Simulacija rute leta zrakoplova sustavom prostorne navigacije

Jurkovac, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:119:135839

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Karlo Jurkovac

SIMULACIJA RUTE LETA ZRAKOPLOVA SUSTAVOM PROSTORNE NAVIGACIJE

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

SIMULACIJA RUTE LETA ZRAKOPLOVA SUSTAVOM PROSTORNE NAVIGACIJE

EN-ROUTE FLIGHT SIMULATION USING AREA NAVIGATION SYSTEM

Mentor: izv. prof. dr. sc. Doris Novak

Student: Karlo Jurkovac

JMBAG:0135236682

Zagreb, srpanj 2017.

SAŽETAK

Prostorna navigacija je metoda zrakoplovne navigacije koja zrakoplovima omogućuje letove bilo kojim izabranim rutama, koje se nalaze unutar područja pokrivanja zemaljskih radionavigacijskih sredstava ili unutar ograničenja mogućnosti autonomnih navigacijskih sustava zrakoplova. U skolpu rada, objašnjen je princip rada sustava prostorne navigacije zajedno sa sustavima koji se pritom koriste za ostvarivanje prostorne navigacije. Njihove mogućnosti i primjenjivost istih na cjelokupni zračni promet su također obrađeni. Kako bi se dobio uvid u vođenje leta suvremenim sustavom prostorne navigacije, izvedena je simulacija leta u satelitskom navigacijskom sustavu Garmin 1000. Prije izvođenja same simulacije, odrađena je klasična navigacijska priprema kako bi se mogla izvršiti usporedba i utvrđivanje odstupanja u planiranju leta klasičnom navigacijskom metodom i suvremenim navigacijskim sustavom Garmin 1000.

Ključne riječi: prostorna navigacija; sustavi prostorne navigacije; navigacijska priprema leta; simulacija leta

SUMMARY

Area navigation is a method of navigation that permits aircraft operation on any desired course within the coverage of station-referenced navigation signals or within the limits of a self contained system capability. Within this study, the working principles of area navigation based system are explained alongside with systems which are used for enabling area navigation. The capabilities and applicabilities of those system on entire air traffic are also explained. Flight simulation is carried out in satellite based navigation system Garmin 1000 for getting insight in flight management using modern state of the art area navigation systems. Before carrying out the flight simulation, classic navigation preparation has been done for the purpose of comparing and determining deviations between pre-flight planning using modern navigation system Garmin 1000 and classic pre-flight navigation preparation.

KEY WORD: area navigation; area navigation systems; pre-flight navigation preparation; flight simulation

SADRŽAJ

1.UVOD 1

2. SUSTAVI I MOGUĆNOSTI PROSTORNE NAVIGACIJE 3

2.1. OPĆENITO O PROSTORNOJ NAVIGACIJI 3

2.2. NAVIGACIJA BAZIRANA NA PERFORMANSAMA 4

2.3. NAVIGACIJSKE SPECIFIKACIJE 6

2.3.1. NAVIGACIJSKI FUNKCIONALNI ZAHTJEV 6

2.3.2. OZNAKE RNP I RNAV SPECIFIKACIJA 7

2.4. RNAV SUSTAVI NA ZRAKOPLOVU 8

2.5. MOGUĆNOSTI RNAV I RNP SUSTAVA NA ZRAKOPLOVU 10

2.5.1. OSNOVNE MOGUĆNOSTI RNAV SUSTAVA 10

2.5.2. OSNOVNE MOGUĆNOSTI RNP SUSTAVA 11

2.5.3. SPECIFIČNE MOGUĆNOSTI RNAV I RNP SUSTAVA 12

2.5.3.1. ZAKRIVLJENE PUTANJE LETA S KONSTANTNIM POLUMJEROM ZAKRIVLJENOSTI 12

2.5.3.2. ZAOKRETI S PRELETOM KRAJ PRELETIŠTA (eng. Fly-By Turns) 14

2.5.3.3. KRUG ČEKANJA ZRAKOPLOVA (eng. Holding Pattern) 15

2.5.3.4. PARALELNA IZMAKNUTA PUTANJA LETA (eng. Offset Flight Path) 16

3. NAVIGACIJSKI PLAN I PROFIL LETA 17

3.1. ODABIR RUTE I VISINA 17

3.2. METEOROLOŠKA SITUACIJA 20

3.3. PRORAČUN NAVIGACIJSKIH ELEMENATA 23

3.3.1. IZRAČUN KURSEVA I UDALJENOSTI 23

3.3.2. STVARNA BRZINA ZRAKOPLOVA 24

3.3.3. PRORAČUN UTJECAJA VJETRA 25

3.3.3.1. KUT ZANOŠENJA I KUT ISPRAVKE 26

3.3.3.2. PUTNA BRZINA ZRAKOPLOVA 28
3.3.4. PRORAČUN KUTA ISPRAVKE, KUTA ZANOŠENJA I PUTNE BRZINE ZA SIMULIRANU RUTU 29
3.3.5. PRORAČUN VREMENA, GORIVA I PRIJEĐENE UDALJENOSTI TIJEKOM PENJANJA 31
3.3.6. PRORAČUN SEKTORSKIH VREMENA I GORIVA POTROŠENOG NA RUTNIM SEGMENTIMA 34
3.4. UKUPNO POTREBNO GORIVO ZA LET 36
3.5. POPUNJAVANJE NAVIGACIJSKOG PLANA 38
4. SIMULACIJA LETA U SUSTAVU PROSTORNE NAVIGACIJE 41
4.1. GARMIN G1000 41
4.1.1. PRIMARNI LETNI PRIKAZNIK 43
4.1.2. VIŠENAMJENSKI PRIKAZNIK 45
4.1.3. IZVOR NAVIGACIJSKIH PODATAKA 46
4.1.4. TOČNOST GPS POZICIONIRANJA 47
4.2. PRIPREMA SIMULACIJE LETA 49
4.3. SIMULACIJA LETA 54
4.4. ANALIZA PODATAKA DOBIVENIH PUTEM SIMULACIJE LETA 60
5. ZAKLJUČAK 63
LITERATURA 64
POPIS SLIKA 65
POPIS TABLICA 66

1.UVOD

Kontinuiranim rastom zračnog prometa, javlja se potreba za sve većim kapacitetom zračnog prostora. Kako povećanje dimenzija samih zračnih prostora nije moguće, do povećanja kapaciteta se dolazi racionalnijim iskorištenjem postojećeg zračnog prostora. U instrumentalnoj navigaciji, prilikom primjene metoda radionavigacije, zrakoplov treba preletjeti iznad definiranog radionavigacijskog sredstva kako bi posada mogla pozitivno identificirati to sredstvo. Pozitivnom identifikacijom preleta sredstva koje se nalazi na zemlji, završava jedan segment rute ili procedure i započinje sljedeći. Takav način navigacije i kontrole zrakoplova, u prostoru u odnosu na zemaljske radionavigacijske postaje, rezultira povećanom duljinom ruta iz razloga što radionavigacijske postaje nije moguće optimalno rasporediti površinom zemlje zbog raznih prepreka ili ih uopće nije moguće rasporediti iznad mora i oceana. Radionavigacijska sredstva smještena na zemlji također imaju kutnu pogrešku koja se s udaljenošću od sredstva sve više povećava, što za posljedicu ima veća zaštitna područja oko samih zona i procedura. Rješenje ovom problemu je pronađeno upotrebom prostorne navigacije (engl. Area Navigation ili RNAV). Prostorna navigacija je metoda zrakoplovne navigacije, koja zrakoplovima omogućuje letove bilo kojim izabranim rutama koje se nalaze unutar područja pokrivanja zemaljskih radionavigacijskih sredstava ili unutar ograničenja mogućnosti autonomnih navigacijskih sustava zrakoplova ili u međusobnoj kombinaciji. Sustavi prostorne navigacije omogućuju vođenje zrakoplova s definiranom razinom točnosti, bez potrebe za preletom iznad radionavigacijskih sredstava, te iz tog razloga nestaje potreba za propisanim radionavigacijskim rutama ili zračnim putevima. Primjena prostorne navigacije omogućuje kreiranje i upotrebu određenih točaka u prostoru koje se definiraju nazivom i geografskim koordinatama, što omogućuje bolje iskorištenje zračnog prostora u smislu fleksibilnosti ruta i ekonomičnosti leta [1]. Svrha završnog rada je prikazati i izraditi navigacijsku pripremu leta uporabom proračuna „napamet“, koji su dostupni pilotima prilikom samog leta i izvesti simulaciju rute upotrebom prostorne navigacije. Cilj završnog rada je, temeljem rezultata dobivenih simulacijom rute, analizirati eventualna odstupanja u proračunima i simulaciji te ocijeniti primjenjivost metoda.

Rad je podijeljen u pet cjelina.

U drugoj su cjelini prikazani sustavi i mogućnosti zrakoplovne prostorne navigacije, prilikom čega je stavljen naglasak na posebne mogućnosti takvih sustava kako bi se ukazalo na potencijal implementiranja i korištenja takvih sustava u cjelokupnom zračnom prometu.

Treća cjelina se odnosi na navigacijsku pripremu i planiranje leta gdje se čitaoca detaljno vodi od početka navigacijske pripreme, postavljanjem cilja ili svrhe leta pa sve do ispunjavanja navigacijskog plana leta.

Četvrta cjelina je posvećena simulaciji leta u sustavu prostorne navigacije. Kroz cjelinu se upoznaje sustav u kojem je izvršena simulacija i njegove mogućnosti, nakon čega slijedi priprema simulacije i sama simulacija. Nakon simulacije je izvršena klasifikacija odstupanja čiji su uzroci objašnjeni u zaključnom dijelu rada.

2. SUSTAVI I MOGUĆNOSTI PROSTORNE NAVIGACIJE

2.1. OPĆENITO O PROSTORNOJ NAVIGACIJI

Prostorna navigacija (eng. Area Navigation ili RNAV) je metoda navigacije koja omogućuje operacije i let zrakoplova bilo kojim željenim rutama u području pokrivanja zemaljskih radionavigacijskih sredstava ili unutar mogućnosti autonomnih sustava na samom zrakoplovu. RNAV omogućava kontinuirano određivanje pozicije zrakoplova, bez obzira nalazi li se zrakoplov na unaprijed određenoj putanji te nalazi li se van konvencionalnih navigacijskih ruta između dva zemaljska radionavigacijska sredstva. Kao podloga za određivanje pozicije tijekom prošlih 40 godina, bili su dostupni različiti tipovi zemaljskih radionavigacijskih sustava. U početku se određivanje pozicije temeljilo na radiosignalima velikog dometa koje koriste sustavi Omega i Loran „C“. U bližoj prošlosti se takav sustav većim dijelom napustio, stoga se određivanje pozicije primarno temeljilo na signalima dobivenih od usmjerenih radiofarova (eng. VHF-omnidirectional Range ili VOR) te uređajima za mjerenje udaljenosti (eng. Distance Measuring Equipment ili DME). Nedostatci takvih sustava nalaze se u tome što je informacija dobivena od VOR stanica bila upotrebljiva do 62 nautičke milje od stanice zbog kutne pogreške takvih sustava, kao i zbog nemogućnosti postavljanja takvih stanica u oceanima i velikim kopnenim prostranstvima. Iz tog su razloga za letove preko oceana i velikih kopnenih prostranstava primarno korišteni sustavi inercijalne navigacije (eng. Inertial Navigation System ili INS). Mana takvih sustava je u tome što generiraju pogrešku tijekom vremena te nakon nekoliko sati pozicija dobivena od primarno takvog sustava, postaje nepouzdana. Napretkom globalnog navigacijskog satelitskog sustava (eng. Global navigation satelite system ili GNSS), primarno u inačici GPS-a (eng. Global Positioning System), ostvarene su potpuno nove mogućnosti određivanje pozicije velike točnosti u tri dimenzije (VNAV) te u dvije dimenzije (LNAV) nad prostorima izvan pokrivanja zemaljskih radionavigacijskih uređaja. Iako je upotreba GNSS-a kao sustava prostorne navigacije omogućila primjenu ove metode navigacije na globalnoj razini, dovela je i do dostupnosti vrlo širokog opsega točnosti pozicioniranja i na taj način i do različitih mogućnosti primjene istog sustava.

Korištenje GNSS sustava u sklopu RNAV-a varira od ručnog GPS-a koji se koristi kao pomoć u vizualnoj navigaciji do GPS sustava visoke točnosti pozicioniranja i cjelovitosti koji se koriste u instrumentalnim uvjetima leta za prilazne procedure. Iz navedenih razlika u mogućnostima različitih GPS sustava, javila se potreba za unificiranjem i definiranjem zajedničkih standarda uporabe zračnog prostora prema navigacijskoj opremi koju zrakoplov mora imati. Zahtjevi su definirani tako da su precizno određene performanse koje navigacijska oprema zrakoplova treba imati, stoga je tako nastao pojam navigacije bazirane na performansama (eng. Performance Based Navigation ili PBN) [1].

2.2. NAVIGACIJA BAZIRANA NA PERFORMANSAMA

Navigacija bazirana na performansama ili PBN koncept specificira zahtjeve RNAV sustava zrakoplova na temelju performansi samog sustava u smislu točnosti, cjelovitosti, raspoloživosti, kontinuiteta i funkcionalnosti koji su potrebni za izvođenje operacija zrakoplova unutar određenog zračnog prostora te su neki od zahtjeva za određene operacije prikazani u tablici 1. Zahtjevi za performanse su opisani u navigacijskim specifikacijama, koji potom određuju izbor navigacijskih senzora i opreme koji mogu zadovoljiti propisane zahtjeve. Navigacijski zahtjevi su definirani prema operativnim zahtjevima, stoga operateri prema tome mogu sami procijeniti dostupne opcije prema dostupnim tehnologijama i navigacijskim uslugama koje omogućuju ispunjavanje predstavljenih zahtjeva. Operater na taj način odabire za njega najisplativiju i najpogodniju opciju. Tehnologija s vremenom može napredovati bez potrebe mijenjanja operativnih procedura, dok god oprema ispunjava predstavljene zahtjeve. PBN također nudi brojne prednosti u kreiranju zračnog prostora i kriterijima za nadvišavanje prepreka kao što su: smanjenje potrebe održavanja konvencionalnih radionavigacijskih sredstava i zračnih putova, efikasnije i ekonomičnije iskorištenje zračnog prostora na način smještaja više zračnih putova i procedura zbog preciznije navigacije te definira i standardizira na jednom mjestu način uporabe prostorne navigacije [2].

Tablica 1. Zahtjevi za navigacijsku opremu prema PBN konceptu

Vrsta operacija	Točnost bočna 95% vremena	Točnost vertikalna 95% vremena	Cjelovitost	Vrijeme do upozorenja	Kontinuitet	Dostupnost
Početno prilaženje, međuprilaženje, neprecizno i precizno prilaženje te odlazni postupci	220 m	Nema	1×10^{-7} /h	10 s	Od 1×10^{-4} /h do 1×10^{-8} /h	0,99 do 0,99999
Neprecizno prilaženje s vertikalnim vođenjem (APV I)	220 m	20 m	$1\text{-}2 \times 10^{-7}$ /h po prilaženju	10 s	$1 – 8 \times 10^{-6}$ unutar 15 s	0,99 do 0,99999
Neprecizno prilaženje s vertikalnim vođenjem (APV II)	16 m	8 m	$1\text{-}2 \times 10^{-7}$ /h po prilaženju	6 s	$1 – 8 \times 10^{-6}$ unutar 15 s	0,99 do 0,99999
ILS cat I	16 m	6 do 4,9 m	$1\text{-}2 \times 10^{-7}$ /h po prilaženju	6 s	$1 – 8 \times 10^{-6}$ unutar 15 s	0,99 do 0,99999

Izvor: [1]

2.3. NAVIGACIJSKE SPECIFIKACIJE

Navigacijske specifikacije su skup zahtjeva koji su namjenjeni zrakoplovima i posadama zrakoplova, a trebaju biti ispunjeni kako bi podržali navigacijsku aplikaciju unutar određenog zračnog prostora. Navigacijske specifikacije definiraju zahtjevane performanse RNAV sustava, kao i sve funkcionalne zahtjeve kao što su mogućnost izvođenja leta zakrivljenim putanjama ili let paralelnim izmaknutim (eng. Off-set) rutama, što je detaljnije objašnjeno u podnaslovu 2.5.3. RNAV I RNP sustavi su vrlo slični, a glavna razlika je zahtjev za RNP sustave da sadrže sustave koji prate i kontroliraju rad i performanse samog sustava te omogućuju dojavljivanje posadi ako dođe do kvara ili ne zadovoljavajućeg stupnja rada (eng. On-board performance monitoring and alerting). Navigacijske specifikacije koje uključuju samokontrolu i dojavljivanje sustava se nazivaju RNP specifikacije, dok se one koje to ne zahtijevaju nazivaju RNAV specifikacije. Sukladno tome, i sustavi koji zadovoljavaju određene specifikacije se nazivaju ili RNAV ili RNP sustavi.

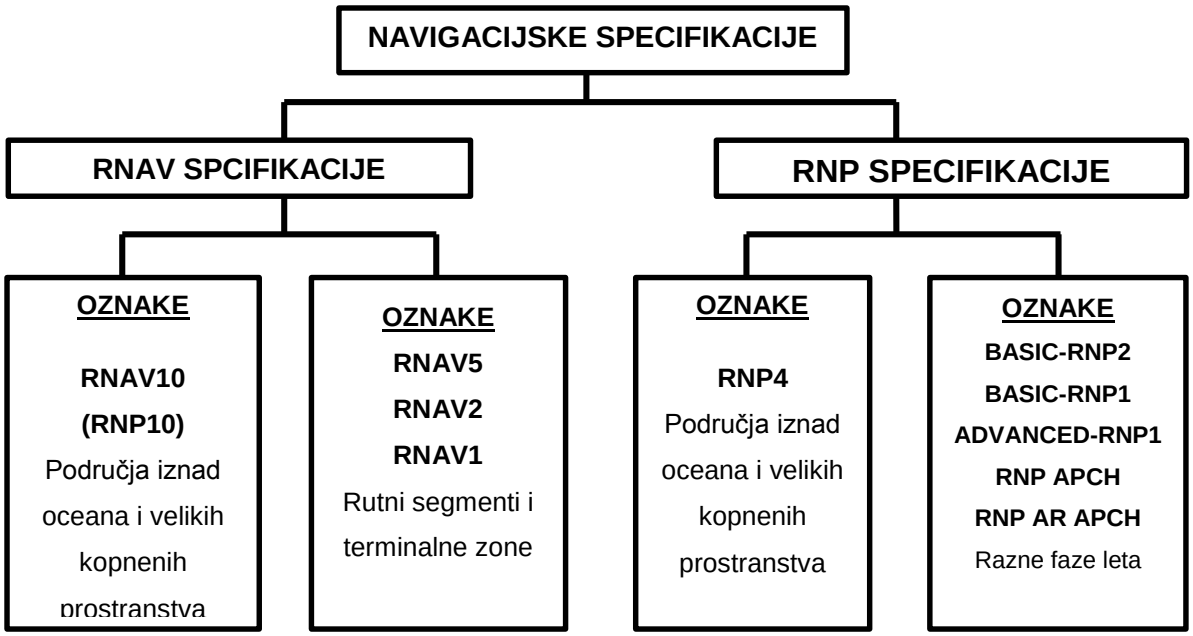
2.3.1. NAVIGACIJSKI FUNKCIONALNI ZAHTJEV

RNAV i RNP specifikacije uključuju zahtjeve za određene navigacijske funkcije. Na osnovnoj razini mogu uključivati:

- Kontinuirano pokazivanje pozicije zrakoplova u odnosu na zadanu crtu puta na navigacijskom prikazniku koji se nalazi u primarnom vidnom polju pilota
- Prikaz udaljenosti i smjera do aktivnog preletišta
- Prikaz brzine i vremena do aktivnog preletišta
- Mogućnost spremanja navigacijskih podataka
- Prikaz greške ili kvara u sustavu ako dođe do njega

2.3.2. OZNAKE RNP I RNAV SPECIFIKACIJA

Za navigaciju prilikom izvođenja oceanskih, rutnih i terminalnih operacija, RNP i RNAV specifikacije se označavaju RNAV „X“ ili RNP „X“ , gdje „X“ predstavlja jednu od brojka 10, 5, 4, 2 ili 1. Za RNP i RNAV specifikacije broj na mjestu „X“ označava lateralnu navigacijsku točnost izraženu u nautičkim miljama koja se očekuje tijekom 95% vremena leta u cijeloj populaciji zrakoplova koji operiraju unutar određenog zračnog prostora, rute ili procedure. Za prilazne navigacijske specifikacije se koriste oznake RNP APCH i RNP AR APCH, dok se RNAV specifikacije ne primjenjuju na prilazne operacije. Bitno je uzeti u obzir da zrakoplov koji je odobren za RNP procedure ne odgovara automatski i RNAV specifikacijama, stoga ako odgovara strožim zahtjevima ne znači da nužno odgovara i manje stogim zahtjevima [2]. Na slici 1 prikazana je podjela specifikacija.

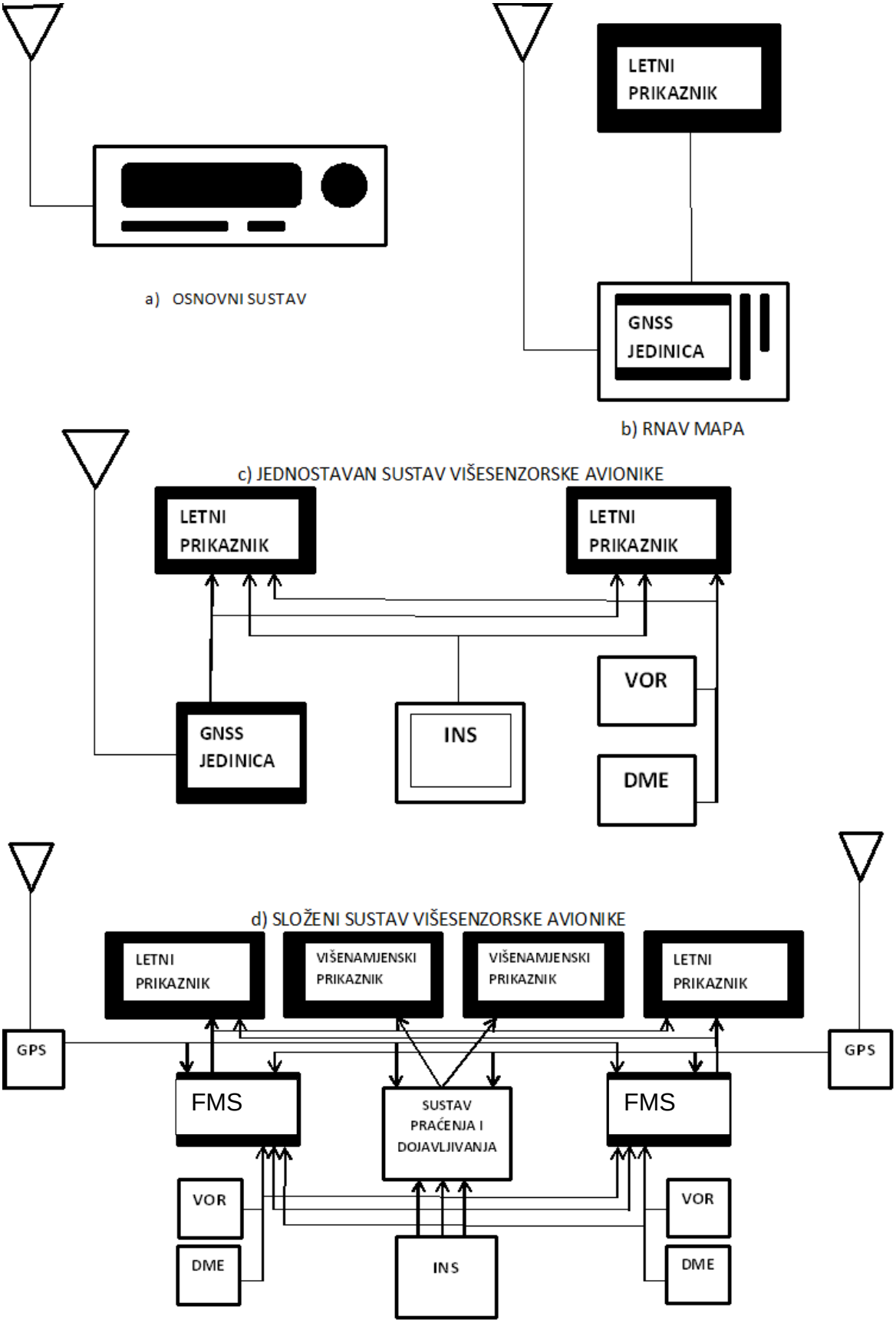


Slika 1. RNAV i RNP specifikacije ovisno o operacijama za koje su predviđene

Izvor: [2]

2.4. RNAV SUSTAVI NA ZRAKOPLOVU

Kao što je ranije spomenuto, nisu svi RNAV sustavi jednaki te postoje sustavi koji svoj rad temelje na podatcima dobivenih iz samo jednog senzora, kao i sustavi koji rade s podatcima dobivenih iz više različitih senzora i izvora. RNAV sustavi također mogu mogu biti povezani s ostalim sustavima na zrakoplovu, kao što su autopilot i automatsko upravljanje snagom (eng. Autothrottle), stoga na taj način omogućuju automatizirano upravljanje letom. Slika 2 prikazuje složenost RNAV sustava na zrakoplovu koji se kreću od jednostavnih do složenih. Osnovni sustav označen slovom a) sastoji se samo od jednog GPS prijamnika s odgovarajućim prikaznikom. Takav način upotrebe RNAV sustava najčešće se nalazi kod manjih zrakoplova generalne namjene. RNAV mapa pod slovom b) je nadogradnja takvog osnovnog sustava, na način da je prikaznik s informacijama bitnim za let povezan sa GPS sustavom i na taj način omogućava prikaz informacija bitnih za let pilotu u njegovom primarnom vidnom polju. Takvi sustavi također imaju mogućnost grafičkog prikaza rute. Jednostavni sustavi višesenzorske avionike prikazani pod slovom c) za rad koriste podatke dobivene iz više izvora kao što su GNSS, Inercijalni navigacijski sustav (eng. Inertial Navigation System) te VOR i DME uređaja. Način obrade tih podataka i davanje prioriteta određenim informacija je objašnjen u daljnjem dijelu rada, no ovakvi sustavi su česti na manjim komercijalnim zrakoplovima. Kompleksni sustavi višesenzorske avionike prikazani su pod slovom d) gdje je vidljivo kako takav sustav radi na principu prikupljanja podataka iz više različitih vrsta senozra, od kojih je svaki sustav radi pouzdanosti dupliran. Sustav je također povezan sa sustavima za upravljanje letom samog zrakoplova kako bi omogućio automatizirani let te sadrži sustav praćenja performansi i obavješćivanja posade, kao i navigacijsku bazu podataka. Takve sustave nalazimo na većim modernijim zrakoplovima komercijalne namjene.



Slika 2. RNAV sustavi na zrakoplovu

Izvor: [2]

2.5. MOGUĆNOSTI RNAV I RNP SUSTAVA NA ZRAKOPLOVU

2.5.1. OSNOVNE MOGUĆNOSTI RNAV SUSTAVA

RNAV sustavi su dizajnirani kako bi pružili zahtijevanu razinu točnosti primjerenu aplikaciji. RNAV sustavi obično integriraju informacije dobivene iz senzora kao što su računalo letnih podataka (eng. Air data computer), Inercijalne navigacije, radionavigacije, satelitske navigacije zajedno s ugrađenom bazom podataka te podatcima unesenim od strane posade kako bi izvršilo sljedeće funkcije:

- Navigacija
- Upravljanje planom leta
- Vođenje i kontrola zrakoplova
- Prikaz podataka i kontrola sustava

Navigacijskom funkcijom proračunavaju se podatci koji uključuju poziciju zrakoplova, brzinu, smjer leta, vertikalni profil leta, kut zanošenja, magnetsku varijaciju, barometrički ispravljenu visinu te brzinu i smjer vjetra. Također može obavljati samostalno podešavanje frekvencija radionavigacijskih sredstava iz okoline koje koristi prilikom prikupljanja podataka. Navigacija može biti temeljena na podacima dobivenim iz samo jednog sustava kao što je GNSS ili iz više njih. RNAV sustavi koji koriste više različitih izvora podataka računaju poziciju i brzinu kao i ostale parametre leta na temelju podataka dobivenih preko GNSS, VOR, DME i INS sustava. Takvi sustavi, dokle god na raspolaganju imaju više metoda za utvrđivanje pozicije, koriste onu najpouzdaniju. RNAV sustav će najprije provjeriti kvalitetu podataka dobivenih iz različitih sustava te kod naprednijih sustava ih i međusobno usporediti radi doslijednosti prije nego što ih iskoristi za računanje parametara leta i navigacije. Podatci dobiveni iz GNSS sustava prolaze stroge kontrole točnosti i cjelovitosti prije nego ih sustav prihvati za daljnju obradu. DME i VOR podatci se prije uporabe također kontroliraju. Kod višesenzorskih RNAV sustava, ako GNSS sustav nije raspoloživ ili dovoljno točan za računanje pozicije i brzine zrakoplova, sustav će automatski odabrati niži prioritet načina određivanja pozicije, kao što je DME/DME ili

VOR/DME. Ukoliko i ovaj način navigacije nije moguć, sustav će prijeći na još niži prioritet načina određivanja pozicije uporabom Inercijalne navigacije.

Tijekom leta unaprijed zadanom rutom, ako RNAV sustav koristi zemaljska radionavigacijska sredstva, sustav automatski prati svoju poziciju u prostoru u odnosu na ostala radionavigacijska sredstva te preko unaprijed ugrađene baze podataka mijenja i namješta frekvencije svih uređaja koje koristi za određivanje pozicije duž rute, kako bi održao najtočnije moguće prikazivanje. Horizontalno i vertikalno vođenje zrakoplova dostupno je pilotu putem navigacijskog prikaznika ili ako takav ne postoji na zrakoplovu, preko drugih letačkih instrumenata. U najnaprednijim sustavima, navigacijski prikaznik prikazuje simbol zrakoplova kako se kreće preko elektroničke karte u odnosu na planiranu rutu te može prikazivati različite podatke kao što su razmještaj radionavigacijskih sredstava u prostoru, aerodroma itd.

Funkcija kreiranja plana leta omogućava kreiranje horizontalnog i vertikalnog profila leta uporabom preletišta (eng. Fix) definiranjem geografske širine i dužine svakog preletišta, bez potrebe preleta preko radionavigacijskog sredstva. Napredniji sustavi u sebi sadrže aerodinamičke modele i podatke o performansama samog zrakoplova, te na taj način vertikalne profile leta i prikazuju te podatke na navigacijskom prikazniku. Također, sustav kontinuirano daje informacije o napretku leta i podatke o vremenu preleta određene točke na ruti, količini goriva na određenoj točki rute, vremenu dolaska na aerodrom slijetanja, vremenu do početka spuštanja itd [2].

2.5.2. OSNOVNE MOGUĆNOSTI RNP SUSTAVA

RNP sustav je kao što je i ranije spomenuto RNAV sustav koji podržava kontrolu performansi sustava na zrakoplovu i dojavljivanje posadi. Zahtjevi za mogućnosti sustava su:

- Mogućnost praćenja željene putanje leta preko zemlje s pouzdanošću te predvidljivošću, što vrijedi i za zakrivljene putanje leta

- Prilikom uporabe vertikalne navigacije, zahtjeva se uporaba vertikalnih kuteva ili određenih propisanih ograničavajućih visina kako bi se opisao vertikalni profil

Kontrola performansi samog sustava i dojavljivanja posadi može biti izvedena na više načina:

- Prikaz zahtijevanih i postignutih performansi sustava
- Praćenje performansi sustava i dojavljivanje posadi kada zahtijevane performanse nisu ispunjene
- Prikaz devijacije sa zadane crte puta sa skalom prilagođenom RNP zahtjevu, te odvojeno praćenje i dojavljivanje navigacijske cjelovitosti

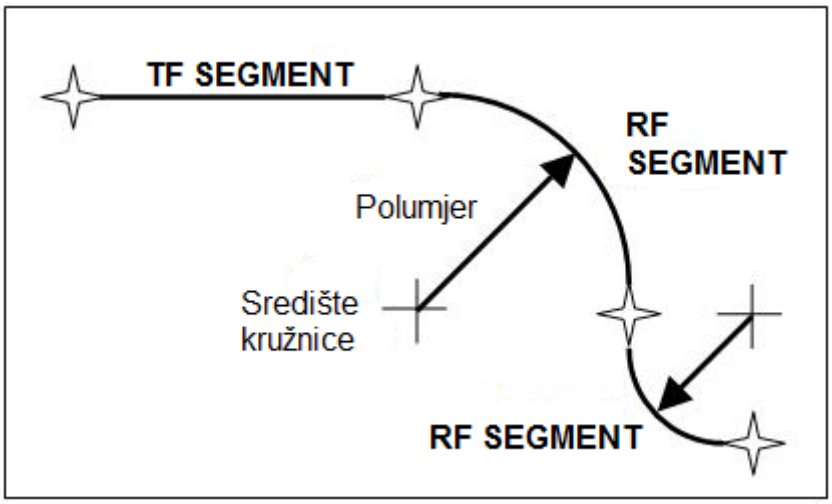
2.5.3. SPECIFIČNE MOGUĆNOSTI RNAV I RNP SUSTAVA

Uvođenjem koncepta navigacije bazirane na performansama, pojavili su se zahtjevi koji nisu standardno omogućeni u RNAV navigaciji. Specifične mogućnosti RNAV i RNP sustava omogućavaju poboljšane procedure u završnim kontroliranim oblastima, kao i konstrukciju procedura tamo gdje ih je prije bilo nemoguće konstruirati radi zahtjeva za nadvisivanjem prepreka te omogućuje racionalnije iskorištenje zračnog prostora i letačkih operacija. Specifični zahtjevi su mogućnost izvođenja zakrivljenih putanja leta s konstantnim polumjerom zakrivljenosti, RNAV ili RNP krug čekanja zrakoplova te mogućnost leta paralelnom izmaknutom putanjom leta.

2.5.3.1. ZAKRIVLJENE PUTANJE LETA S KONSTANTNIM POLUMJEROM ZAKRIVLJENOSTI

Zakrivljene putanje leta s konstantnim polumjerom zakrivljenosti (eng. Fixed Radius Paths ili FRP) dolaze u dva načina. Prvi način se naziva polumjer zakrivljenosti do preletišta (eng. Radius to Fix ili RF). Takav način se primjenjuje kad postoji potreba za konstruiranjem zakrivljene putanje u zračnom prostoru završnih kontroliranih

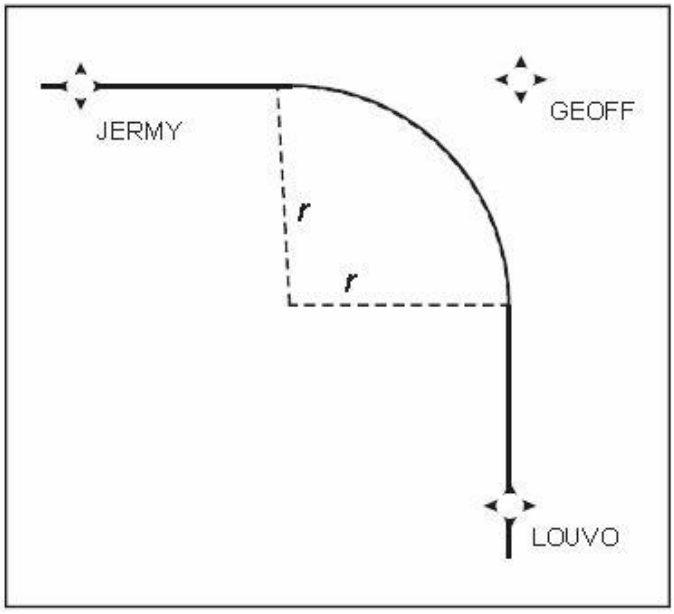
oblasti ili u prilaznim procedurama. RF procedura je definirana polumjerom zakrivljenosti, dužinom luka i preletištem. RNP sustavi prilikom izvođenja ove procedure posjeduju mogućnost održavanja zadane crte puta, jednako kao i prilikom izvođenja ravnih segmenata na ruti, dok RNAV sustavi nisu predviđeni za izvođenje ove vrste procedura, pošto se koristi u prilaznim procedurama, a prema navigacijskim specifikacija za to su sposobni samo RNP sustavi. Na slici 3 je prikazana ovakva vrsta procedure.



Slika 3. Primjer zakrivljene putanje leta s konstantnim polumjerom zakrivljenosti

Izvor: [3]

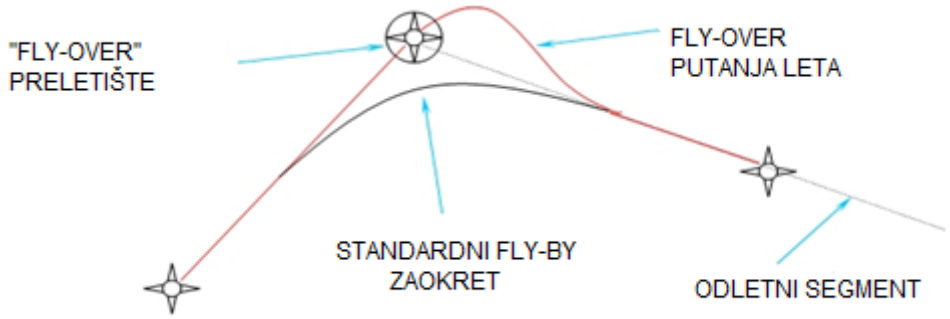
Drugi oblik FRP-a je namijenjen korištenju letenju na ruti. RNP sustav sam kreira zakrivljenu putanju leta konstantnog polumjera zakrivljenosti kako bi mogao prijeći iz jednog segmenta rute na drugi bez preleta samog preletišta. Takvi zaokreti nisu definirani u procedurama, te iz tog razloga sustav sam definira zakrivljenost putanje, čiji polumjer iznosi 22,5 nautičkih milja za razine leta iznad razine leta 195 i polumjere od 15 nautičkih milja za razine leta ispod razine leta 195. Ovakav način prelaska s jednog segmenta rute na drugi omogućava poboljšano iskorištenje zračnog prostora na način da omogućava smanjeni razmak paralelnih ruta. Slika 4 prikazuje takav način izvođenja zaokreta koji se još naziva eng. Fixed Radius Transition ili FRT.



Slika 4. Primjer FRT zakrivljene putanje leta, [4]

2.5.3.2. ZAOKRETI S PRELETOM KRAJ PRELETIŠTA (eng. Fly-By Turns)

Fly-by zaokreti su glavna karakteristika RNAV putanja leta. RNAV sustav koristi informacije o brzini zrakoplova, nagibu, vjetru i kutu promjene smjera leta kako bi izračunao putanju leta koja optimalno vodi zrakoplov iz jednog segmenta rute na drugi. Parametri koji utječu na zaokret su promjenjivi zbog različitih brzina leta, vjetra i samih performansa zrakoplova, te zbog toga početak zaokreta i površina koju zaokret pokriva variraju. Slika 5 prikazuje takav zaokret u usporedbi s konvencionalnim zaokretom prilikom kojeg je potrebno preletjeti preletište. Vidljiva je prednost ovakvog načina vođenja zaokreta u kraćoj putanji leta te tako i manjim troškovima [2].

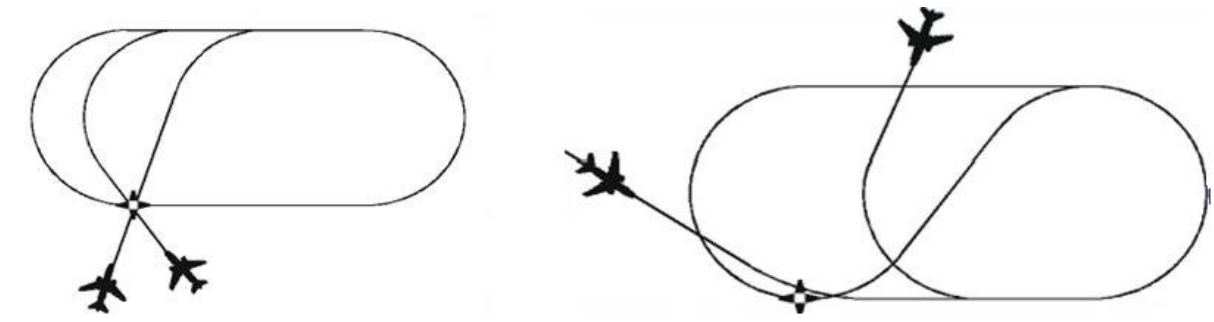


Slika 5. Fly-By zaokret u odnosu na konvencionalni

Izvor: [5]

2.5.3.3. KRUG ČEKANJA ZRAKOPLOVA (eng. Holding Pattern)

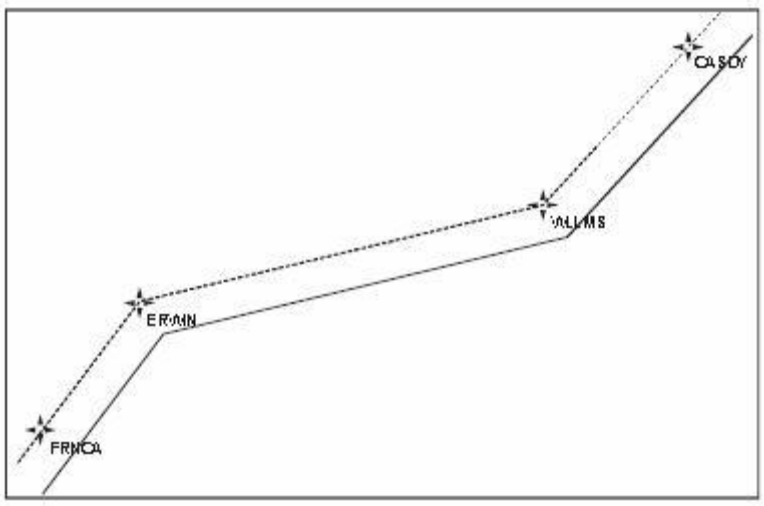
RNAV sustav sadrži mogućnost definiranja kruga čekanja putem unosa smjera kraka doleta (eng. Inbound leg), preletišta u odnosu na koje je definiran krug čekanja, strane u koju će se zaokreti izvoditi te vrijeme ili udaljenost koja će se letjeti na krakovima doleta i odleta. RNAV sustav također pruža mogućnost planiranja vremena izlaska iz kruga čekanja. RNP sustavi pružaju dodatne mogućnosti „Fly-By“ ulaska u krug čekanja, čime se smanjuje potreba za zaštitnim područjem sa strane kruga čekanja gdje se ne izvodi krug čekanja (eng. Non-Holding side). Slika 6 prikazuje „Fly-By“ ulaske u krug čekanja [2].



Slika 6. Prikaz RNP "Fly-By" ulaska u krug čekanja, [2]

2.5.3.4. PARALELNA IZMAKNUTA PUTANJA LETA (eng. Offset Flight Path)

RNAV sustavi nude mogućnost posadi leta da izabere ako to želi horizontalno izmaknutu putanju leta u odnosu na onu prije definiranu. Putanja leta se može izmaknuti od 1 do 20 nautičkih milja. Ova opcija je vrlo korisna kod separacije zrakoplova na istoj ruti ili prilikom izbjegavanja različitih vremenskih neprilika. Sustav automatski prekida izmaknutu putanju leta prilikom ulaska u završnu kontroliranu oblast ili početkom prilazne faze leta. Slika 7 prikazuje izgled takvog načina leta.



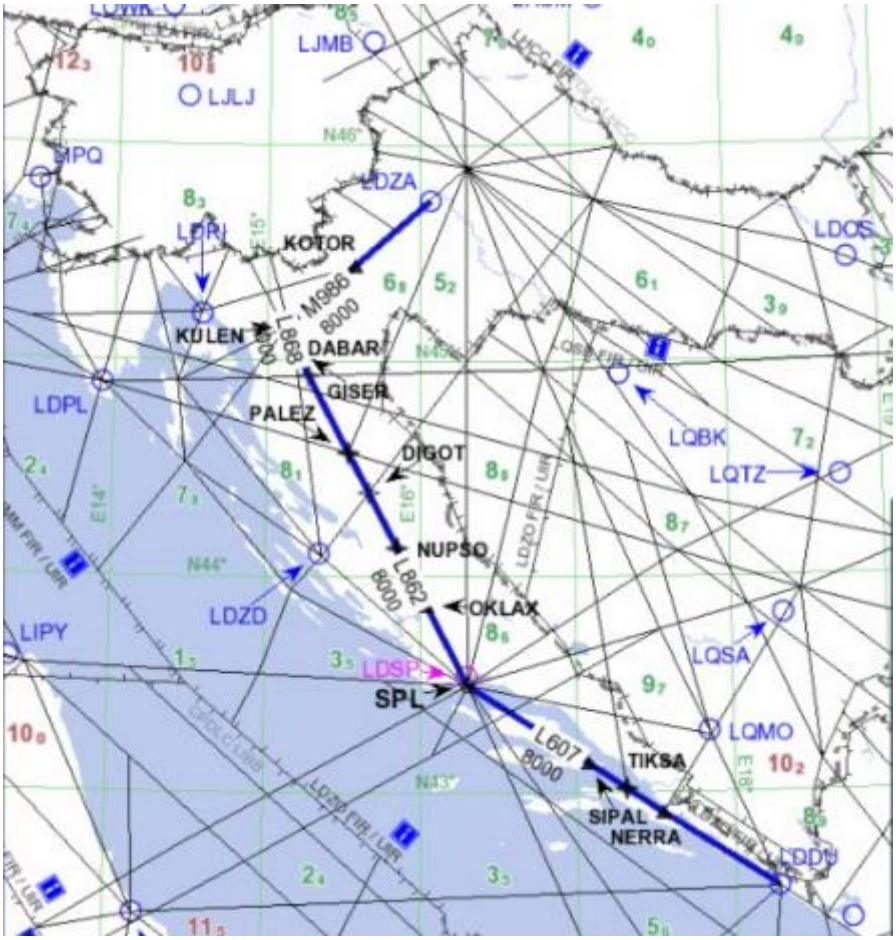
Slika 7. Prikaz izmaknute putanje leta, [2]

3. NAVIGACIJSKI PLAN I PROFIL LETA

3.1. ODABIR RUTE I VISINA

Ruta je put kojim zrakoplov leti od kraja uzlijetanja i inicijalne faze penjanja do početka faze prilaza i faze slijetanja. Prilikom izbora smjera prostiranja rute, mora se uzeti u obzir veliki broj zahtjeva. Kao prvo, ruta treba omogućiti najkraće trajanje leta uz što manja skretanja. Ruta treba biti odabrana tako da letovima prema vizualnim pravilima omogući sigurno vođenje vizualne navigacije, dok letovima prema instrumentalnim pravilima treba omogućiti neometano korištenje radionavigacijskih sredstava. Također, ruta svojim smjerom prostiranja treba omogućiti sigurnost leta s obzirom na reljef i meteorološke uvjete, izbjegavanje zone zaleđivanja, olujne oblačnosti, prostora s jakom turbulencijom i visoke planinske predjele te let po radionavigacijskim sredstvima u složenim meteorološkim uvjetima [6]. Pošto je svrha odabira ove rute simulacija leta u skolpu završnog rada, a ne let u komercijalne svrhe, ruta ne predstavlja najkraći mogući put između dvije zračne luke, nego je namjerno odabran duži put kako bi ruta sadržavala više promjena smjera leta zrakoplova te tako i promjena utjecaja vjetra na let.

U simulaciji leta, kao zadatak, postavljen je let od zračne luke Zagreb (ICAO kod LDZA) do zračne luke Dubrovnik (ICAO kod LDDU). Pravila leta u skladu s kojima je let izvršen su instrumentalna pravila leta (eng. Instrumental Flight Rules ili IFR), te su iz tog razloga korištene instrumentalne karte zračnih putova na području Republike Hrvatske. Slika 8 prikazuje odabranu rutu na karti nižih zračnih puteva na području RH. Vidljivo je kako su za preletišta odabrane označene značajne točke na karti te zračni putevi koji ih povezuju. Ruta je tako redom određena preletištima: KOTOR, zračnim putem M986 koji povezuje preletište KOTOR sa sljedećim preletištem KULEN. Nakon KULEN-a slijedi preletište GISER te zračni put L868 koji ih povezuje. Na preletištu GISER započinje dio rute zračnim putom L862 koji završava na VOR radionavigacijskom sredstvu SPL, gdje počinje posljednji segment rutnog dijela koji se proteže zračnim putem L607, sve do preletišta NERRA koje je ujedno i zadnje na rutnom dijelu leta.

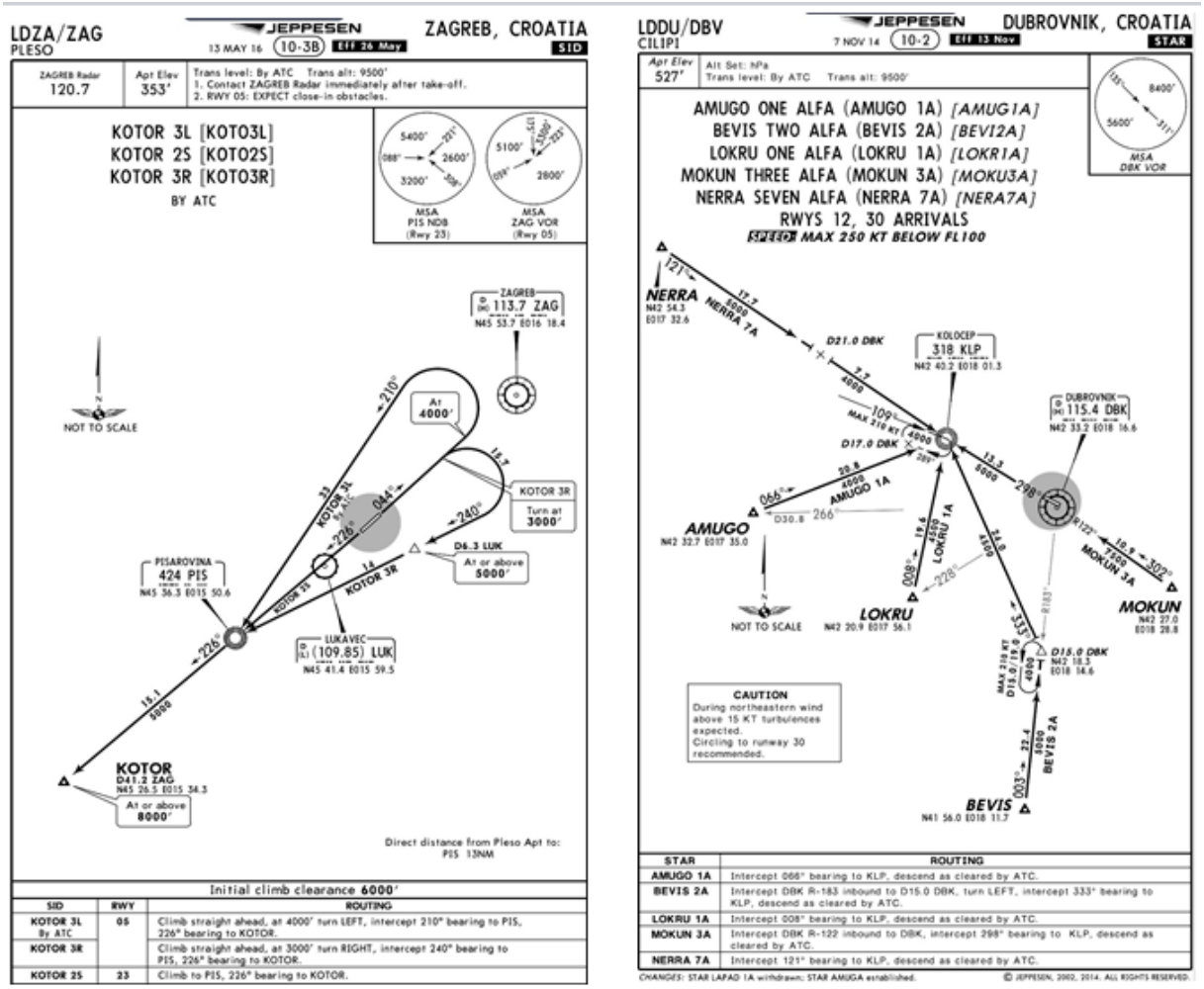


Slika 8. Prikaz odabrane rute na karti donjih zračnih puteva

Kao što je vidljivo na slici, nije potrebno navoditi točke koje se nalaze na samom zračnom putu već samo „ulaznu“ i „izlaznu“ točku sa zračnog puta koji se koristi tijekom leta.

Kako se let odvija prema instrumentalnim uvjetima leta, sam odabir rute nije dovoljan, nego treba odabrati standardnu odlaznu proceduru (eng. Standard Instrument Departure ili SID) koja povezuje zračnu luku polijetanja s prvim preletištem na ruti, standardni dolazak (eng. Standard Arrivall ili STAR) koji povezuje zadnje preletište na ruti s preletištem početnog prilaženja (eng. Initial Approach Fix ili IAF) te samu prilaznu proceduru (eng. Approach ili APP). SID i STAR procedure su također objavljene te je potrebno odabrati one koje odgovaraju zadanim preletištima i smjeru staze u upotrebi. Kao što je vidljivo na slici 9, s obzirom na meteo situaciju, odabrana je SID procedura KOTOR 2S, a s obzirom na zadnje preletište na ruti NERRA, STAR procedura NERRA 7A koja vodi zrakoplov od preletišta NERRA do IAF KLP

(radionavigacijsko sredstvo NDB). Prilaznu proceduru u većini slučajeva dodjeljuje kontrola leta, no kako se u ovom slučaju radi o simulaciji leta, odabrana je procedura instrumentalnog slijetanja (eng. Instrument Landing System ili ILS) za stazu 12. Za alternativnu destinaciju odabrana je zračna luka Split.



Slika 9. SID KOTOR 2S i STAR NERRA 7A, [7]

Kod odabira visina na ruti, važno je vidjeti ograničenja postavljena u smislu minimalnih visina na ruti (eng. Minimum En-route Altitude ili MEA), pošto te visine osiguravaju sigurno nadvišavanje svih prepreka i zadovoljavajuć prijem radionavigacijskog signala na svakoj točki rute. Iz razloga što je simulacija rute izvedena uporabom zrakoplova Cessna 172 R, što je zrakoplov malih performansi s plafonom leta od 14 000 stopa, odabrana visina za ovaj let nalazi se između MEA,

koja iznosi 8000 stopa i može se iščitati na slici 8, ispod imena zračnog puta i plafona leta samog zrakoplova. Odabrana visina iz tog razloga je razina leta 100 (eng.Flight Level ili FL) kako bi se izbjeglo konstantno mijenjanje postavki referentnog tlaka duž rute. Sva ostala spuštanja se odvijaju prema proceduri standardnog dolaska te su prikazana u navigacijskom planu leta u daljnjem dijelu ovog rada.

3.2. METEOROLOŠKA SITUACIJA

Poznavanje meteorološke situacije i elemenata važno je za sigurno planiranje leta. Glavni elementi meteorološke situacije koje pilot prilikom planiranja leta mora poznavati su vjetar, temperatura, vidljivost te opasne pojave kao što su zaleđivanje, grmljavinska nevremena, planinski valovi i druge pojave. Svaki zrakoplov posjeduje vlastita ograničenja u smislu podnošenja vremenskih prilika, te iz tog razloga iste vremenske prilike jednom zrakoplovu mogu onemogućiti let, dok primjerice neki drugi zrakoplov može bez problema obaviti sve operacije. Iz tog razloga, planirajući let Cessnom 172R koja je zrakoplov malih performansi, od ključne je važnosti poznavati vremenske uvjete na ruti i alternaciji iz razloga što navedeni zrakoplov ne posjeduje napredne sustave otkrivanja olujnih oblaka i zaštitu protiv zaleđivanja. Također, vjetar i temperatura utječu na performanse zrakoplova, stoga je njihov utjecaj obrađen u daljnjem dijelu rada proračuna navigacijskih elemenata.

Stvarni podatci korišteni za simulaciju i planiranje leta o meteorološkim prilikama preuzeti su od nadležne meteorološke službe Hrvatske kontrole zračne plovidbe zadužene za informiranje zrakoplova.

Podatci o vremenskim prilikama na zračnim lukama su kodirani i nazivaju se METAR (eng. Meteorological Terminal Aviation Routine), koji prikazuje stvarnu trenutnu meteorološku situaciju te TAF (Terminal Aerodrome Forecast), koji je prognoza budućeg vremena na samoj zračnoj luci i okolici. Iz razloga što se provodi samo simulacija leta, buduće prognoze se neće uzimati prilikom planiranja leta. Slika 10 prikazuje METAR za zračne luke Zagreb, Dubrovnik i Split.

```
METAR LDZA 131430Z VRB05KT CAVOK 31/14 Q1013 NOSIG =
METAR LDSP 131430Z 23012KT CAVOK 28/13 Q1014 NOSIG=
METAR LDDU 131430Z 26008KT 210V310 CAVOK 26/11 Q1015 NOSIG =
```

Slika 10. METAR izvješće, [8]

Izvješće govori kako u Zagrebu u vrijeme simuliranog leta, vjetru ne možemo odrediti smjer. Njegova jačina iznosi 5 čvorova, vidljivost iznosi preko 10 kilometara i donja baza oblaka nalazi se iznad minimalne sektorske visine. Temperatura iznosi 31^0 C sa točkom rosišta 14^0 C, tlakom na razini mora od 1013 hPa i trendom bez značajnih promjena. Izvješće iz Dubrovnika govori kako je trenutni zabilježeni vjetar iz smjera 260 jačine 8 čvorova te mijenja smjer od 210 do smjera 310. Vidljivost je veća od 10 kilometara s bazom oblaka također preko minimalne sektorske visine. Temperatura iznosi 26^0 C sa točkom rosišta 11^0 C i trendom bez značajnijih promjena.

Iz priloženih izvješća je vidljivo kako su uvjeti za izvođenje leta na polaznom i dolaznom aerodromu dobri te da u Zagrebu možemo koristiti stazu 23 za polijetanje zbog povoljnije odlazne procedure, s obzirom na manju udaljenost do preletišta KOTOR. Zbog vjetra iz smjera 260, odnosno približno zapadnog smjera na zračnoj luci Dubrovnik, planira se slijetanje na stazu 30 s procedurom instrumentalnog prilaženja za stazu 12 i kruženja za slijetanje na stazu 30, pošto ista ne posjeduje instrumentalne prilaze. Važno je uočiti visoke temperature na obje zračne luke što će utjecati na performanse zrakoplova.

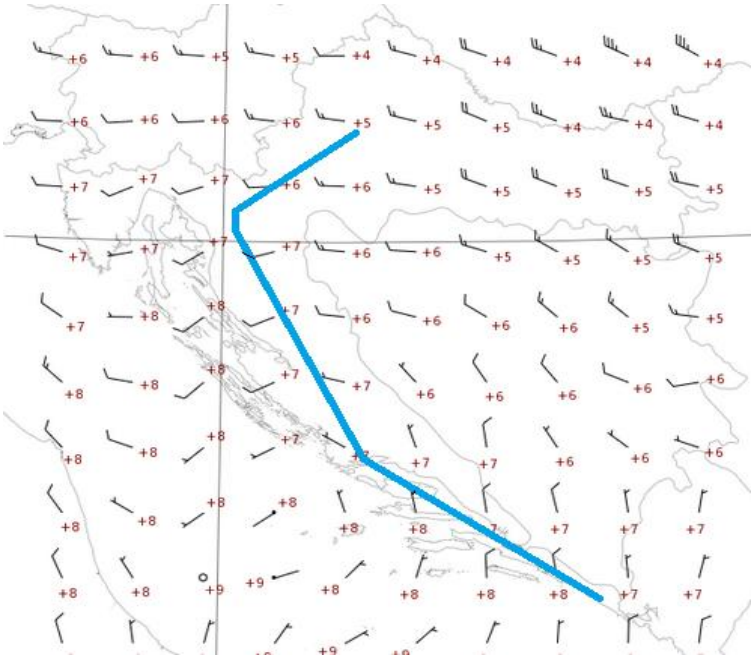
Nakon što je poznata meteorološka situacija na zračnim lukama, potrebno je detaljno proučiti vremenske prilike na ruti uporabom karte značajnog vremena (eng. Significant weather Chart ili SWC) i karte vjetrova (eng. Wind Chart).

Na slici 11 prikazana je karta značajnog vremena s planiranom rutom. Vidljivo je kako fronta lošeg vremena zajedno s grmljavinskim oblacima i grmljavinom dolazi sa sjevera, no ne zahvaća planiranu rutu, što znači da je let moguće izvesti u povoljnim vremenskim uvjetima. Za dio rute do preletišta KULEN mogući su gdje koji oblaci kumulus koji ne predstavljaju problem za odvijanje leta.

Na karti vjetrova, za visinu od 10000 stopa prikazanoj na slici 12, vidljivo je kako je vjetar na prva tri segmenta rute do VOR-a SPL uglavnom zapadni ili zapadno-jugozapadni jačine uglavnom 10 čvorova, dok u zadnjem segmentu rute vjetar mijenja smjer na sjeverni jačine od 5 do 10 čvorova, a temperatura zraka duž rute iznosi uglavnom $+7^0$ C. Iz sveg priloženog, može se zaključiti kako su uvjeti za let dobri te se nastavlja sa daljnjom navigacijskom pripremom.



Slika 11. Karta značajnog vremena, [8]



Slika 12. Karta vjetrova, [8]

3.3. PRORAČUN NAVIGACIJSKIH ELEMENATA

3.3.1. IZRAČUN KURSEVA I UDALJENOSTI

Osnovni pojmovi koje je potrebno poznavati kod planiranja leta su kurs leta i udaljenost između preletišta te ukupna udaljenost.

Kurs leta (eng. Course ili CS) je kut izmjeren u smjeru kazaljke na satu od pravca sjevera do namjeravane putanje leta, a može se izražavati kao pravi, magnetski i kompasni, ovisno o referentnom sjeveru na kojeg se mjeri.

Uz kurs leta, bitan pojam je i pravac leta (eng. Heading ili HDG) koji predstavlja kut mjeren u smjeru kazaljke na satu, na poziciji zrakoplova od pravca sjevera do produljene uzdužne osi zrakoplova. Također može biti magnetski, kompasni i pravi, ovisno o referentnom sjeveru na koji se mjeri. Pravac leta je više spominjan prilikom izračuna utjecaja vjetra, pošto na njega utječe vjetar.

Kako je simulacija izvedena u skladu s instrumentalnim pravilima leta, izračun kurseva i udaljenosti je prilično jednostavan pošto su svi podatci definirani na kartama i potrebno ih je samo iščitati.

Svi kursevi na instrumentalnim kartama su ispisani u odnosu na magnetni sjever te se nalaze uz radionavigacijska sredstva, u odnosu na koja su definirani. Rutni segmenti leta odvijaju se zračnim putevima koji su definirani radijalima, u odnosu na određeno VOR sredstvo. Kurs leta ovisi o tome radi li se o doletu ili odletu, u odnosu na odabrano VOR sredstvo. Ukoliko se radi o odletu, kao kurs leta uzima se podatak o radijalu kojim zrakoplov leti. Primjer toga je prvi rutni segment između preletišta KOTOR i KULEN koje povezuje zračni put M986, koji je definiran 226^0 radijalom ZAG VOR sredstva. U ovom slučaju, kurs leta na tom segmentu rute iznosi 226^0 . Prilikom doleta na određeno VOR sredstvo, što je slučaj prilikom segmenta rute zračnim putom L862 od preletišta GISER do VOR-a SPL koji je definiran radijalom 330^0 SPL VOR-a, zrakoplov leti prema sredstvu te se kurs određuje na način da se od smjera radijala oduzme ili doda 180^0 . U ovom slučaju zrakoplov će letjeti kursom 150^0 .

Primjenom navedenih principa određeni su kursevi za cijelu rutu te su popisani u tablici 2.

Prilikom određivanja udaljenosti potrebno ih je pročitati iznad oznake imena zračnog puta ili ako se radi o ostalim procedurama, potrebno ih je pročitati s gornje strane definirane crte puta na segmentima same procedure, kao što je vidljivo na slici 9. Popisivanjem svih udaljenosti na ruti i zbrajanjem istih, izračunato je kako duljina rute iznosi 269 nautičkih milja (NM).

Tablica 2. Kurs leta i udaljenost po segmentima rute

Segment rute	Magnetski kurs leta	Udaljenost na segmentu
LDZA-KOTOR	226^0	28 NM
KOTOR-KULEN	226^0	25 NM
KULEN-GISER	161^0	7 NM
GISER-SPL	150^0	106 NM
SPL-NERRA	119^0	65 NM
NERRA-LDDU	121^0	38 NM
UKUPNO		269 NM
Do alternacije LDSP		105 NM

3.3.2. STVARNA BRZINA ZRAKOPLOVA

Prema definiciji, brzina leta je udaljenost koju zrakoplov prijeđe u jedinici vremena. U zračnom prometu se izražava u čvorovima (eng. Knots ili Kn). Brzina se na zrakoplovu mjeri u odnosu na zrak i naziva se indicirana brzina, pošto o njoj ovise aerodinamičke sile koje djeluju na zrakoplov.

Indicirana brzina (eng. Indicated Air Speed ili IAS) prikazuje se na brzinomjeru koji je korigiran za mehaničku grešku samog mjernog instrumenta.

Sam je instrument „baždaren“ na uvjete standardne ISA (eng. International Standard Atmosphere) atmosfere, pri kojoj su kao referentne vrijednosti uzete: temperatura od 15^0 C, tlak na razini mora od 1013,25 hPa te gustoća od 1,225 kg/m³. Iz tog razloga, povećanjem visine leta dolazi do pada temperature, tlaka i gustoće. Na razliku

tlakova ne utječe tlak, pošto se mijenja jednako i kod statičkog i zaustavnog, a gustoća i temperatura direktno ovise jedno o drugom.

Kako bi dobili stvarnu brzinu (eng. True Air Speed ili TAS) zrakoplova u odnosu na okolni zrak, potrebno je korigirati indiciranu brzinu za utjecaj gustoće. Gustoća u pravilu s porastom visine u atmosferi opada te je iz tog razloga moguće uspostaviti odnos između indicirane i stvarne brzine u odnosu na visinu. Kako je ranije napomenuto, prilikom navigacijske pripreme koristit će se metode proračuna napamet.

Metodom proračuna „napamet“ računa se pomoću formule (1):

$$TAS = IAS + 2\% \times \frac{Altitude}{1000} \quad (1)$$

Iz formule je vidljivo kako za svakih 1000 stopa nadmorske visine TAS raste za 2%, u odnosu na IAS. Tako će za let na 10 000 stopa, s planiranom indiciranom brzinom leta od 100 kn, TAS iznositi 120 kn.

Ukoliko se TAS računa za zrakoplov u penjanju i spuštanju, potrebno je izračunati TAS na početnoj i završnoj visini te interpolacijom dobiti prosječnu stvarnu brzinu.

3.3.3. PRORAČUN UTJECAJA VJETRA

Vjetar je prema definiciji premještanje zračne mase preko zemljine površine uzrokovan razlikom tlakova. Određen je smjerom koji se uvijek definira kao smjer iz kojeg vjetar puše, a smjer se izražava u stupnjevima kuta od smjera sjevera u smjeru kazaljke na satu, do smjera iz kojeg vjetar puše te jačinom, odnosno brzinom strujanja. Na meteorološkim kartama, vjetar je uvijek prikazan u odnosu na pravi sjever, dok se pilotima u letu daje informacija o vjetru u odnosu na magnetni sjever.

Zrakoplov se u letu kreće unutar zračne mase, te je iz tog razloga njegovo gibanje u odnosu na Zemljinu površinu složeno od gibanja samog zrakoplova unutar zračne mase i prenesenog gibanja same zračne mase preko tla. Ukoliko ne postoji vjetar prilikom leta zrakoplova, smjer leta (eng. Track ili TC) koji predstavlja kut mjeren u smjeru kazaljke na satu, od pravca sjevera do stvarne putanje leta zrakoplova, u odnosu na površinu Zemlje te se također može izražavati kao magnetski, kompasni i pravi, ovisno o referentnom sjeveru. Podudarat će se s pravcem leta zrakoplova, a putna brzina zrakoplova (eng. Ground Speed ili GS), koja predstavlja brzinu zrakoplova preko zemljine površine će se podudarati sa stvarnom brzinom zrakoplova (TAS).

Ukoliko vjetar postoji, prenosit će svoje gibanje na zrakoplov koji se nalazi unutar te zračne mase, stoga će ovisno o upadnom kutu i jačini vjetra doći do odstupanja između pravca i smjera leta, te stvarne i putne brzine. Iz navedenog razloga, od velike je važnosti u pripremi leta izračunati navedena odstupanja kako bi se u letu mogle provesti pravilne korekcije za ostanak na zadanoj crti puta te kako bi se utjecaj vjetra mogao uračunati u dolet.

3.3.3.1. KUT ZANOŠENJA I KUT ISPRAVKE

Prilikom leta u uvjetima vjetra, kada vjetar puše iz bilo kojeg smjera osim iz čistog čeonog ili leđnog, dolazi do zanošenja putanje leta u odnosu na namjeravanu putanju leta za određeni kut koji se naziva kut zanošenja (eng. Drift Angle ili DA).

Kut zanošenja ovisi o stvarnoj brzini zrakoplova, jačini vjetra te upadnom kutu vjetra. Upadni kut vjetra je kut između produžene uzdužne osi zrakoplova i smjera iz kojeg vjetar puše. Maksimalan upadni kut vjetra je 90^0 , odnosno čisti bočni vjetar, dok su čisti leđni i čeoni vjetar označeni s upadnim kutom 0^0 . Iz navedenog je vidljivo da upadni kut može biti čeoni i leđni te isto tako lijevi i desni, ovisno s koje strane zrakoplova vjetar puše.

Vjetar je vektorska veličina, odnosno ima svoj smjer i veličinu, što znači da vjetar iste jačine neće uvijek ostvarivati jednako zanošenje zrakoplova, nego će ono ovisiti o

upadnom kutu, odnosno o veličini komponente vektora koja djeluje bočno na zrakoplov.

Kako bi odredili kut zanošenja, potrebno je prvo odrediti „makismalan kut zanošenja“, odnosno zanošenje u slučaju kad je upadni kut vjetra određene jačine 90^0 i kad punom komponentom djeluje na bok zrakoplova preko formule (2):

$$DAmax = \frac{Brzina\ Vjetra}{TAS} \times 60 \quad (2)$$

Poznavajući maksimalan kut zanošenja, trigonometrijskim formulama je moguće odrediti kut zanošenja za sve ostale upadne kutove vjetra. Pošto se navedena metoda koristi prilikom izračuna napamet, nemoguće je znati vrijednosti svih trigonometrijskih formula za sve kutove od 0^0 do 90^0, već se koriste podatci navedeni u tablici 3 za aproksimaciju upadnih kutova vjetra i vrijednosti trigonometrisjkih funkcija.

Tablica 3. Aproksimacija upadnog kuta vjetra i vrijednost trigonometrijskih funkcija

Upadni kut β	Aproksimacija β	sinβ	cosβ
0^0 -20^0	0^0	0	1
21^0 -35^0	30^0	0,5	0,9
36^0 -50^0	45^0	0,7	0,7
51^0 -70^0	60^0	0,9	0,5
71^0 -90^0	90^0	1	0

Nakon određene vrijednosti trigonometrijske funkcije kut zanošenja se računa prema formuli (3):

$$DA = DAmax\ \times sin\beta \quad (3)$$

Nakon poznatog kuta zanošenja, u metodi proračuna „napamet“ se pretpostavlja da je za ostanak na zadanom kursu leta, kut ispravke (eng. Correction Angle ili CA) jednak kutu zanošenja, odnosno da je potrebno promijeniti pravac leta za iznos kuta zanošenja u stranu iz koje vjetra puše. Na taj način će se zrakoplov unutar zračne mase kretati novim pravcem leta, ali zbog prenesenog gibanja zračne mase na zrakoplov, njegov će smjer leta biti jednak kursu leta.

Pravac leta se računa prema formuli (4):

$$HDG = TC \pm CA \tag{4}$$

Navedeni postupak ima veliku važnost prilikom planiranja leta, iz razloga što uvelike smanjuje radno opterećenje posade u letu prilikom izvođenja složenih procedura.

3.3.3.2. PUTNA BRZINA ZRAKOPLOVA

Putna brzina (eng. Ground Speed ili GS) je brzina zrakoplova u odnosu na Zemljinu površinu, uzimajući u obzir utjecaj vjetra. Rastavljanjem vektora vjetra na komponente, vidljivo je kako njegova čeona ili leđna komponenta ima za posljedicu promjene brzine leta zrakoplova u odnosu na zemlju.

Za proračun vremena provedenog na određenom segmentu rute ili procedure te za proračun potrebne količine goriva za let, bitno je poznavati putnu brzinu zrakoplova.

Kako bi mogli izračunati putnu brzinu, potrebni su nam podatci o stvarnoj brzini zrakoplova te smjeru i jačini vjetra. Komponenta vjetra koja utječe na putnu brzinu označava se kao TWC (eng. Track Wind Component), a može biti čeona ili leđna, ovisno o smjeru iz kojeg vjetar puše.

TWC se računa prema formuli (5):

$$TWC = Brzina\ Vjetra \times cos\beta \tag{5}$$

Podatak o iznosu trigonometrijske funkcije kosinusa ovisno o upadnom kutu, uzima se iz tablice 3 po istom principu kao i kod računanja kuta zanošenja.

Kada je poznat TWC, putna brzina zrakoplova računa se formulom (6):

$$GS = TAS \pm TWC \tag{6}$$

Ukoliko se radi o čeonom vjetru, putna brzina će biti manja od stvarne brzine zrakoplova, a ako se radi o leđnom vjetru, putna brzina će biti veća od stvarne brzine zrakoplova.

3.3.4. PRORAČUN KUTA ISPRAVKE, KUTA ZANOŠENJA I PUTNE BRZINE ZA SIMULIRANU RUTU

U navedenom primjeru, kao pokazni primjer, prikazan je navigacijski proračun za segment rute KOTOR-KULEN. Primjer prikazuje postupak izračuna stvarne brzine leta, određivanje upadnog kuta vjetra, proračun kuta zanošenja i kuta ispravke te njihov utjecaj na pravac leta. U primjeru je također prikazan proračun TWC komponente vjetra i utjecaj TWC na putnu brzinu zrakoplova.

Primjer:

Segment rute: KOTOR-KULEN

Visina krstarenja: 10 000 ft

Indicirana brzina: 100 kn

Stvarna brzina: prema formuli (1): $TAS = 100 + 2\% \times \frac{10000}{1000}$

TAS = 120 kn

Vjetar: 270^0 / 10 kn

Kurs leta: 226^0

Upadni kut β: 44^0 (desni čeoni), prema tablici 3 aproksimira se na 45^0

Maksimalni kut zanošenja: prema formuli (2): $DAmax = \frac{10}{120} \times 60$

DAmax = 5^0

Kut zanošenja: prema formuli (3): $DA = 5^0 \times sin45^0 = 5^0 \times 0{,}7 = 3{,}5^0 \approx 4^0$

DA = 4^0 L (lijevo)

Kut ispravke: po principu metode proračuna „napamet“ jednak je kutu zanošenja, ali u suprotnu stranu CA = 4^0 D (desno)

Pravac leta (HDG): Izračunava se prema formuli (4): $HDG = 226^0 + 4^0 = 230^0$

TWC: prema formuli (5): $TWC = 10Kn \times cos45° = 10Kn \times 0{,}7 = 7\ kn$

TWC = 7 kn čeonog vjetra

Putna brzina (GS): prema formuli (6): $GS = 120kn - 7kn = 113kn$

U skladu s prethodno prikazanim proračunom za segment rute KOTOR-KULEN, izračunati su podatci o kutu zanošenja, kutu ispravke, pravcu leta i putnoj brzini za sve ostale segmente rute te su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Prikaz kutova zanošenja, ispravke, pravca leta i putne brzine za sve segmente rute

Segment rute	Vjetar (^{0} / kn)	Magnetski kurs	Upadni kut β	Kut zanošenja	Kut ispravke	Pravac leta	TWC	GS
LDZA-KOTOR	270/10	226^0	44^0 D Čeoni	6^0 L	6^0 D	232^0	-7 kn	76 kn
KOTOR-KULEN	270/10	226^0	44^0 D Čeoni	4^0 L	4^0 D	230^0	-7 kn	113 kn
KULEN-GISER	250/10	161^0	89^0 D Čeoni	5^0 L	5^0 D	166^0	0 kn	120 kn
GISER-SPL	245/10	150^0	85^0 D Leđni	5^0 L	5^0 D	155^0	0 kn	120 kn
SPL-NERRA	350/5	119^0	51^0 L Leđni	2^0 D	2^0 L	117^0	+5 kn	125 kn
NERRA-LDDU	350/10	121^0	49^0 L Leđni	4^0 D	4^0 L	117^0	+7 kn	127 kn

Iz tablice 4, vidljivo je kako se tijekom prvog dijela leta do preletišta KULEN očekuje uglavnom čeoni vjetar koji za posljedicu ima smanjenje putne brzine zrakoplova u odnosu na stvarnu brzinu, dok zadnjim dijelom leta prevladava uglavnom leđni vjetar koji povećava putnu brzinu zrakoplova u odnosu na stvarnu brzinu. Navedene utjecaje vjetra treba uzeti u obzir prilikom računanja potrebnog goriva za rutu.

3.3.5. PRORAČUN VREMENA, GORIVA I PRIJEĐENE UDALJENOSTI TIJEKOM PENJANJA

Za proračun segmenta penjanja se koriste podatci iz tablice 5, preuzeti iz Pilotskog Operativnog Priručnika (eng. Pilot's Operating Handbook ili POH) zrakoplova Cessna 172R.

Dana tablica prilagođena je standardnim uvjetima bez vjetra te je nakon provedenog proračuna potrebno izvršiti korekcije za utjecaj vjetra. U slučaju veće temperature,

treba uvećati vrijeme, gorivo i udaljenost za 10% za svakih 10^0 C iznad standardne temperature.

Tablica 5. Vrijeme, gorivo i udaljenost za penjanje pri masi zrakoplova od 2450 lb

VISINA PO TLAKU FT	TEMP. ^{0} C	BRZINA U PENJANJU KIAS	BRZINA UZDIZANJA FPM	OD RAZINE MORA		
				VRIJEME U MIN	POTROŠENO GORIVO U GAL	UDALJE-NOST U NM
Razina mora	15	79	720	0	0,0	0
353	14,3	79	702	0,35	0,14	0,7
1000	13	78	670	1	0,4	2
2000	11	77	625	3	0,7	4
3000	9	76	575	5	1,2	6
4000	7	76	560	6	1,5	8
5000	5	75	515	8	1,8	11
6000	3	74	465	10	2,1	14
7000	1	73	415	13	2,5	17
8000	-1	72	365	15	3,0	21
9000	-3	72	315	18	3,4	25
10000	-5	71	270	22	4,0	29
11000	-7	70	220	26	4,6	35
12000	-9	69	170	31	5,4	43

Izvor: [9]

Crvenom bojom označeni su vrijeme, potrošeno gorivo i udaljenost koju bi zrakoplov prešao pri penjanju od razine mora u standardnim uvjetima. Kako je visina po tlaku zračne luke Zagreb 353 FT, potrebno je izvršiti interpolaciju podataka označenih plavom bojom kako bi dobili potrošnju, udaljenost i vrijeme potrebno za penjanje od razine mora do visine zračne luke Zagreb. Nakon toga je potrebno izvršiti proračun sukladno primjeru. Zrakoplov penje s maksimalnom kontinuiranom snagom, brzinom najveće brzine uzdizanja.

Primjer: Visina po tlaku aerodroma: 353 ft

Visina po tlaku krstarenja: 10000 ft

Temperatura zraka aerodroma: 31^0 C

Temperatura zraka u krstarenju: 7°C

Standardna ISA temperatura na aerodromu: 15^0 C

Standardna ISA temperatura u krstarenju: -5^0 C

Prosječna ISA devijacija u penjanju: $+14^0$ C

Masa zrakoplova: 2450 lb

Vrijeme penjanja: $22\ \text{min} - 0{,}35\ min = 21{,}65\ min$

$$21{,}65min + 0{,}14 \times 21{,}65 = 24{,}7min$$

Potrošeno gorivo: $4{,}0\ gal - 0{,}14gal = 3{,}86gal$

$$3{,}86 + 0{,}14 \times 3{,}86 = 4{,}4gal$$

Udaljenost za penjanje: $29NAM - 0{,}7NAM = 28{,}3NAM$

$$28{,}3NAM + 0{,}14 \times 28{,}3NAM = 32{,}3NAM$$

Dobivena vrijednost prijeđene udaljenosti tijekom penjanja, izražena je u odnosu na zrak kroz koji se zrakoplov kreće, u nautičkim zračnim miljama (eng. Nautical Air Mile ili NAM).

Kako bi dobili udaljenost koju će zrakoplov prijeći preko zemljine površine, potrebno je uračunati utjecaj vjetra. Preko navedene formule (7), zračne nautičke milje se pretvaraju u zemaljske nautičke milje (eng. Nautical Ground Mile ili NGM), uračunavajući uzdužnu komponentu vjetra koja djeluje na zrakoplov u penjanju:

$$\frac{NAM}{NGM} = \frac{TAS}{GS} = \frac{TAS \pm TWC}{TAS} \qquad (7)$$

Slijedi da uvrštavanjem podataka o putnoj brzini iz tablice 4 dobijemo izraz:

$$NGM = NAM \times \frac{GS}{TAS} = 32{,}3 \times \frac{76}{83} = 29{,}6NGM$$

Iz dobivenog rezultata vidimo kako će se zrakoplov stići popeti na minimalnu visinu na ruti do preletišta KOTOR, a visinu krstarenja će postići 1,6 NM nakon prelijetanja preletišta, što nam daje uvid u poziciju točke vrha penjanja (eng. Top of Climb ili TOC).

3.3.6. PRORAČUN SEKTORSKIH VREMENA I GORIVA POTROŠENOG NA RUTNIM SEGMENTIMA

Vrijeme provedeno na određenom segmentu rute ovisi o putnoj brizini zrakoplova te o duljini određenog segmenta. Izračunava se prema formuli (8):

$$Sektorsko\ vrijeme(min) = \frac{Duljina\ segmenta\ rute(NM)}{GS} \times 60 \qquad (8)$$

Koristeći podatke iz tablica 2 i 4 prema priloženoj formuli dobiveni su rezultati prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Sektorska vremena za svaki segment rute

Segment rute	Sektorsko vrijeme (min)
KOTOR-KULEN	13
KULEN-GISER	4
GISER-SPL	53
SPL-NERRA	31
NERRA-LDDU	18
Ukupno na ruti	119
Do alternacije LDSP	60

Kod jednomotornog klipnog zrakoplova se ne računaju posebno podatci o spuštanju, nego se taj segment smatra kao i rutni segment.

Kad je poznato sektorsko vrijeme, potrebno je još pronaći potrošnju goriva pri određenoj postavci snage u režimu krstarenja, kako bi mogli izračunati potrebno gorivo. Informacije o potrošnji goriva dane su u tablici 7, preuzete iz Pilotskog operativnog priručnika Cessne 172R.

Tablica 7. Performanse krstarenja

Visina po tlaku	RPM	20^0 C ispod stand. temp.			Stand. Temp.			20^0 C iznad stand. Temp.		
		%BHP	KTAS	GPH	%BHP	KTAS	GPH	%BHP	KTAS	GPH
8000	2400	---	---	---	80	122	9,2	76	121	8,7
	2350	81	121	9,3	76	120	8,7	71	120	8,2
	2300	76	117	8,7	71	116	8,2	68	115	7,8
	2200	68	111	7,7	64	110	7,3	61	107	7,0
	2100	60	104	6,9	57	102	6,6	55	99	6,4
	2000	54	96	6,2	52	94	6,0	51	91	5,9
10000	2350	76	121	8,8	72	120	8,2	68	120	7,8
	2300	72	116	8,3	68	115	7,8	65	113	7,4
	2250	68	113	7,8	65	112	7,4	61	109	7,1
	2200	65	110	7,4	61	108	7,0	59	105	6,7
	2100	58	102	6,6	55	100	6,4	54	97	6,2
	2000	52	94	6,1	51	91	5,9	50	88	5,8
12000	2350	73	119	8,3	69	117	7,9	65	115	7,5
	2300	69	115	7,9	65	113	7,5	62	111	7,1
	2250	65	112	7,5	62	109	7,1	59	107	6,8
	2200	62	108	7,1	59	105	6,8	57	103	6,6
	2100	56	100	6,4	54	97	6,2	53	94	6,1

Izvor: [9]

Podatci u tablici označeni crvenom bojom predstavljaju postotak snage motora, stvarnu brzinu krstarenja te potrošnju motora u galonima po satu, na visini od 10 000 stopa. Kako su podatci dani za standardnu temperaturu i temperaturu 20^0 C iznad standardne, potrebno je izvesti interpolaciju za temperaturu od 12^0 C iznad standardne, jer takvi uvjeti prevladavaju duž simulirane rute.

Interpolacijom je utvrđeno kako na visini od 10000 stopa pri temperaturi od 7^0 C, motor pri 2350 okretaja u minuti razvija 70% svoje nazivne snage te troši 8 galona po satu, a zrakoplov ostvaruje stvarnu brzinu od 120 čvorova.

Kako bi izračunali potrošnju goriva po segmentu rute, potrebno je uvrstiti podatke o sektorskom vremenu i potrošnji goriva (eng. Fuel Flow ili FF) u formulu (9):

$$Gorivo\ po\ segmentu\ rute = \frac{FF}{60} \times Sektorsko\ vrijeme \quad (9)$$

Uvrštavajući podatke o sektorskim vremenima iz tablice 6 te potrošnju goriva od 8 galona po satu, dobiveni su rezultati prikazani u tablici 8:

Tablica 8. Potrebno gorivo po segmentima rute

Segment rute	Potrebno gorivo (usgal)
KOTOR-KULEN	1,73
KULEN-GISER	0,53
GISER-SPL	7,07
SPL-NERRA	4,13
NERRA-LDDU	2,4
Ukupno na ruti	15,86
Do alternacije LDSP	8

3.4. UKUPNO POTREBNO GORIVO ZA LET

Ukupno gorivo potrebno za let uključuje:

- **Gorivo za voženje (eng. Taxi Fuel):** gorivo koje se potroši na vožnju i probu motora prije polijetanja
- **Putno gorivo (eng. Trip Fuel):** gorivo potrebno za penjanje od aerodroma do željene visine krstarenja, uključujući očekivanu odlaznu proceduru, gorivo od najviše točke penjanja do najviše točke spuštanja, uključujući svako penjanje i spuštanje između, gorivo od vrhunca spuštanja do mjesta početka prilaza,

uključujući očekivanu prilaznu proceduru i gorivo za spuštanje i slijetanje na dolazni aerodrom

- **Gorivo za nepredviđene situacije (eng. Contingency Fuel)**: predviđeno gorivo za kompenzaciju nepredviđenih čimbenika koji mogu utjecati na potrošnju goriva do destinacije, koji mogu biti odstupanja potrošnje zrakoplova od predviđenih, promjena planirane visine, rute leta ili promjena meteoroloških uvjeta na izabranoj ruti leta. Iznosi 5% količine putnog goriva.
- **Gorivo za let do alternativnog aerodroma (eng. Alternate Fuel):** uključuje gorivo potrebno za: neuspjeli prilaz od minimalne visine snižavanja na odredišnom aerodromu do visine neuspjelog prilaženja, uzimajući u obzir cijeli postupak neuspjelog prilaza, penjanje od visine neuspjelog prilaženja do visine krstarenja, krstarenje od najviše točke do najviše točke spuštanja, spuštanje od najviše točke spuštanja do točke na kojoj započinje procedura prilaza, uzimajući u obzir očekivanu dolaznu proceduru, prilaz i slijetanje na alternativni aerodrom odredišta.
- **Gorivo završne rezerve (eng. Final Reserve Fuel):** količina goriva za klipni zrakoplov koja je dovoljna za let od 45 minuta na 1500FT iznad odredišnog aerodroma.
- **Dodatno gorivo (eng. Additional Fuel):** svako dodatno gorivo koje operativni centar odluči da je potrebno zbog neke ne standardne situacije duž rute, npr. gužve na aerodromima, loše vrijeme itd.
- **Posebno gorivo (eng. Extra Fuel):** svako dodatno gorivo koje zapovjednik zrakoplova odluči da je potrebno te ga uključi u ukupnu količinu goriva.

Ukupno potrebno gorivo za simulirani let prikazano je u tablici 9, a dobiveno je na temelju izračunatih podataka o potrebnom gorivu na ruti i do alternacije te iščitanih podataka iz Pilotskog operativnog priručnika o gorivu za voženje i završnoj rezervi goriva. Dodatno i posebno gorivo nisu potrebni za ovaj let pošto se radi o simulaciji leta, a i vremenski uvjeti duž rute i na aerodromima su povoljni.

Tablica 9. Prikaz ukupnog goriva potrebnog za let

Gorivo za voženje	1,1 gal [9]
Putno gorivo	20,3 gal
Gorivo za nepredviđene situacije	1 gal
Alternativno gorivo	8 gal
Gorivo završne rezerve	4,5 gal [9]
Dodatno gorivo	0 gal
Posebno gorivo	0 gal
Ukupna količina goriva	34,9 gal

3.5. POPUNJAVANJE NAVIGACIJSKOG PLANA

Navigacijski plan leta je dokument o namjeravanom letu koji služi pilotu ili posadi zrakoplova za popisivanje svih relevantnih navigacijskih podataka u toku pripreme leta na jednom preglednom mjestu te služi za njihovo jednostavno korištenje i praćenje u toku leta. Navigacijski plan leta također služi za kontrolu goriva i vremena tijekom leta te ga je pilot dužan popunjavati tijekom leta kako bi održao što bolju situacijsku svjesnost.

Svaki zrakoplov koji leti izvan aerodromske zone, dužan je imati navigacijski plan leta.

Nakon što je izrađen navigacijski plan leta i kad pilot prikupi sve potrebne navigacijske karte za let završava navigacijska priprema leta.

Rubrike u navigacijskom planu za instrumentalno letenje su:

1. **TOČKA/RUTA**: upisuju se početna i završna točka pojedinog segmenta leta
2. **VISINA**: ispisuje se planirana visina leta na pojedinom segmentu (FT)
3. **OAT**: (eng. Outside Air Temperature) vanjska temperatura na visini leta
4. **VJETAR**: upisuje se smjer vjetra u stupnjevima te brzina vjetra u čvorovima
5. **MC**: upisuje se magnetski kurs leta na pojedinom segmentu rute
6. **CA**: upisuje se kut ispravke na pojedinom segmentu leta
7. **MH**: upisuje se magnetski pravac leta na pojedinom segmentu leta

8. **DEV**: upisuje se iznos kompasne devijacije (eng. Deviation ili DEV), označava kutnu razliku između pravca magnetnog sjevera i kompasnog sjevera. Pošto se u ovom slučaju radi o simulaciji rute pomoću računalnog programa, ne postoji devijacija.
9. **CH**: upisuje se kompasni pravac leta (eng. Compas Heading ili CH). Određuje se preko formule (10):

$$CH = MH \pm DEV \tag{10}$$

10. **UDALJENOST**: upisuje se duljina pojedinog segmenta leta te se u rubrici preostalo upisuje iznos udaljenosti koji je preostao od pojedinog preletišta do aerodroma slijetanja
11. **TAS**: upisuje se stvarna brzina zrakoplova
12. **GS**: u rubriku EST (eng. Estimated) se upisuje očekivana putna brzina, dok se u rubriku ACT (eng. Actual) upisuje stvarna putna brzina izmjerena putem RNAV sustava tijekom leta
13. **VRIJEME**: u rubriku ETE (eng. Estimated Time on Route) se upisuje proračunato sektorsko vrijeme na pojedinom segmentu leta, dok se u rubriku ATE (eng. Actual Time on Route) upisuje u letu stvarno izmjereno sektorsko vrijeme
14. **GORIVO**: u rubriku goriva EST se upisuje očekivana potrošnja po segmentu leta, dok se u rubriku REM (eng. Remaining) upisuje preostala proračunata količina goriva po pojedinom segmentu rute. Rubrika ACT služi za kontrolu goriva u letu gdje se upisuje stvarno stanje goriva.
15. **PRAĆENJE GORIVA**: rubrika služi za popisivanje svih bitnih goriva za let kako bi bili dostupni pilotu tijekom leta
16. **ODOBRENJA**: rubrika služi za popunjavanje tijekom leta. Pilot može ručno upisivati odobrenja ili informacije dobivene od kontrole leta.
17. **BILJEŠKE**: pilot može upisivati bilo koje informacije koje smatra bitnim za određeni let (npr. frekvencije radionavigacijskih sredstava, kontrole leta itd.)

Tablica 10. Navigacijski plan leta

IFR NAVIGACIJSKI PLAN LETA																			
RUTA/TOČKA		**VISINA**	**OAT**	**VJETAR**		**MC**	**CA**	**MH**	**DEV**	**CH**	**UDALJENOST**		**TAS**	**GS**		**VRIJEME**		**GORIVO**		
OD	**DO**	**[ft]**	**[^{0} C]**	**SMJER [^{0}]**	**BRZINA [Kn]**	**[^{0}]**	**[^{0}]**	**[^{0}]**	**[^{0}]**	**[^{0}]**	**SEGMENT [NM]**	**PREOSTALO [NM]**	**[Kn]**	**EST [Kn]**	**ACT [Kn]**	**ETE [min]**	**ATE [min]**	**EST [gal]**	**REM [gal]**	**ACT [gal]**
LDZA	KOTOR	↑	19	270	10	226	6 D	232	0	232	28	241	83	76		22		4,4	29,4	
KOTOR	KULEN	10000	7	270	10	226	4 D	230	0	230	25	216	120	113		13		1,7	27,7	
KULEN	GISER	10000	7	250	10	161	5 D	166	0	166	7	209	120	120		4		0,5	27,2	
GISER	SPL	10000	7	245	10	150	5 D	155	0	155	106	103	120	120		53		7,1	20,1	
SPL	NERRA	10000	7	350	5	119	2 L	117	0	117	65	38	120	125		31		4,1	16	
NERRA	LDDU	↓	16	350	10	121	4 L	117	0	117	38	0	120	127		18		2,4	13,6	
NA RUTI											**269**					**144**		**20,2**	**13,6**	
ALTERNACIJA																				
LDSP		5000				301					105		110	110		60		8		

PRAĆENJE GORIVA		**ODOBRENJA**	**BILJEŠKE**
Gorivo za voženje	**1,1 gal**		
Putno gorivo + 5%	**21,3 gal**		
Alternativno gorivo	**8 gal**		
Završna rezerva	**4,5 gal**		

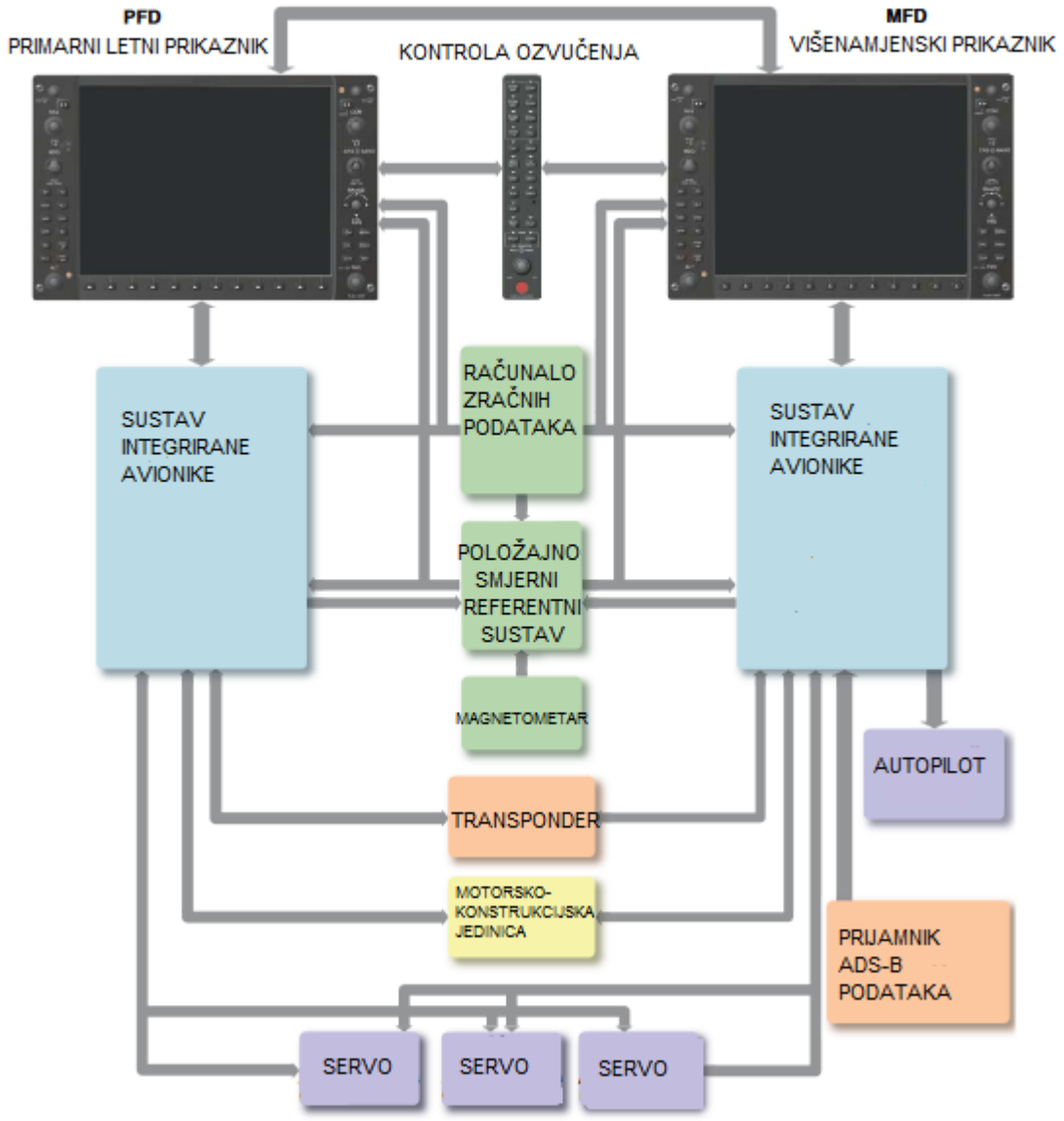
4. SIMULACIJA LETA U SUSTAVU PROSTORNE NAVIGACIJE

4.1. GARMIN G1000

Satelitski navigacijski sustav Garmin G1000 je integrirani instrumentalni navigacijsko-komunikacijski sustav avionike, koji prikazuje letačke, pozicijske, navigacijske i komunikacijske podatke pilotu, putem dva velika prikaznika smještena u primarnom vidnom polju pilota. Sustav se sastoji od više ukomponiranih dijelova:

1. **Primarni Letni prikaznik** (eng. Primary Flight Display ili PFD)
2. **Višenamjenski prikaznik** (eng. Multifunction Display ili MFD)
3. **Sustav integrirane avionike** (eng. Integrated Avionics Unit ili IAU): povezuje sve komponente sustava sa PFD-om te sadrži GPS prijamnik, radio prijamnik i upravitelj leta (eng. Flight Director ili FD).
4. **Računalo zračnih podataka** (eng. Air Data Computer ili ADC): obrađuje podatke dobivene iz pitot-statičkog sustava te proslijeđuje podatke poput visine po tlaku, brzine, vertikalne brzine i temperature IAU-u.
5. **Motorsko konstrukcijske jedinice** (eng. Enigne/Airframe Unit): prima i obrađuje podatke iz senzora na motoru i konstrukciji zrakoplova.
6. **Položajno-smjernog referentnog sustava** (eng. Attitude and Heading Reference System ili AHRS): pruža informacije o položaju zrakoplova te o magnetnom pravcu leta zrakoplova. Sadrži akcelerometre te komunicira s magnetometrom, GPS-om i ADC-om kako bi izračunao potrebne podatke.
7. **Magnetometar:** mjeri smjer pružanja magnetnih silnica Zemljinog magnetnog polja.
8. **Zvučni sustav s ukompniranim sustavom prijma signala Markerskih radionavigacijskih sredstava:** fizički je smješten između PFD-a i MFD-a te služi za kontrolu ozvučenja u zrakoplovu.
9. **Mod S Transponder**
10. **Prijemnik satelitskih podataka**
11. **Servo uređaji u sustavu autopilota:** automatsko upravljanje kontrolnih površina [10]

Pojednostavljen shematski prikaz povezanosti dijelova unutar Garmin G1000 sustava prikazan je na slici 13.



Slika 13. Shematski prikaz povezanosti dijelova sustava Garmin G1000

Izvor: [10]

Kako je Garmin G1000 potpuno elektronički sustav, svaki zrakoplov koji je opremljen njime, opremljen je i klasičnim analognim barometarskim brzinomjerom i visinomjerom te magnetskim kompasom i umjetnim horizontom, kako bi posada uslijed kompletnog otkaza sustava imala pričuvne instrumente pomoću kojih je moguće sigurno završiti let. U slučaju otkaza neke od komponenti sustava, ostatak

sustava nastavlja normalno funkcionirati, ali podatci iz neispravnog sustava su označeni kao neupotrebljivi.

4.1.1. PRIMARNI LETNI PRIKAZNIK

Rezultat zamjene klasičnih analognih instrumenata, velikim lako čitljivim ekranom primarnog letnog prikaznika koji na jednom mjestu prikazuje veliki umjetni horizont, položaj zrakoplova, brzinu, visinu, pravac leta i ostale bitne informacije, je povećana situacijska svjesnost pilota te njegovo smanjeno radno opterećenje.

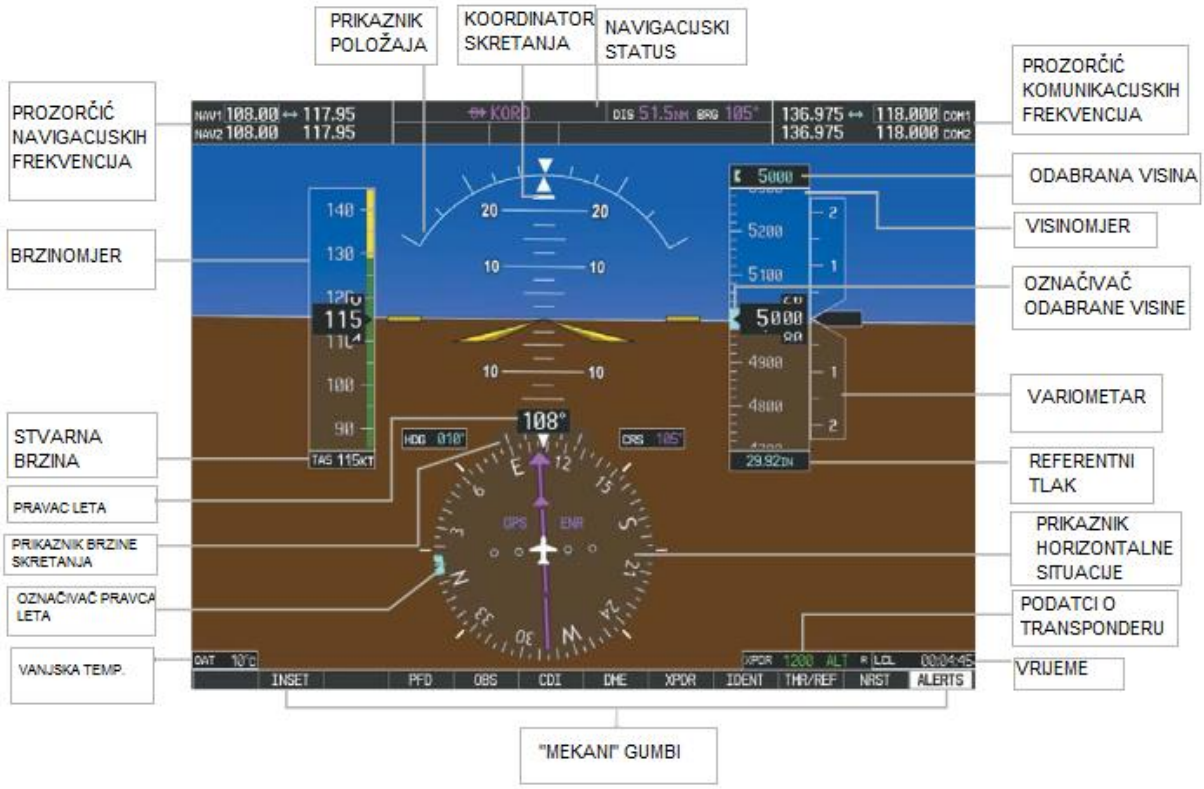
Primarni letni prikaznik služi pilotu za direktno vođenje leta jer se na njemu nalaze podatci bitni za samo upravljanje zrakoplovom. Prikaznik je izveden kao veliki elektronički zaslon, oko kojeg su smješteni gumbi za upravljanje informacijama prikazanim na njemu. Kako se radi o zaslonu, a ne o klasičnim prikaznicima instrumenata, moguće je prikazati razne vrste informacija bitnih za let u primarnom vidnom polju pilota. Navedeni su letački instrumenti i dodatne informacije koje su prikazane na primarnom letnom prikazniku:

1. **BRZINOMJER** prikazuje: indiciranu i stvarnu brzinu, trend brzine, označava područja letnih brzina (normalne operativne brzine, područje opreza, brzine za izvučena zakrilca...), prikazuje bitne brzine (npr. brzina rotacije, brzina najboljeg kuta penjanja, makismalna strukturalna brzina...).
2. **PRIKAZNIK POLOŽAJA S KOORDINATOROM SKRETANJA**
3. **VISINOMJER** koji prikazuje: trend visine, postavku referentnog barometarskog tlaka, barometarsku visinu te odabranu referentnu visinu.
4. **INDIKATORI VERTIKALNOG ODSTUPANJA:** prilazna ravnina i kut spuštanja
5. **VARIOMETAR**
6. **PRIKAZNIK VERTIKALNE NAVIGACIJE** (eng. Vertical Navigation ili VNAV)
7. **VANJSKA TEMPERATURA (OAT)**
8. **PRIKAZNIK HORIZONTALNE SITUACIJE** (eng. Horizontal Situation Indicator ili HSI) koji prikazuje: brzinu skretanja, pokazivače smjerova, izvor navigacijskih informacija, prikaznik odstupanja od zadane putanje (eng.

Course Deviation Indicator ili CDI), udaljenosti od uređaja za mjerenje udaljenosti (eng. Distance Measuring Equipment ili DME).

9. **MOD RADA TRANSPONDERA I KOD** (eng. SQUAWK)
10. **PROZORČIĆ VREMENA I REFERNCI** koji prikazuje: vrijeme, odabrane brzine i minimalnu barometarsku visinu spuštanja (eng. Minimum Descent Altitude ili MDA)
11. **PODATCI O VJETRU**
12. **RAZNA UPOZORENJA**

Slika 14 prikazuje navedene instrumente na primarnom letnom prikazniku.



Slika 14. Primarni letni prikaznik

4.1.2. VIŠENAMJENSKI PRIKAZNIK

Informacije na višenamjenskom prikazniku su grupirane po stranicama sukladno informacijama koje sadrže. Standardno su prikazani motorski instrumenti i pokretna navigacijska karta.

Motorski instrumenti se nalaze s lijeve strane zaslona te prikazuju sve bitne parametre o radu motora. Bitno je naglasiti kako Garmin G1000 sustav sadrži vrlo precizne motorske instrumente, pomoću kojih je moguće „fino“ praćenje i prilagođavanje motorskih parametara radi što sigurnijeg i ekonomičnijeg leta.

Veći dio zaslona podređen je prikazu pokretne navigacijske karte ili ako je potrebno, bilo kojih drugih informacija kao što su prilazne i aerodromske karte, normalne i liste provjere u nuždi, informacije o zračnim putevima i radionavigacijskim sredstvima kao i informacije o performansama rada samog Garmin G1000 sustava.

Stranice sa dodatnim informacijama su podijeljene u grupe prema informacijama koje sadrže:

1. **Stranice karata (eng. Map Pages ili MAP) sadrže**: navigacijske karte, prikaz grmljavine i olujnih oblaka, vremenske karte i kartu udaljenosti od tla.
2. **Stranice preletišta (eng**. **Waypoint pages ili WPT) sadrže:** informacije o aerodromima (dolazne, odlazne, prilazne i aerodromske procedure zajedno sa vremenom na aerodromu), informacije o NDB, VOR radionavigacijskim sredstvima te o preletištima.
3. **Pomoćne stranice (eng. Auxillary Pages ili AUX) sadrže:** planiranje rute, status GPS sustava, postavke sustava, stranice s podatcima o satelitima te podatci o statusu samog sustava.
4. **Stranice plana leta (eng. Flight Plan Pages ili FPL) sadrže:** aktivan plan leta, pohranjeni plan leta i listu planova leta.
5. **Stranice „najbližih“ (eng. Nearest Pages ili NRST) sadrže:** najbliža preletišta, aerodrome, VOR i NDB radionavigacijska sredstva, frekvencije i zračne prostore.
6. **Stranice procedura (eng. Procedures Pages ili PROC) sadrže:** mogućnost „aktiviranja“ određenih prilaznih, dolaznih i odlaznih procedura [10].

Iz priloženog je vidljivo kako sustav sadrži sve potrebne informacije za odrađivanje leta što značajno smanjuje vrijeme potrebne pripreme za let kao i potrebe za nošenjem razne dokumentacije i karata.

Slika 15 prikazuje višenamjenski prikaznik s otvorenom stranicom pokretne navigacijske karte.



Slika 15. Višenamjenski prikaznik

4.1.3. IZVOR NAVIGACIJSKIH PODATAKA

Garmin G1000 primarno koristi satelitski navigacijski sustav za određivanje pozicije i vođenje navigacije, ali također prikuplja podatke i od ostalih radionavigacijskih uređaja te principom utvrđivanja dosljednosti podataka potvrđuje ispravnost funkcioniranja sustava.

Unatoč tome što je satelitski sustav navigacije primaran, pilot ima mogućnost odabira drugog navigacijskog izvora za vođenje navigacije. Također, sustav sam prebacuje navigacijske izvore ako je dostupan točniji način utvrđivanja pozicije, kao primjerice kod preciznog prilaženja.

Sukladno tome, prikaznik bočnog odstupanja od zadane putanje leta (CDI) ima mogućnost prikaza dva izvora informacija, GPS i VOR/LOC (eng. Localizer). CDI

prikaznik je prikazan na primarnom letnom prikazniku, a informacija o izvoru signala prikazana je bojom strelice na skali horizontalnog odstupanja te riječima. Ukoliko CDI koristi GPS kao izvor signala, prikaznik će biti ljubičaste boje te će riječ „GPS“ biti ispisana kraj njega, a ako koristi VOR ili LOC signal, prikaznik će biti zelene boje s riječima „VOR“ ili „LOC“, ovisno o izvoru signala. Slika 16 prikazuje primjer različitih izvora signala prilikom vođenja navigacije. Izgled strelice također pokazuje radi li se o izvoru signala iz navigacijskog prijemnika 1 ili 2 [10].



Slika 16. Prikaz izvora signala na CDI prikazniku

Sustav će automatski prebaciti izvor signala s GPS na LOC ako je:

- instrumentalni prilaz ili prilaz po Localizeru umetnut u aktivni plan leta
- ako je aktivan segment prema preletištu završnog prilaženja (FAF) i zrakoplov se nalazi na manje od 15 nautičkih milja od FAF-a te se kreće prema njemu
- ako je podešena pravilna frekvencija Localizera
- ako je odstupanje CDI prikaznika s GPS izvorom signala manje od 1,2 puta odstupanja pune skale [10]

4.1.4. TOČNOST GPS POZICIONIRANJA

Tijekom jednog standardnog leta od početnog do odredišnog aerodroma, točnost pozicioniranja se mijenja ovisno o fazi leta. Prilikom aktiviranja odlazne procedure, CDI skala će biti automatski podešena na „Odlazna procedura“ (eng. Departure ili DEP) te će maksimalno odstupanje skale iznositi 0,3 NM. Nakon polijetanja, sustav će automatski prebaciti maksimalno odstupanje CDI prikaznika na 1 NM od zadane

crte puta u modu rada „Terminal“ , i to nakon što zrakoplov započne onaj segment odlazne procedure, koji nije poravnat s produženom osi staze s koje je poletio. Na 30 NM od polaznog aerodroma, sustav automatski ulazi u „rutnu“ (eng. En-Route ili ENR) fazu dopuštenih odstupanja koja iznosi 2 NM za puno odstupanje skale CDI-a, osim ako zadnje preletište odlazne procedure nije dalje od 30 NM od aerodroma. U tom slučaju, sustav prelazi na „rutnu“ fazu nakon završetka odlazne procedure. Prilikom dolaska na odredišni aerodrom, unutar 31 NM, sustav postupno smanjuje maksimalno odstupanje na 1 NM kroz 1NM udaljenosti. Ukoliko dolazna procedura započinje ranije od 31 NM, sustav započinje „terminal“ točnost pozicioniranja na prvom preletištu dolazne procedure. Tijekom prilazne faze leta, obično 2 NM prije FAF, sustav dodatno smanjuje dopušteno odstupanje ovisno o zahtjevima procedure. Prilikom izvođenja neuspjelog prilaza, točnost pozicioniranja je kao i kod odlazne procedure, sve dok zrakoplov ne skrene s produžene osi staze za slijetanje kad prelazi na „terminal točnost pozicioniranja [10]. Zahtjevi za maksimalno odstupanje od zadane putanje leta su navedeni u tablici 11.

Tablica 11. Maksimalno odstupanje skale CDI prikaznika ovisno o fazi leta

FAZA LETA	INFORMACIJA NA PRIKAZNIKU	PUNO ODSTUPANJE SKALE CDI-a (NM)
Odlazna	DPRT	0,3
Terminal	TERM	1
Rutna	ENR	2
Oceanska	OCN	2
Neprecizni prilaz	LNAV	1 do visine od 350 FT
Neprecizni prilaz s vertikalnim vođenjem	LNAV+V	
Prilaz (LNAV/VNAV)	L/VNAV	1 i smanjuje se do 0,3
Prilaz (LPV)	LPV	
Neuspjeli prilaz	MAPR	0,3

Izvor: [10]

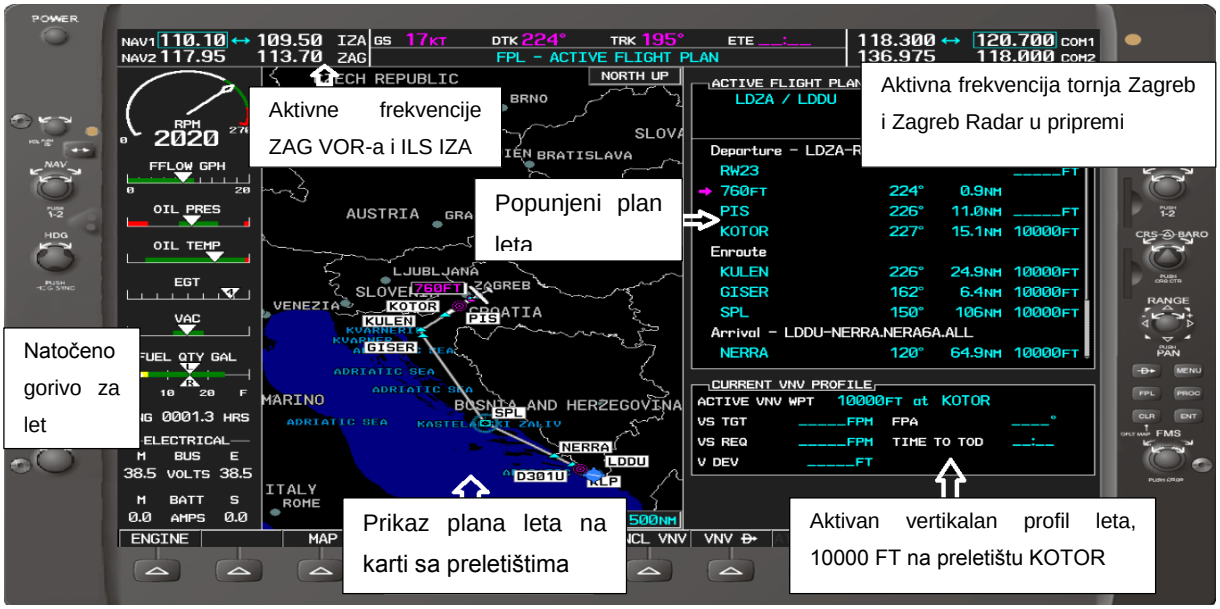
4.2. PRIPREMA SIMULACIJE LETA

Simulacija leta je izvedena u računalnom programu Garmin G1000 Trainer koji posjeduje sve simulirane mogućnosti, kao i stvarni Garmin G1000 sustav na zrakoplovu Cessna 172R te oponaša njegove performanse.

Prije izvođenja simulacije, potrebno je konfigurirati sustav na početne vrijednosti, kao i kod navigacijskog proračuna u poglavlju 3, postavljanjem temperature i referentnog tlaka na početnom aerodromu, upisivanjem vrijednosti vjetra, popunjavanje elektroničkog plana leta i punjenja virtualnog zrakoplova proračunatom količinom goriva.

Zrakoplov je potrebno postaviti na zračnu luku Zagreb upisivanjem GPS koordinata koje su iščitane iz Jeppesen aerodromske karte LDZA te iznose 45^0 44,50′ N i 016^0 04,40′ E.

Nakon postavljanja zrakoplova na polazni aerodrom, potrebno je ispuniti plan leta u navigacijskom sustavu G1000 na višenamjenskom prikazniku. Slika 17 prikazuje višenamjenski prikaznik s ispunjenim planom leta za namjeravanu simulaciju.



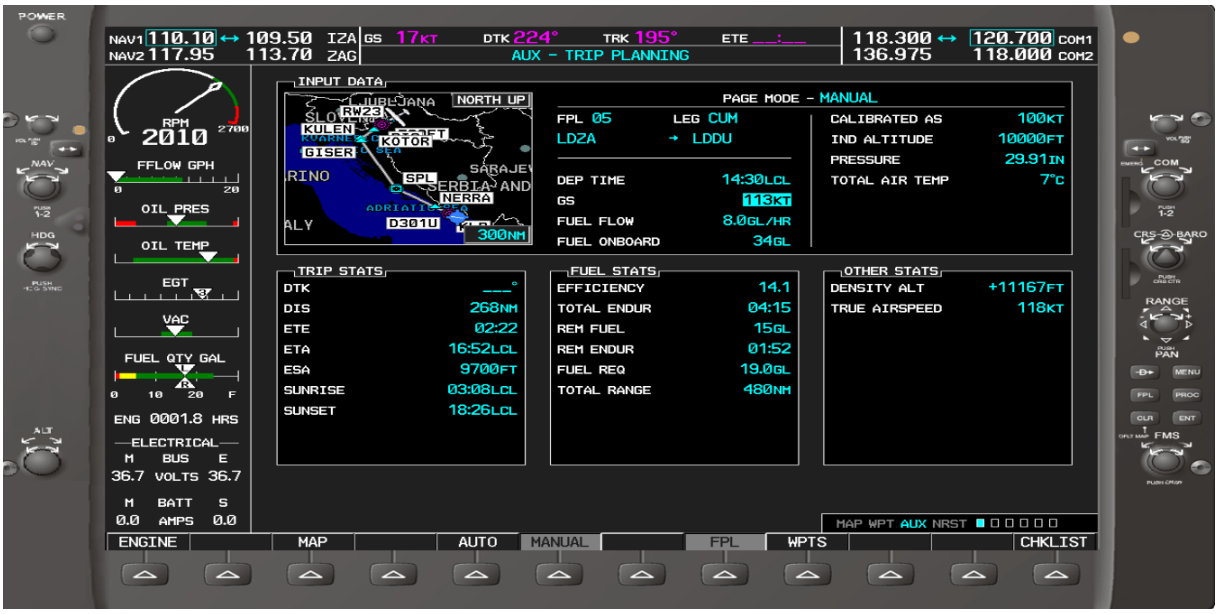
Slika 17. Višenamjenski prikaznik s ispunjenim planom leta

Plan leta je ispunjen upisivanjem polaznog aerodroma, zatim odabiranjem u izborniku odlaznih procedura proceduru KOTOR 2S, s obzirom na to da ista povezuje prvo preletište odabrane rute. Nakon toga su upisana preletišta prema već unaprijed isplaniranoj ruti te su upisane visine na ruti, kao što je i vidljivo na slici 17. Nakon upisivanja rutnog dijela leta, potrebno je odabrati dolaznu proceduru u izborniku dolaznih procedura te je kao što je planirano, odabrana procedura NERRA 6A. Vertikalna navigacija je aktivirana te je kao zadatak postavljen postizanje visine od 10000 stopa na preletištu KOTOR. Spuštanja će se odvijati prema propisanim procedurama, a prilazna procedura se odabire i aktivira tijekom leta. Na slici je također vidljivo, kako je zrakoplov napunjen proračunatom količinom goriva koja iznosi 34 galona, odnosno 17 galona po svakom spremniku.

Nakon ispunjavanja plana leta, potrebno je izvršiti kalkulaciju goriva putem mogućnosti planiranja rute u sklopu višenamjenskog prikaznika. Planiranje se izvodi otvaranjem pomoćne stranice (AUX), u koju se potom unosi već pripremljeni plan

leta. Nakon odabiranja ispunjenog plana leta, ispunjava se vrijeme polijetanja, prosječna putna brzina zrakoplova na ruti, koja u ovom slučaju iznosi 113 čvorova, potrošnja goriva u krstarenju koja iznosi 8 galona po satu te količina goriva na zrakoplovu koja je jednaka proračunatoj, a iznosi 34 galona, pošto je oduzeto gorivo potrebno za voženje. Također se ispunjavaju podatci o indiciranoj brzini tijekom leta, planiranoj visini krstarenja, vanjskoj temperaturi na visini te referentnom tlaku.

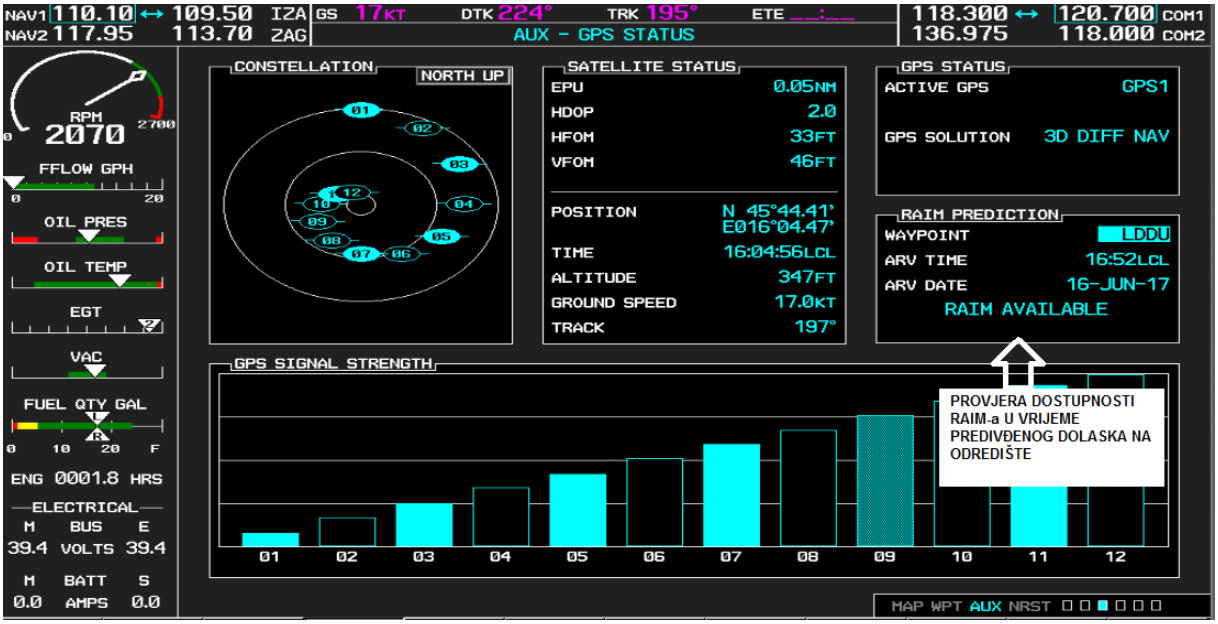
Nakon unesenih podataka, sustav proračunava podatke o planiranom putu kao što su: ukupna dužina rute (DIS), predviđeno vrijeme leta (ETE), predviđeno vrijeme dolaska (ETA), istrajnost zrakoplova u letu (TOTAL ENDUR), preostalo gorivo na destinaciji (REM FUEL), preostalu istrajnost na destinaciji (REM ENDUR), potrebno gorivo za let (FUEL REQ) i ukupan dolet zrakoplova (TOTAL RANGE). Sustav također pruža informaciju o visini po gustoći (DENSITY ALT) za planiranu visinu krstarenja te proračunatu stvarnu brzinu (TRUE AIRSPEED). Slika 18 prikazuje pomoćnu stranicu s proračunatim podatcima o letu.



Slika 18. Planiranje rute G1000 sustavom

Sa slika 17 i 18, vidljivo je kako su proračunati podatci o namjeravanom letu sustavom G1000 vrlo slični onima proračunatim u podnaslovu 2 tijekom navigacijske pripreme leta, uz pojavu manjih odstupanja što je detaljnije obrađeno u poglavlju 4.4.

Prije pokretanja same simulacije potrebno je provjeriti dostupnost RAIM sustava pošto je primarni mod rada G1000 sustava baziran na satelitskoj navigaciji. RAIM (eng. Receiver Autonomus Integrity Monitoring) je algoritam koji je sastavni dio računalnog programa GPS prijemnika. Dio je ABAS (Aircraft-Based Augumentation System) sustava poboljšanja pozicioniranja GPS-a. Koristi se činjenicom da je za određivanje pozicije potrebno 4 vidljiva satelita, a algoritam ih koristi 5 kako bi računao 5 različitih međusobno neovisnih pozicija koristeći razne kombinacije satelita. Ukoliko svih 5 satelita radi ispravno, svih 5 pozicija će se nalaziti unutar 300 metara. Ukoliko neka određena pozicija odstupa od te dozvoljene greške, algoritam automatski detektira koji je satelit u kvaru te obavještava o tome [1]. Kako je za rad RAIM sustava potrebno minimalno 5 vidljivih satelita, potrebno je provjeriti njihovu vidljivost u vrijeme dolaska na odredišni aerodrom. Provjera se vrši ukomponiranim programom u sustav G1000 te je potrebno unijeti predviđeno vrijeme dolaska, na temelju kojeg sustav provjerava vidljivost satelita na nebu za poziciju odredišnog aerodroma.



Slika 19. Provjera dostupnosti RAIM-a na aerodromu dolaska

Nakon provedenih svih navedenih postupaka, sustav je spreman za izvođenje simulacije leta. Važno je napomenuti kako je priprema simulacije leta trajala višestruko kraće od klasične navigacijske pripreme leta, čime izlaze na vidjelo prednosti ovakvog sustava avionike.

Radi lakšeg vođenja i praćenja leta izrađena je tablica 12 koja je korištena tijekom simulacije leta. Sadrži rubrike koje služe za lakše upravljanje letom, kao što su podatci od potrošnji goriva (FF), indiciranoj brzini te vjetru na pojedinom segmentu, pošto je njih potrebno ručno upisivati tijekom leta. Rubrike putna brzina (GS), pravac leta (HDG), kut ispravke (CA), vrijeme provedeno na segmentu rute (ATE) i stvarno vrijeme preleta određenog preletišta (eng. Actual Time of Arrival ili ATA) te preostalo gorivo (FUEL REM).

Popunjena mjesta u tablici služe za vođenje simulacije, dok prazne rubrike služe za praćenje simulacije tijekom leta.

Tablica 12. Tablica praćenja tijeka simulacije leta

Potrošnja goriva (FF)	**Indicirana brzina**	**Vjetar (^{0} /Kn)**	**Segment**	**Putna brzina (GS)**	**Pravac leta (HDG)**	**Kut ispravke (CA)**	**Vrijeme na ruti (ATE)**	**Stvarno vrijeme preleta (ATA)**	**Preostalo gorivo (FUEL REM)**
10,7 gal/h	75 Kn	270/10	LDZA-KOTOR						
8 gal/h	100 Kn	270/10	KOTOR-KULEN						
8 gal/h	100 Kn	250/10	KULEN-GISER						
8 gal/h	100 Kn	245/10	GISER-SPL						
8 gal/h	100 Kn	350/5	SPL-NERRA						
6 gal/h	100 Kn	350/10	NERRA-LDDU						

4.3. SIMULACIJA LETA

Simulacija leta započinje polijetanjem virtualnog zrakoplova u lokalno vrijeme (eng. Local Time ili LT) 14:30. Zrakoplov penje prema prvom preletištu na ruti te prilikom penjanja, sustav koristi opciju vertikalne navigacije (VNAV) kako bi na preletištu KOTOR zrakoplov postigao unaprijed definiranu razinu leta 100 (FL100).

Slika 20 prikazuje primarni letni prikaznik u trenutku penjanja prema preletištu KOTOR. Na slici je također vidljivo kako G1000 sustav nije u mogućnosti prikazati indiciranu brzinu već prikazuje stvarnu brzinu zrakoplova na brzinomjeru, što je slučaj u svim fazama ovog simuliranog leta.



Slika 20. Primarni letni prikaznik za vrijeme penjanja prema preletištu KOTOR

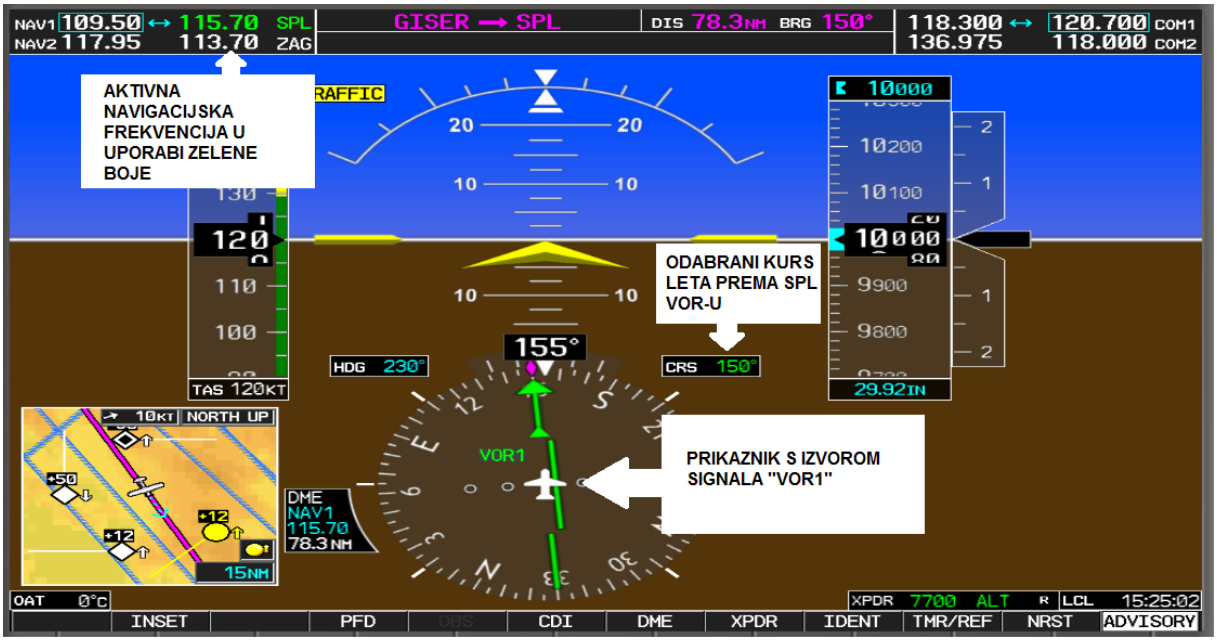
Zrakoplov je preletio preletište KOTOR u 14:53 LT, dosegnuvši razinu leta 100 te je time započeo rutnu fazu leta. Time je točnost prikazivanja ušla u „rutni“ režim. Prilikom preleta preletišta, popisani su podatci o praćenju goriva, dok su podatci o smjeru i putnoj brzini zrakoplova praćeni tijekom cijelog segmenta te upisani u tablicu 13. Zrakoplov ubrzava na stvarnu brzinu leta od 120 čvorova i nastavlja let prema preletištu KULEN.

Slika 21 prikazuje primarni i višenamjenski letni prikaznik na segmentu rute između preletišta KOTOR i KULEN, onako kako ih pilot zrakoplova prati tijekom leta.

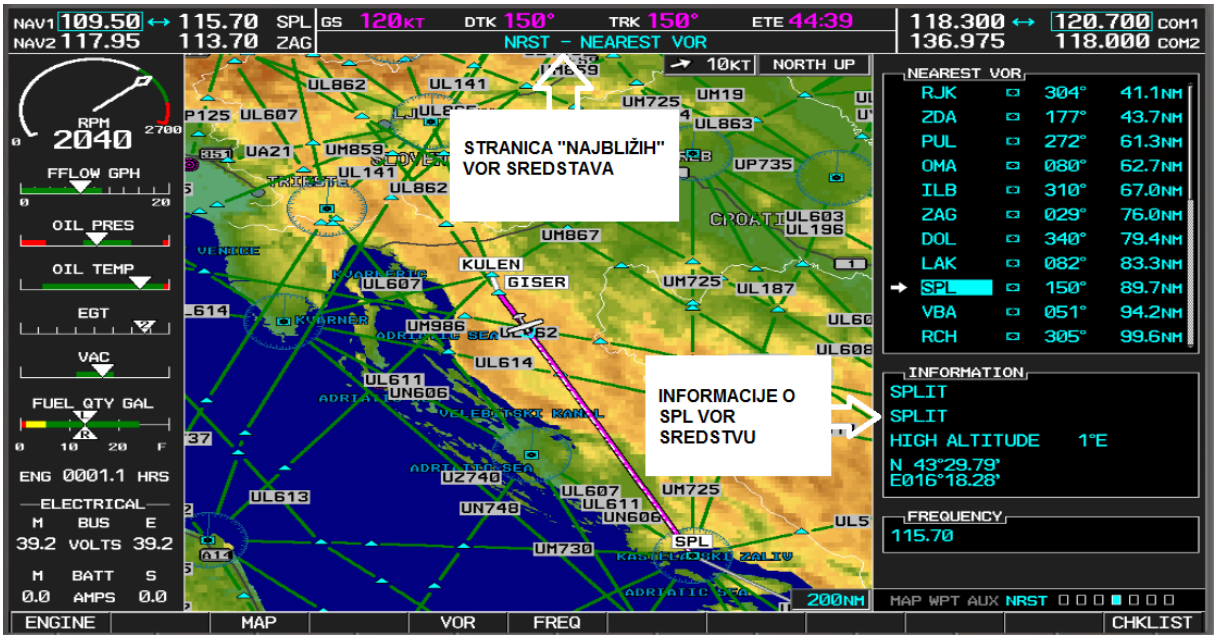


Slika 21. Primarni i višenamjenski letni prikaznik na segmentu rute KOTOR-KULEN

Na slici je vidljiv prikaz podataka putne brzine, smjera vjetra te potrošnje i preostalog goriva, koji su korišteni za izradu tablice 13. Prelet preletišta KULEN je izveden u 15:06 LT te je let nastavljen prema preletištu GISER. Prelet preletišta GISER izveden je u 15:11 LT. Tijekom segmenta rute od preletišta GISER do SPL VOR-a, moguć je bio odabir izvora navigacijskih podataka između leta radijalom samog VOR-a i leta satelitskom navigacijom, kao što je prikazano na slici 22. Na slici je vidljivo kako prilikom prebacivanja izvora signala na VOR, dolazi do odstupanja od definirane putanje leta, iz razloga što je VOR sustav navigacije manje precizan od satelitskog sustava. Slika 23 prikazuje mogućnost pretrage baze podataka G1000 sustava radi pronalaska određene informacije. U ovom slučaju je prikazan podatak o radnoj frekvenciji SPL VOR-a, kako bi je mogli koristiti za navigaciju.



Slika 22. Primarni letni prikaznik s VOR izvorom signala

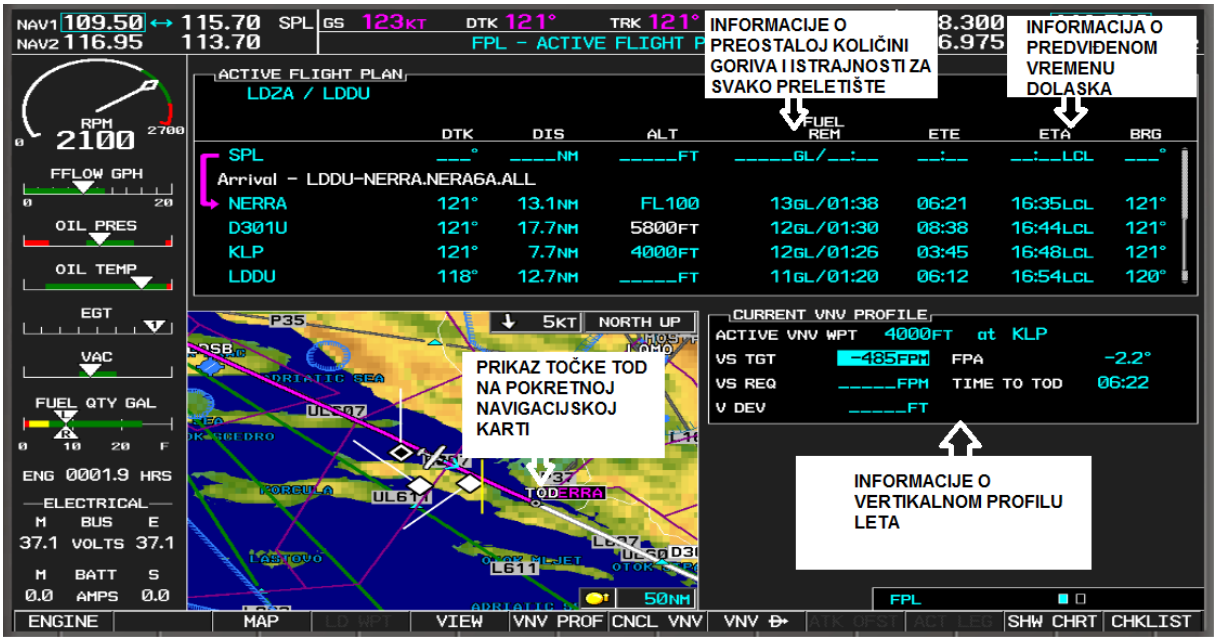


Slika 23. Informacije o SPL VOR-u

U 16:04 LT, preletom SPL VOR-a, započeo je poslijednji rutni segment simuliranog leta. Važno je napomenuti kako G1000 sustav sve zaokrete tijekom leta izvodi kao „Fly-By“, bez preleta preko sredstva i nakonadnog vršenja zaokreta. Sustav je izveden tako da proračunava udaljenost na kojoj treba započeti zaokret, kako bi

standardnim zaokretom izašao na zadanu putanju leta na idućem segmentu rute, bez potrebe preleta preletišta ili radionavigacijskog sredstva. Sustav upozorava pilota 10 sekundi prije početka skretanja na skretanje te odbrojava sekunde do početka skretanja. Nakon što sustav odbroji sekunde do nule, izdaje zapovijed „skreni sad“ (eng. Turn Now).

Kako je segment rute SPL-NERRA zadnji rutni segment potrebno je pripremiti se na skoro spuštanje prema dolaznoj proceduri. Sustav nudi mogućnost planiranja spuštanja uporabom sustava vertikalne navigacije (VNAV). Prilikom planiranja spuštanja, potrebno je unijeti u planu leta visinu na definiranom preletištu prema dolaznoj proceduri te sva ostala ograničenja u smislu minimalnih visina. U slučaju simuliranog leta, potrebno je upisati visinu od 4000 stopa u planu leta kraj NDB KLP radionavigacijskog sredstva, pri čemu sustav automatski računa potrebnu vertikalnu brzinu snižavanja te ucrtava točku početka spuštanja (eng. Top of Descent ili TOD) na pokretnu navigacijsku kartu. Slika 24 prikazuje ucrtanu TOD točku na pokretnoj navigacijskoj karti, zajedno s planom leta. U planu leta je vidljivo kako sustav kontinuirano računa preostalu količinu goriva za sva daljnja preletišta na ruti te predviđena vremena dolaska na iste.



Slika 24. Prikaz planiranja vertikalnog profila leta

Minutu prije dolaska na točku početka spuštanja, sustav je izdao upozorenje na skori početak spuštanja te se na primarnom letnom prikazniku pojavio prikaznik vertikalnog odstupanja od planiranog vertikalnog profila. Preletom preletišta NERRA u 16:36 LT, koja je ujedno i točka početka spuštanja, započeo je dolazni segment rute prilikom čega sustav automatski započinje sa strožim „terminal“ režimom pozicioniranja. Slika 25 prikazuje izgled primarnog letnog prikaznika prilikom korištenja vertikalne navigacije za vrijeme spuštanja na dolaznom segmentu rute.



Slika 25. Prikaz VNAV vođenja zrakoplova na primarnom letnom prikazniku

Let je završen izvođenjem prilazne procedure „ILS 12“ na zračnoj luci Dubrovnik u 16:54 LT. Tijekom leta vođeni su podatci o pravcu leta, putnoj brzini, kutu ispravke, vremenu provedenom na ruti, stvarnom vremenu preleta i stanju goriva. Podatci su radi lakšeg praćenja popisani utablici 13 koja je pripremljena za vrijeme pripreme simulacije leta.

Tablica 13. Podatci dobiveni putem simulacije leta

Potrošnja goriva (FF)	**Indicirana brzina**	**Stvarna brzina**	**Vjetar (^{0} /Kn)**	**Segment**	**Putna brzina (GS)**	**Pravac leta (HDG) (^{0})**	**Kut ispravke (CA) (^{0})**	**Vrijeme na ruti (ATE)**	**Stvarno vrijeme preleta (ATA)**	**Preostalo gorivo (FUEL REM)**
10,7 gal/h	75 Kn	83 Kn	270/10	LDZA-KOTOR	75 Kn	231	5 D	23	14:53	30 gal
8 gal/h	100 Kn	120 Kn	270/10	KOTOR-KULEN	113 Kn	229	3 D	13	15:06	27 gal
8 gal/h	100 Kn	120 Kn	250/10	KULEN-GISER	119 Kn	167	5 D	5	15:11	26 gal
8 gal/h	100 Kn	120 Kn	245/10	GISER-SPL	120 Kn	155	5 D	53	16:04	20 gal
8 gal/h	100 Kn	120 Kn	350/5	SPL-NERRA	123 Kn	119	2 L	32	16:36	16 gal
6 gal/h	100 Kn	120 Kn	350/10	NERRA-LDDU	126 Kn	117	4 L	18	16:54	13 gal

4.4. ANALIZA PODATAKA DOBIVENIH PUTEM SIMULACIJE LETA

Prilikom izvođenja simulacije leta, vođeno je kontinuirano bilježenje podataka bitnih za navigacijsko vođenje leta kako bi se mogla izvršiti usporedba podataka dobivenih putem simulacije leta i navigacijske pripreme.

Tablica 14 prikazuje usporedbu proračunate putne brzine putem navigacijske pripreme leta i izmjerene putne brzine, dobivene putem simulacije leta.

Tablica 14. Usporedba putnih brzina dobivenih putem navigacijske pripreme leta i simulacije leta

SEGMENT	PRORAČUNATA PUTNA BRZINA LETA (Kn)	IZMJERENA PUTNA BRZINA LETA (Kn)
LDZA-KOTOR	76	75
KOTOR-KULEN	113	113
KULEN-GISER	120	119
GISER-SPL	120	120
SPL-NERRA	125	123
NERRA-LDDU	127	126

Iz prikazane tablice, može se uočiti kako u većini segmenata dolazi do odstupanja u proračunatim i simuliranim putnim brzinama. Do odstupanja od jednog čvora dolazi na segmentima LDZA-KOTOR, KULEN-GISER te NERRA-LDDU pri čemu je u svim slučajevima proračunata brzina veća za jedan čvor od izmjerene. Na segmentu rute SPL-NERRA, odstupanje iznosi dva čvora pri čemu je proračunata brzina veća za 2 čvora od stvarne brzine.

Sljedeća usporedba se odnosi na proračunate i izmjerene kutove ispravke i pravce leta, a njihov je odnos prikazan tablicom 15.

Tablica 15. Prikaz proračunatih i izmjerenih vrijednosti kuta ispravke i pravca leta

SEGMENT	PRORAČUNATI KUT ISPRAVKE (^{0})	IZMJERENI KUT ISPRAVKE (^{0})	PRORAČUNATI PRAVAC LETA (^{0})	IZMJERENI PRAVAC LETA (^{0})
LDZA-KOTOR	6 D	5 D	232	231
KOTOR-KULEN	4 D	3 D	230	229
KULEN-GISER	5 D	5 D	166	167
GISER-SPL	5 D	5 D	155	155
SPL-NERRA	2 L	2 L	117	119
NERRA-LDDU	4 L	4 L	117	117

Prikazane vrijednosti u tablici prikazuju kako je na 4 segmenta rute došlo do odstupanja u proračunatim i izmjerenim vrijednostima kutova ispravke i pravca leta. Do odstupanja od jednog stupnja kuta ispravke i pravca leta, dolazi na segmentima LDZA-KOTOR te KOTOR-KULEN, dok do odstupanja u pravcima leta uz isti kut ispravke dolazi na segmentima KULEN-GISER, pri čemu odstupanje iznosi jedan stupanj te SPL-NERRA, gdje odstupanje iznosi 2 stupnja.

Tablica 16 prikazuje proračunato sektorsko vrijeme koje je provedeno na segmentu rute i izmjereno vrijeme putem simulacije te proračunato i stvarno izmjereno potrošeno gorivo.

Tablica 16. Usporedba proračunatih i izmjerenih podataka o vremenu provedenom na segmentu rute i proračunatom gorivu

SEGMENT	**PRORAČUNATO SEKTORSKO VRIJEME (MIN)**	**IZMJERENO SEKTORSKO VRIJEME (MIN)**	**PRORAČUNATO PREOSTALO GORIVO PO SEGMENTU RUTE (GAL)**	**IZMJERENO PREOSTALO GORIVO PO SEGMENTU RUTE (GAL)**
LDZA-KOTOR	22	23	29,4	30
KOTOR-KULEN	13	13	27,7	27
KULEN-GISER	4	5	27,2	26
GISER-SPL	53	53	20,1	20
SPL-NERRA	31	32	16	16
NERRA-LDDU	18	18	13,6	13

Odstupanje od jedne minute u sektorskim vremenima vidljivo je na segmentima LDZA-KOTOR, KULEN-GISER, SPL-NERRA, dok je odstupanje u količini goriva vidljivo na svim segmentima rute.

5. ZAKLJUČAK

Primjena metode prostorne navigacije prilikom planiranja i izvedbe leta donosi brojne prednosti, od kojih su istaknute smanjenje vremena potrebnog za izvršenje navigacijske pripreme leta te smanjeno radno opterećenje pilota prilikom izvođenja samog leta. Nakon provedene usporedbe podataka dobivenih putem klasične navigacijske pripreme i putem simulacije leta uporabom sustava prostorne navigacije, uočena su manja odstupanja u proračunatim podatcima. Odstupanja u brzinama iznose maksimalno 2 čvora, što je posljedica zaokruživanja vrijednosti upadnih kutova vjetra u odnosu na zrakoplov, posebice kada se radi o upadnim kutovima koji graniče između dvije vrijednosti zaokruživanja. Odstupanja u kutevima ispravke dolaze iz istog razloga te se mogu smatrati zanemarivima, pošto je u samom letu izrazito teško držati pravac leta unutar jednog stupnja, posebice ako se radi o zrakoplovima opremljenima klasičnim analognim mehaničkim sustavima avionike koji i sami griješe više od navedenih pogrešaka. U slučaju kad se kutovi ispravke ne razlikuju, a pravci leta razlikuju, do odstupanja dolazi zbog razlike u izračunu kurseva leta između klasičnih instrumentalnih navigacijskih karata i sustava prostorne navigacije. Kako su sektorska vremena vezana za putnu brzinu, vidljivo je kako u nekim segmentima rute dolazi do pogreške od jedne minute. Proračun goriva ukazuje na odstupanja koja maksimalno iznose 0,6 galona, no do njih najvjerojatnije dolazi zbog nemogućnosti točnog iščitavanja preostale količine goriva u spremnicima zrakoplova, iz razloga što je količina goriva prikazana simbolički, a ne točnim iznosom.

Iz svega navedenog, može se zaključiti kako je klasična navigacijska priprema dovoljno dobra za izvršenje letova te da bez problema može konkurirati suvremenim računalnim navigacijskim sustavim, ako se dovoljno precizno izradi. Prednost suvremenih navigacijskih sustava koji koriste metode prostorne navigacije, nalazi se u smanjenom potrebnom vremenu planiranja leta, što izrazito pogoduje komercijalnim zračnim prijevoznicima te u povećanoj navigacijskoj točnosti, što otvara brojne mogućnosti povećanja kapaciteta zračnih prostora i putova.

LITERATURA

[1] Novak, D., Zrakoplovna prostorna navigacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[2] RNP special operational requirements study group, Performance-based navigation manual, Doc 9613, Working Draft 5.1-FINAL, 2007.

[3] Institut für Luft-und Raumfahrt, http://www.ff.tu-berlin.de/menue/forschung/aktuelle_projekte/rf_to_xls/, (pristupljeno: lipanj 2017.)

[4] Seneca V.uk- Navigation Specifications, http://www.senecav.uk/pbn-training/principles-of-pbn-and-rnav/navigation-functions/, (pristupljeno: lipanj 2017.)

[5] Eurocontrol, http://www.eurocontrol.fr/projects/ipas/faq_fichiers/ipas_new_features/UR478.html, (pristupljeno: lipanj 2017.)

[6] Grozdanić, B.; Hegeduš, M.: Zrakoplovna navigacija I: kompasna navigacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1995.

[7] : Jeppesen Mobile Flight Deck, (pristupljeno: lipanj 2017.)

[8] Hrvatska kontrola zračne plovidbe, http://met.crocontrol.hr/web/guest/opmet-croatia, (pristupljeno: lipanj 2017.)

[9] Pilot's Operating Handbook and FAA Approved Airplane Flight Manual,The Cessna Aircraft Company, Revision 9-19, 2004

[10] Garmin G1000 Integrated Flight Deck Pilots's Guide for Cessna NAV III, 190-00498-07 Rev. A

POPIS SLIKA

Slika 1. RNAV i RNP specifikacije ovisno o operacijama za koje su predviđene 7
Slika 2. RNAV sustavi na zrakoplovu 9
Slika 3. Primjer zakrivljene putanje leta s konstantnim polumjerom zakrivljenosti 13
Slika 4. Primjer FRT zakrivljene putanje leta, [4] 14
Slika 5. Fly-By zaokret u odnosu na konvencionalni 15
Slika 6. Prikaz RNP "Fly-By" ulaska u krug čekanja, [2] 15
Slika 7. Prikaz izmaknute putanje leta, [2] 16
Slika 8. Prikaz odabrane rute na karti donjih zračnih puteva 18
Slika 9. SID KOTOR 2S i STAR NERRA 7A, [7] 19
Slika 10. METAR izvješće, [8] 21
Slika 11. Karta značajnog vremena, [8] 22
Slika 12. Karta vjetrova, [8] 22
Slika 13. Shematski prikaz povezanosti dijelova sustava Garmin G1000 42
Slika 14. Primarni letni prikaznik 44
Slika 15. Višenamjenski prikaznik 46
Slika 16. Prikaz izvora signala na CDI prikazniku 47
Slika 17. Višenamjenski prikaznik s ispunjenim planom leta 50
Slika 18. Planiranje rute G1000 sustavom 51
Slika 19. Provjera dostupnosti RAIM-a na aerodromu dolaska 52
Slika 20. Primarni letni prikaznik za vrijeme penjanja prema preletištu KOTOR 54
Slika 21. Primarni i višenamjenski letni prikaznik na segmentu rute KOTOR-KULEN 55
Slika 22. Primarni letni prikaznik s VOR izvorom signala 56
Slika 23. Informacije o SPL VOR-u 56
Slika 24. Prikaz planiranja vertikalnog profila leta 57
Slika 25. Prikaz VNAV vođenja zrakoplova na primarnom letnom prikazniku 58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zahtjevi za navigacijsku opremu prema PBN konceptu 5
Tablica 2. Kurs leta i udaljenost po segmentima rute 24
Tablica 3. Aproksimacija upadnog kuta vjetra i vrijednost trigonometrijskih funkcija .27
Tablica 4. Prikaz kutova zanošenja, ispravke, pravca leta i putne brzine za sve segmente rute.....31
Tablica 5. Vrijeme, gorivo i udaljenost za penjanje pri masi zrakoplova od 2450 lb ..32
Tablica 6. Sektorska vremena za svaki segment rute.....34
Tablica 7. Performanse krstarenja.....35
Tablica 8. Potrebno gorivo po segmentima rute 36
Tablica 9. Prikaz ukupnog goriva potrebnog za let 38
Tablica 10. Navigacijski plan leta.....40
Tablica 11. Maksimalno odstupanje skale CDI prikaznika ovisno o fazi leta 49
Tablica 12. Tablica praćenja tijeka simulacije leta 53
Tablica 13. Podatci dobiveni putem simulacije leta 59
Tablica 14. Usporedba putnih brzina dobivenih putem navigacijske pripreme leta i simulacije leta 60
Tablica 15. Prikaz proračunatih i izmjerenih vrijednosti kuta ispravke i pravca leta ...61
Tablica 16. Usporedba proračunatih i izmjerenih podataka o vremenu provedenom na segmentu rute i proračunatom gorivu 62