMA Dubrovnik.

Što se tiče utvrđivanja učinkovitosti leta omogućenog konceptom PBN-a, potrošnja goriva za zrakoplov određena je u specifičnom režimu leta pri ISA (engl. *International Standard Atmosphere*) uvjetima. Osnova za izračun bio je zrakoplov King Air 200 s 5620 kg operative mase. Brzina leta iznosila je 170 kt (pri 1700 o/min), pa je smanjena na 140 kt tijekom prilazne faze leta. Navigacijska procedura RNAV-1 upisana je u GPS plan leta Garmin 430. Svaki plan leta izveden je prema unaprijed definiranom scenariju i simulator je programiran da slijedi definiranu putanju leta. Tijekom ispitnih letova zabilježeno je vrijeme

preleta određenih putnih točaka i stanje goriva. Dakle, ukupno vrijeme leta u svakom scenariju i ukupna potrošnja goriva zrakoplova određeni su od početka dolazne procedure do slijetanja.

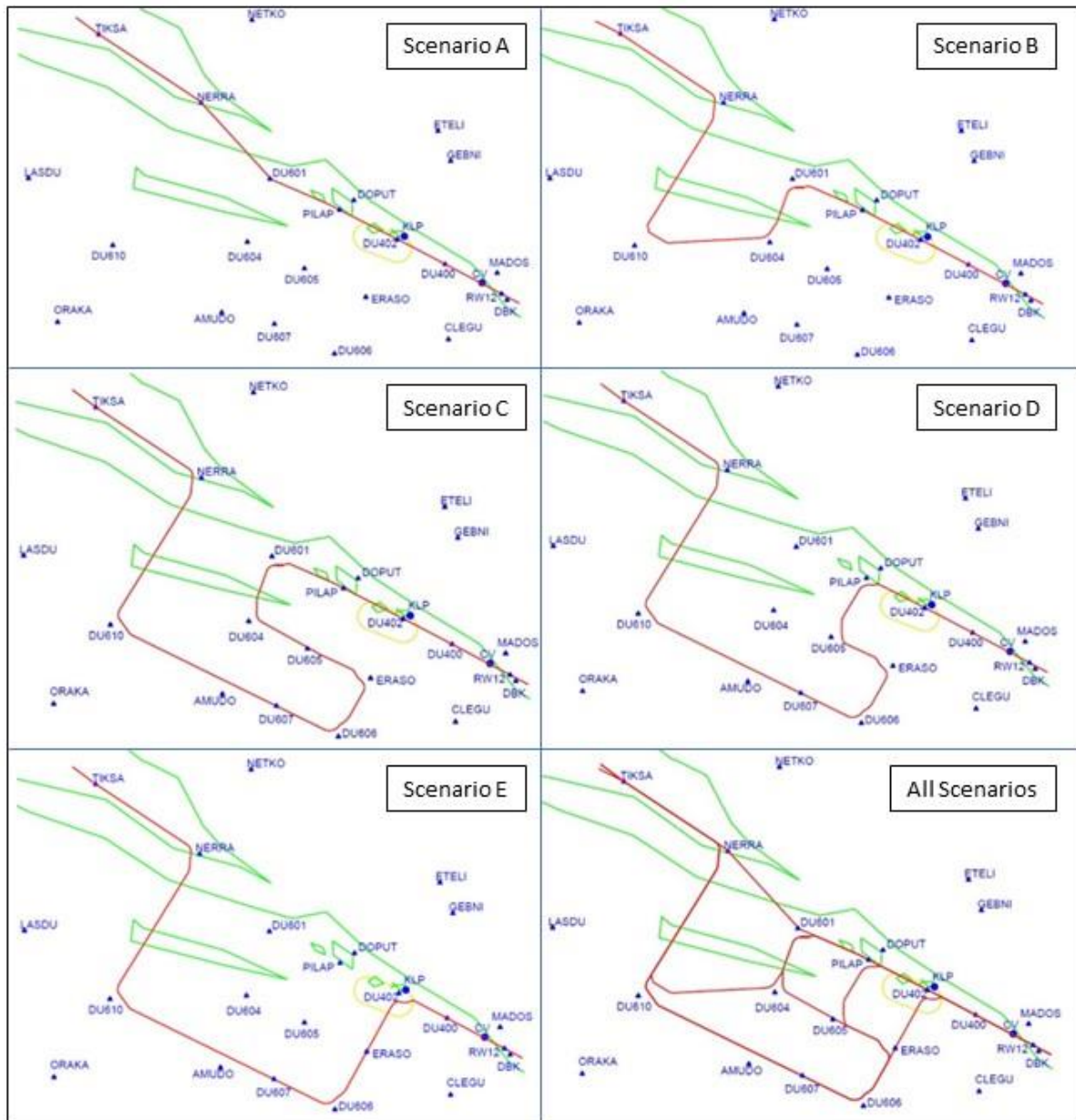
#### 7.4. Rezultati

Svi scenariji dolaska temeljili su se na istim postavkama snage s istom količinom goriva na preletištu početnog prilaženja (engl. *Initial Approach Fix* ili IAF). IAF je bio polazna točka za dolaznu proceduru. Vrijeme leta i potrošnja goriva praćeni su od točke TIKSA na početnoj visini od 5000 ft. Faza snižavanja i faza prilaženja započela je na točki PILAP, s preporučenom brzinom promjene visine od 700 ft u minuti. Na udaljenosti od 3 NM od praga staze 11, brzina je smanjena na 130 kt i spušten je stajni trap. Tablica 4 prikazuje vremena leta i potrošeno gorivo za svaki pojedinačni scenarij.

**Tablica 4.** Vrijeme leta i potrošeno gorivo za različite scenarije u TMA Dubrovnik

| Scenarij | Ukupna duljina leta [NM] | Vrijeme leta [min] | Potrošeno gorivo [kg] |
|----------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>A</b> | 49,6                     | 17,31              | 72,9                  |
| <b>B</b> | 81,7                     | 26,19              | 114,3                 |
| <b>C</b> | 109,7                    | 35,1               | 162,5                 |
| <b>D</b> | 95,7                     | 30,5               | 147                   |
| <b>E</b> | 76,7                     | 24,54              | 113,4                 |

Putanje leta zrakoplova zabilježene su u simuliranom okruženju prema pojedinačnim scenarijima koji opisuju sve moguće prometne situacije u TMA Dubrovnik (slika 7.1).



**Slika 7.1.** Putanje zrakoplova u različitim scenarijima u TMA Dubrovnik

Podaci iz tablice 4 i putanje sa slike 7.1 mogu se koristiti za operativno planiranje u smislu dodatnog potrebnog goriva ako je jedan od mogućih prikazanih scenarija na snazi u TMA. Dakle, podatci bi mogli biti korisni u definiranju operativnih procedura kontrolora u razdvajanju prometa. Uz to, radno opterećenje kontrolora može se testirati i usporediti na tim scenarijima i mogućim usmjeravanjima.

## 8. Zaključak

U ovom su radu prikazani rezultati ispitivanja izvedivosti instrumentalnih dolaznih letnih procedura, temeljenih na navigacijskoj specifikaciji RNAV-1, u TMA Dubrovnik. Pokazano je da zrakoplov može slijediti navigacijsku proceduru za zrakoplove kategorije A i B temeljenu na konceptu PBN-a (RNAV-1). Putne točke temeljene na GNSS-u, a ne na uobičajenim radio-navigacijskim sredstvima, prikladne su za definiranje putanje leta zrakoplova u terminalnom području i mogu se koristiti za izradu plana leta u navigacijskom sustavu zrakoplova. S operativnog gledišta moguća su neka odstupanja od definirane dolazne procedure. Ta su odstupanja rezultat specifičnih prometnih situacija koje su u radu predstavljene kao pet različitih scenarija. U svakom od ovih scenarija, zrakoplov koji slijedi putanju leta definiranu putnim točkama može izvoditi sigurne zaokrete sa određenim radijusom u kombinaciji s promjenom visine. Prema definiranoj stalnoj brzini leta, postignuta je sigurna upravljivost unutar sigurnosne ovojnice leta. Prijelaz dolazne procedure u prilaznu proceduru u svih pet scenarija ostvaren je bez poteškoća i utjecaja na sigurnost leta. Može se zaključiti da dizajn procedure i cjelokupni koncept odgovaraju PBN kriterijima i primjeni te su pogodni za daljnji razvoj.

Rezultati dobiveni istraživanjem mogu se koristiti za procjenu primjene svakog scenarija na određeni zrakoplov u smislu trajanja leta koje izravno odgovara kapacitetu zračnog prostora TMA. Uz to, razlika u potrošenom gorivu prema svakom scenariju pokazatelj je zrakoplovnoj kompaniji za predviđanje potrebnog goriva za let, što se, između ostalog, izračunava prema operativnim ograničenjima koja postavlja ATM. Korištenje ovih procedura demonstrirano je u simuliranom okruženju. Uspostavljena metodologija može se koristiti za daljnji razvoj i moguća poboljšanja operativnog koncepta terminalnom području. Daljnje ispitivanje koncepta PBN operacija treba provesti prije implementacije odobrenih PBN procedura.

## Literatura

- [1] Novak, D.: Zrakoplovna prostorna navigacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015
- [2] ICAO AFI/MID ASBU Implementation Workshop, PBN Implementation from Industry perspective RNAV, RNP & RNP AR, Cairo, 2015. Preuzeto sa: <https://www.icao.int/MID/Documents/2015/AFI-MID%20ASBU%20Impl.%20Workshop/2.1-3%20AIRBUS%20PBN%20Impl.%20from%20Industry%20perspective.pdf> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [3] Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP), EUROCONTROL, Jan 2013. Preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/4082.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2020.]
- [4] Wikimedia Commons. Preuzeto sa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pbn.png> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [5] Radio navigation, JAA ATPL Training, Jeppesen – Atlantic Flight Training Ltd., Neu-Isenburg, Germany 2004.
- [6] Radio navigation, JAA ATPL, 1st Edition Oxford Aviation Service Ltd., Jeppesen GmbH, Frankfurt, 2001.
- [7] Performance-Based Navigation Manual, ICAO Doc 9613, Advance fourth edition (unedited) Preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2991.pdf> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [8] Skybrary. Preuzeto sa: [https://aviationsafetywiki.org/images/thumb/a/a3/Flyby\\_flyover.png/500px-Flyby\\_flyover.png](https://aviationsafetywiki.org/images/thumb/a/a3/Flyby_flyover.png/500px-Flyby_flyover.png) [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [9] Sabo, J., Korba, P., Antoško, M. New Trends of Using GNSS In the Area Navigation. Technical University of Košice, 2014.
- [10] IVAO. Preuzeto sa: [https://mediawiki.ivaoo.aero/index.php?title=VHF\\_Omnidirectional\\_Range\\_-\\_VOR\\_\(Instrument\)](https://mediawiki.ivaoo.aero/index.php?title=VHF_Omnidirectional_Range_-_VOR_(Instrument)) [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [11] IVAO. Preuzeto sa: [https://mediawiki.ivaoo.aero/index.php?title=File:DME\\_DME\\_distance.png](https://mediawiki.ivaoo.aero/index.php?title=File:DME_DME_distance.png) [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [12] Crocontrol. Preuzeto sa: <https://www.crocontrol.hr/UserDocsImages/AIS%20produkti/eAIP/2020-08-13-AIRAC/html/index-en-HR.html> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [13] From up there. Preuzeto sa: <http://fromupthere.blogspot.com/2012/12/> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [14] Materijali s predavanja, osobne bilješke
- [15] ESRI. Preuzeto sa: <https://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [16] InertialSense. Preuzeto sa: [https://docs.inertialsense.com/user-manual/reference/coordinate\\_frames/](https://docs.inertialsense.com/user-manual/reference/coordinate_frames/) [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]



- [17] GEOSPATIAL WORLD. Preuzeto sa: <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-are-the-various-gnss-systems/> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [18] Avionics west. Preuzeto sa: <http://www.avionicswest.com/Articles/howGPSworks.html> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [19] NAVSTAR Global Positioning System (GPS), User Equipment, NOVELLA, On Dod User Equipement, 1996.
- [20] Guide for ground based augmentation system implementation, ICAO, 2013.
- [21] MDPI. Preuzeto sa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3047/htm> [Pristupljeno: kolovoz, 2020.]
- [22] Dubrovnik Times. Preuzeto sa: <https://www.thedubrovniktimes.com/news/dubrovnik/item/7193-dubrovnik-airport-ranks-in-the-top-200-busiest-airports-in-europe> [Pristupljeno: rujan 2020.]
- [23] Wikipedia. Preuzeto sa: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_the\\_busiest\\_airports\\_in\\_Croatia](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_the_busiest_airports_in_Croatia) [Pristupljeno: rujan 2020.]
- [24] Dubrovnik Airport. Preuzeto sa: <https://www.airport-dubrovnik.hr/poslovni/statistika-s36> [Pristupljeno rujan 2020.]
- [25] Muller D, Uday P. Evaluation of the Potential Environmental Benefits of RNAV/RNP Arrival Procedures. 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference; 2011 Sep 20-22; Virginia Beach, USA. doi: 10.2514/6.2011-6932
- [26] ICAO. Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual, fourth edition. Montreal
- [27] Meric O. Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency. Journal of Power and Energy Engineering. 2015 3:449-452. doi. 10.4236/jpee.2015.34061.
- [28] Smith EC. Impact of RNAV Terminal Procedures on Controller Workload. Digital Avionics System Conference (DASC); 2005 Oct 30 Nov 3; Washington DC, USA. doi: 10.1109/DASC.2005.1563382.
- [29] Thipphavong J, et al. Evaluation of the Terminal Sequencing and Spacing system for Performance-Based Navigation arrivals. Digital Avionics System Conference (DASC); 2013 Oct 5-10; East Syracuse, USA. doi: 10.1109/DASC.2013.6712503.
- [30] Andreeva-Mori A, Suzuki S, Itoh E. Scheduling of Arrival Aircraft Based on Minimum Fuel Burn Descents. ASEAN Engineering Journal. 2011 1(1):21-34.
- [31] ICAO. 2006. Doc 8168 Procedures for Air Navigation Services Aircraft Operations. Volume II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures. Montreal.



## POPIS KRATICA

|         |                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABAS    | (Aircraft Based Augmentation System) Zrakoplovni sustav dopune                                    |
| ANSP    | (Air navigation service provider) Pružatelj usluga zračne plovidbe                                |
| APV     | (Approach Procedures with Vertical guidance) Postupci prilaženja s vođenjem u vertikalnoj ravnini |
| ATS     | (Air Traffic Services) Usluge u zračnom prometu                                                   |
| BPSK    | (Binary Phase Shift Keying) Binarna bifazna modulacija                                            |
| B-RNAV  | (Basic RNAV) Osnovna navigacijska specifikacija prostorne navigacije                              |
| C/A     | (Course/Acquisition code) Kod za pozicioniranje standardnom razinom točnosti                      |
| CCO     | (Continous Climb Operations) Operacija kontinuiranog uspona zrakoplova                            |
| CDA     | (Continous Descent Approach) Prilaženje s neprekinutim snižavanjem visine                         |
| CDO     | (Continuous Descent Operations) Operacija neprekinutog snižavanja visine                          |
| CNS     | (Communication Navigation Surveillance) Usluge komunikacija, navigacije i nadzora                 |
| CTR     | (Control zone) Kontrolirana zona                                                                  |
| DME     | (Distance Measuring Equipment) Oprema za mjerenje udaljenosti                                     |
| ECAC    | (European Civil Aviation Conference) Europska konferencija civilnog zrakoplovstva                 |
| ECEF    | (Earth Centered Earth Fixed) Ortogonalni koordinatni sustav                                       |
| EGNOS   | (European Geostationary Navigation Overlay Service) Satelitski sustav dopune u Europi             |
| EU      | (European Union) Europska unija                                                                   |
| FIR     | (Flight Information Region) Područje letnih informacija                                           |
| FUA     | (Flexible Use of Airspace) Fleksibilna upotreba zračnog prostora                                  |
| GBAS    | (Ground Based Augmentation System) Zemaljski sustav dopune                                        |
| GDOP    | (Geometric Dilution Of Precision) Geometrijska mjera preciznosti                                  |
| GEO     | (Geostacionary Orbit) Geostacionarni satelit                                                      |
| GLONASS | (GLobal Orbiting NAVigation Satellite System) Satelitski navigacijski sustav Ruske federacije     |
| GLS     | (GNSS Landing System) Sustav za precizno prilaženje prema GNSS-u.                                 |
| GNSS    | (Global Navigation Satellite System) Satelitski navigacijski sustav                               |
| GPS     | (Global Positioning System) Satelitski navigacijski sustav SAD-a                                  |
| IAF     | (Initial Approach Fix) Preletište početnog prilaženja                                             |
| ICAO    | (International Civil Aviation Organization) Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva       |
| IFR     | (Instrumental Flight Rules) Pravila instrumentalnog letenja                                       |
| ILS     | (Instrumental Landing System) Sustav za precizno prilaženje prema instrumentima                   |

|          |                                                                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IMC      | (Instrumental Meteorological Conditions) Instrumentalni meteorološki uvjeti                                                   |
| INS/IRU  | (Inertial Navigation System ili Inertial Reference Unit) Inercijski navigacijski sustav                                       |
| ISA      | (International Standard Atmosphere) Međunarodna standardna atmosfera                                                          |
| MCS      | (Master Control Station) Glavna upravljačka postaja GPS-a                                                                     |
| MEO      | (Medium Earth Orbit) Satelit u srednje visokoj orbiti Zemlje                                                                  |
| MLS      | (Microwave Landing System) Mikrovalni sustav za precizno prilaženje                                                           |
| MS       | (Monitoring Station) Postaja za praćenje GPS-a                                                                                |
| MSAS     | (Multi-functional transport Satellite Augmentation System) Satelitski sustav dopune u Japanu                                  |
| NDB      | (Non-Directional Beacon) Neusmjereni radiofar                                                                                 |
| OBPMA    | (On-Board self contained Performance Monitoring and Alerting system) Samostalni sustava zrakoplova za upravljanje navigacijom |
| P        | (Precise code) Kod za pozicioniranje većom razinom točnosti                                                                   |
| PBN      | (Performance Based Navigation) Koncept navigacije bazirane na performansama                                                   |
| PPS      | (Precision Position Service) Precizna usluga pozicioniranja                                                                   |
| PRN      | (Pseudo Random Noise) Pseudoslučajni oblik koda                                                                               |
| P-RNAV   | (Precision RNAV) Precizna navigacijska specifikacija prostorne navigacije                                                     |
| RAIM/FDE | (Receiver Autonomus Integrity Monitoring/Fault Detection and Exclusion) Računalni algoritam zrakoplovnog sustava dopune       |
| RNAV     | (Area Navigation) Prostorna navigacija                                                                                        |
| RNP      | (Required Navigation Performance) Navigacijske specifikacije PBN koncepta                                                     |
| RTA      | (Required Time of Arrival) Planirano vrijeme dolaska na određenu točku rute u 4D navigaciji                                   |
| SBAS     | (Satellite Based Augmentation System) Satelitski sustav dopune                                                                |
| SID      | (Standard Instrument Departure route) Standardni instrumentalni odlazak                                                       |
| SPS      | (Standard Position Service) Standardna usluga pozicioniranja                                                                  |
| STAR     | (STandard Arrival Route) Standardni instrumentalni dolazak                                                                    |
| TMA      | (Terminal Manoeuvring Area) Završno kontrolirano područje                                                                     |
| VFR      | (Visual Flight Rules) Pravila vizualnog letenja                                                                               |
| VMC      | (Visual Meteorological Conditions) Vizualni meteorološki uvjeti                                                               |
| VOR      | (VHF Omnidirectional Radio Range) Visokofrekvencijski (VHF) svesmjerni radiofar                                               |
| WAAS     | (Wide Area Augmentation System) Satelitski sustav dopune u SAD-u                                                              |
| WGS84    | (World Geodetic System 1984.) Elipsoid koji se koristi u GNSS sustavima                                                       |
| WPT      | (Waypoint) Putna točka                                                                                                        |