

# Proračun elemenata 4D putanje leta zrakoplova u prilazu za slijetanje

---

Oroz, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

*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:119:898283>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Matej Oroz**

**PRORAČUN ELEMENATA 4D PUTANJE LETA ZRAKOPLOVA U  
PRILAZU ZA SLIJETANJE**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2015.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**PRORAČUN ELEMENATA 4D PUTANJE LETA ZRAKOPLOVA U  
PRILAZU ZA SLIJETANJE**

**4D TRAJECTORY ELEMENT ANALYSIS OF AN AIRCRAFT IN  
APPROACH**

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

Student: Matej Oroz, 0135228988

Zagreb, 2015.

## **SAŽETAK**

Završni rad uvodno daje pregled osnovnih načela koncepta 4D putanja, odnosno operacija zasnovanih na putanjama zrakoplova (eng. Trajectory Based Operations ili TBO) s naglaskom na: 1. upravljanje poslovnim putanjama i 2. upravljanje letom. Ukratko je prezentiran projekt SESAR kojim se koncept 4D putanja uvodi u primjenu u zračnom prostoru EU s naglaskom na izazove, posebice u segmentu razvoja novih tehnoloških rješenja i široke primjene 4D putanja kao preduvjeta za postizanje željenog cilja. Na primjeru rješenja koje se koristi u zračnoj luci Beijing Capital opisan je jedan od načina primjene koncepta 4D putanja u prostoru prilazne kontrole. Dan je pregled različitih vrsta prilaza za slijetanje i uvid u koncept vertikalne navigacije.

U okviru završnog rada načinjeni su proračuni elemenata leta za dva prilaza uzletno-sletnoj stazi 23 na Međunarodnoj zračnoj luci Pleso navođena Globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (engl. Global Navigation Satellite System ili GNSS) od kojih je jedan simulacija preciznog instrumentalnog prilaza, a drugi simulacija nepreciznog instrumentalnog prilaza te je analizirana usklađenost putanja provedenih letova s idealnom putanjom. Proračuni su izrađeni korištenjem Microsoft Excel programa, a kao ulazni podaci korišteni su zapisi o letovima iz GPS uređaja. Prezentiran je sam proračun kao i rezultati analize odstupanja zadanih letova od idealne putanje te zaključak o mogućnosti korištenja GNSS sustava kao alternative/nadopune zemaljskim navigacijskim uređajima.

Ključne riječi: 4D putanje; prilaženje na slijetanje, vertikalna navigacija

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Primjena 4D koncepta u zračnom prostoru .....	3
2.1 Koncept 4D putanja.....	5
2.1.1. Upravljanje putanjama .....	6
2.1.2. Upravljanje letom .....	7
2.2. Izazovi u realizaciji projekta .....	8
2.2.1. Razvoj tehnologije .....	8
2.3.2. Usvajanje promjena u načinu obavljanja posla .....	10
2.3.3. Uočavanje konfliktnih situacija.....	10
2.3.4. Prekid u radu sustava za podršku poslovnom procesu .....	10
3. Model primjene koncepta 4D putanja u prostoru prilazne kontrole .....	11
3.1. Struktura Point Marge sustava.....	12
3.2 Upravljanje prilazom temeljeno na PM sustavu .....	13
4. Prilaženje za slijetanje.....	16
4.1 Vrste prilaza.....	16
4.2. Vertikalna navigacija .....	17
5. Proračun elemenata leta i analiza odstupanja 4D putanje u prilazu .....	19
5.1. Proračun elemenata leta i određivanje idealne putanje.....	20
5.1.1. Konverzija koordinata iz sfernog u kartezijev koordinatni sustav.....	21
5.1.2. Određivanje najmanje prostorne udaljenosti točke od idealne putanje .....	22
5.1.3. Određivanje x,y,z koordinata točaka idealne putanje i konverzija u sferni sustav .....	22
5.1.4. Određivanje vertikalnog i horizontalnog odstupanja.....	23
5.2. Analiza odstupanja od idealne putanje .....	24
6. Zaključak .....	28
LITERATURA .....	29
POPIS KRATICA.....	31
POPIS SLIKA.....	33
PRILOG - CD Proračuni .....	34

## 1. Uvod

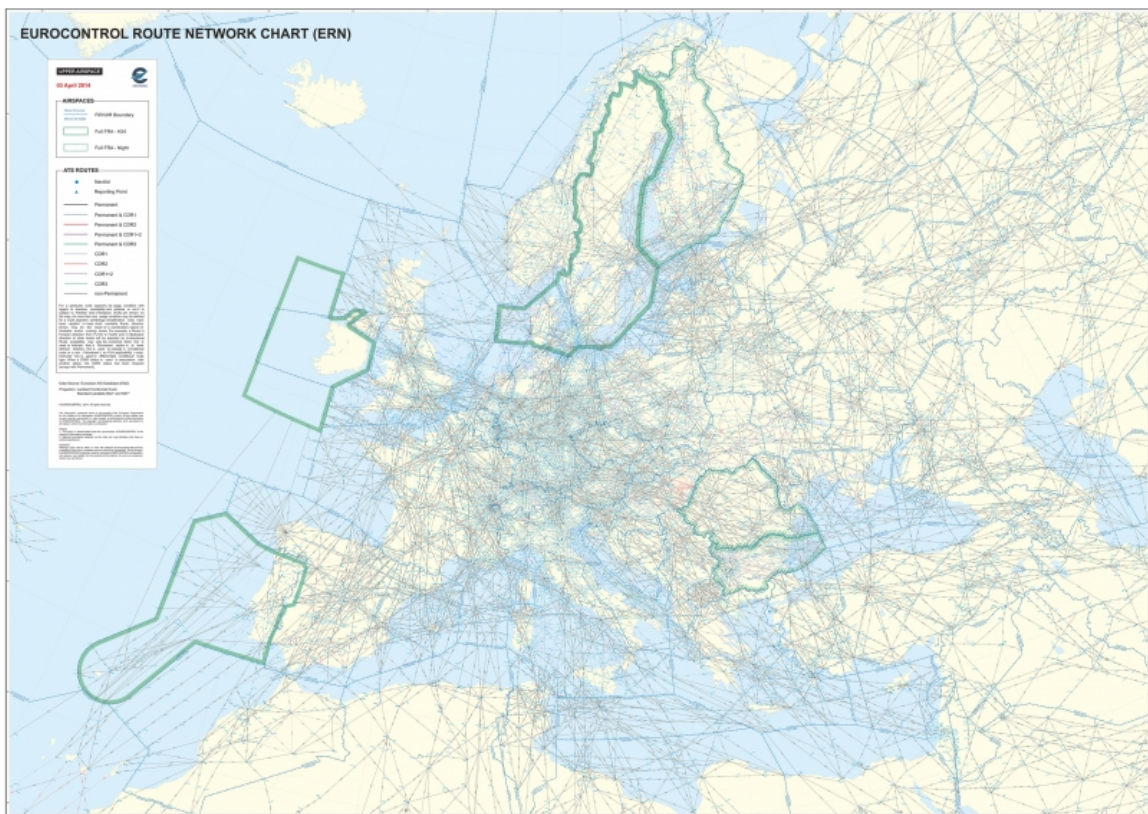
U okviru završnog rada načinjeni su proračuni elemenata leta te su određena vertikalna i horizontalna odstupanja od proračunate idealne putanje za dva prilaženja uzletno-sletnoj stazi 23 na Međunarodnoj zračnoj luci Pleso. Analizirana prilaženja navođena su Globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (engl. Global Navigation Satellite System ili GNSS), a predstavljaju simulaciju letova navođenih sustavom za instrumentalno slijetanje od kojih je jedan precizni instrumentalni prilaz (engl. Precision Approach ili PA), a drugi neprecizni (engl. Non-Precision Approach ili NPA). Usporedbom izračunatih vertikalnih i horizontalnih odstupanja od idealne putanje željelo se zaključiti da li su letovi navođeni GNSS sustavom u skladu s propisanim zahtjevima za završnu fazu leta. U svrhu provjere navedene usklađenosti izrađeni su vlastiti proračuni korištenjem Microsoft Excel programa.

U poglavlju pod nazivom Primjena 4D koncepta u zračnom prostoru dan je pregled osnovnih načela koncepta 4D putanja, odnosno operacija zasnovanih na putanjama zrakoplova (engl. Trajectory Based Operations ili TBO) s naglaskom na: 1. upravljanje poslovnim putanjama i 2. upravljanje letom. Ukratko je prezentiran projekt SESAR kojim se koncept 4D putanja uvodi u primjenu u zračnom prostoru EU s naglaskom na izazove, posebice u segmentu razvoja novih tehnoloških rješenja i široke primjene 4D putanja kao preduvjeta za postizanje željenog cilja. U poglavlju pod nazivom Model primjene koncepta 4D putanja u prostoru prilazne kontrole opisan je jedan od načina ove primjene, a na primjeru rješenja koje se koristi u zračnoj luci Beijing Capital. Arhitektura sustava se temelji na strukturi u kojoj se putanje stapaju u točku (engl. Point Merge ili PM), a novi pristup u optimiranju slijetanja velikog broja zrakoplova na *multi-agent* tehnici, koja omogućava izradu plana za određivanje redosljednih putanja i dolaska u točku stapanja bez konfliktnih točaka. U poglavlju Prilaženje za slijetanje dan je pregled različitih vrsta prilaženja i uvid u koncept vertikalne navigacije. U poglavlju Proračun elemenata leta i analiza odstupanja 4D putanje u prilazu prezentiran je dijagram toka prema kojem su proračun i analiza provedeni te su opisani svi koraci: određivanje početne i krajnje točke dijelova leta za koje će se provesti proračun i analiza, konverzija pozicija zapisanih letova iz sfernog u kartezijev koordinatni sustav, određivanje x,y,z koordinata idealne putanje i konverzija u sferni sustav, određivanje vertikalnog i

horizontalnog odstupanja letova od idealne putanje te usporedba izračunatih odstupanja s RNP APCH zahtjevima. U poglavlju Zaključak dan je kratki osvrt na najvažnije dijelove rada, procjena značaja dobivenih rezultata proračuna te prijedlozi za poboljšanja.

## 2. Primjena 4D koncepta u zračnom prostoru

Prijevoz zračnim prometom predstavlja kamen temeljac svjetske ekonomije. Kontinuiran rast zračnog prometa je neophodan u podržavanju rasta ekonomije, kao i općeg razvoja društva. Prema predviđanjima već danas gust i kompleksan zračni promet (slika 1) u Europi će se u sljedećih dvadeset godina udvostručiti.



Slika 1 Karta mreže zračnih ruta [1]

Današnja kontrola zračnog prometa oslanja se na izvršnog kontrolora koji u stvarnom vremenu izbjegava konflikte u svom sektoru, a da pri tome nema uvijek uvid na utjecaj na sektore u koje određeni let tek treba ući te na kapacitet koji će isti zauzeti. I danas se, naravno, koriste planirane putanje generirane u IT sustavima kako bi se predvidio let zrakoplova i uočili možebitni konflikti, no pogled seže kojih 20 minuta unaprijed. Operativne (real time) promjene ne uzimaju u obzir utjecaj koji će imati na cijelu putanju leta, a službe za upravljanje protokom prometa unaprijed mogu reagirati samo u smislu regulacija, reaktivnog alata koji generira kašnjenja. Dodatno, sektorski orijentiran pristup zahtjeva velik broj kontrolorskih naloga koje je u jednu ruku teško koordinirati i povećavaju radno opterećenje,



a u drugu pretjerano opterećuju frekvenciju i time predstavljaju ograničavajući faktor za kapacitet sektora.

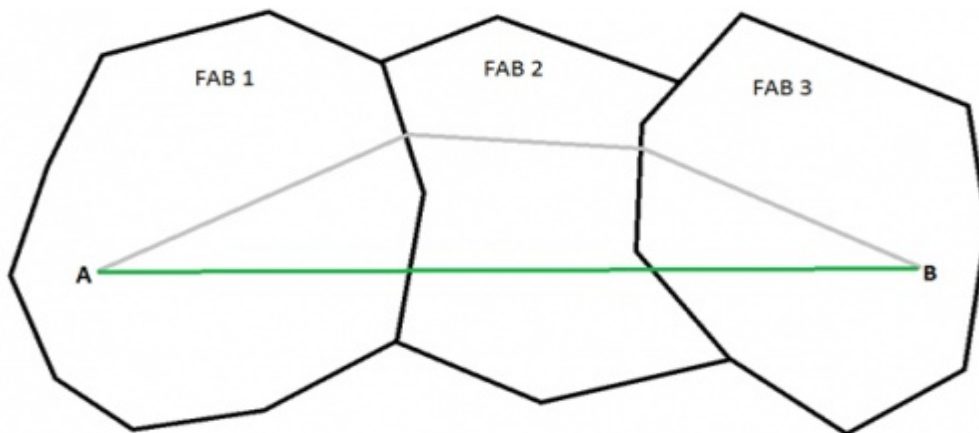
Nehomogenost europskog zračnog prostora s jedne strane i zastarjela oprema koja se koristi za upravljanje zračnim prometom s druge ne mogu odgovoriti zahtjevima poslovnog procesa i upravljati zračnim prometom na optimalan način. Da bi se udovoljilo povećanoj potražnji za kapacitetom u zračnom prostoru određene veličine potrebno je napraviti korjenite promjene u sustavu kontrole i upravljanja prometom.

Odgovor na rješenje problema EU pronalazi u konceptu jedinstvenog europskog neba (engl. Single European Sky ili SES) i uvođenju u primjenu koncepta 4D ruta. Koncept 4D ruta pristupa kontroli zračnog prometa na nov način te 4D putanje predstavljaju revolucionarnu metodu u kojoj se vrijeme gleda kao dodatna dimenzija. Pilot dobiva uputu o vremenu u kojem se od njega očekuje da bude iznad određene točke. Pridržavanje zadanog vremena zadaća je pilota i svako odstupanje predstavlja ozbiljno ugrožavanje sigurnosti, ekvivalentno neodržavanju zadanog kursa ili razine leta.

U Europi je program modernizacije infrastrukture za upravljanje zračnim prometom povjeren zajedničkom poduzeću SESAR (istraživanje o upravljanju zračnim prometom jedinstvenog europskog neba) osnovanom 2007. Projekt SESAR je usmjeren na razvoj novog sustava za upravljanje zračnim prometom (engl. Air Traffic Management ili ATM) koji će biti u mogućnost osigurati siguran i redovit promet u Europi u narednih trideset godina [2].

Smanjena rascjepkanost zračnog prostora povećava njegov kapacitet i učinkovitost upravljanja zračnim prometom. Izravnije putanje imaju za posljedicu kraće vrijeme leta, manja kašnjenja, uštede u gorivu te smanjene emisije štetnih plinova. Jedino široka primjena 4D koncepta u zračnom prostoru omogućila bi let po, gotovo u potpunosti, neograničenoj, slobodnoj putanji, uzimajući u obzir da za uzvrat zrakoplov leti visokom točnošću po određenim točkama u zadano vrijeme. Učinkovitost je, međutim značajno smanjena ukoliko je primjena 4D koncepta djelomična, tj. ukoliko je samo dio putanje podložan novom konceptu upravljanja zrakoplovom, odnosno operacijama zasnovanim na putanjama zrakoplova (engl. Trajectory Based Operations ili TBO). Potencijalne dobrobiti su ograničene ukoliko se samo dio putanje optimizira jer, osim što je sami optimizirani dio putanje kraći, neoptimizirani dijelovi prije TBO dijela putanje imaju velik utjecaj na provedbu planiranog leta koji je izrazito teško predvidjeti. Pozitivni utjecaji TBO-a su smanjeni ukoliko

je primjena ograničena na samo jedan funkcionalni blok zračnog prostora (engl. Functional Airspace Block ili FAB).



Slika 2 Putanje leta u zračnom prometu podijeljenom na FAB-ove [3]

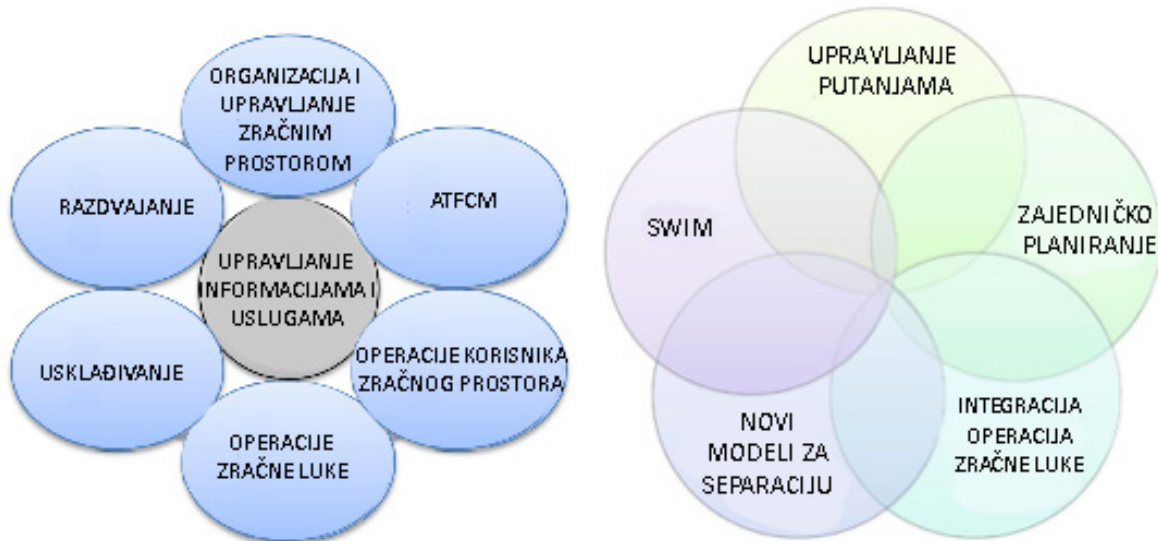
Dijelovi putanje optimalni za promet u svakom od uključenih funkcionalnih blokova ne rezultiraju optimalnom putanjom cjelokupnog leta koja se može postići izravnim povezivanjem ishodišta sa željenom ciljnom točkom (slika 2). Veća rascjepkanost zračnog prostora, posebice za letove koji prelijeću veći broj FAB-ova ili prostora kontroliranih od strane više nezavisnih centara za upravljanje zračnim prometom (eng. Air Navigation Service Provider ili ANSP) koji nisu članovi FAB-ova dodatno smanjuje mogućnost ostvarivanja optimalne rute.

*Napomena:* Željena 4D putanja ne mora nužno odgovarati ortodromi koja povezuje polazišnu i odredišnu točku. Kako bi u fazi leta na ruti iskoristio ledni vjetar operater može planirati rutu koja je više desetaka nautičkih milja dulja od najkraće putanje [3].

## 2.1 Koncept 4D putanja

Primarni problem postojećeg ATM sustava je nemogućnost strateškog planiranja letova. Novi koncept bazira se na mogućnosti preciznijeg predviđanja 4D putanja koje, kroz proces međusobnog usuglašavanja, zajednički definiraju korisnici zračnog prostora, operateri aerodroma i pružatelji usluga u zračnoj plovidbi. Rezultat je tzv. poslovna putanja (engl. Business Trajectory ili BT) definirana kao niz 4D točaka (3D + vrijeme) koje nadzire i kojima upravlja 4D navigacija. Temeljno načelo SESAR koncepta je upravljanje putanjama (engl.

Trajectory Management ili TM), odnosno poslovni proces u kojem se optimalne poslovne putanje zrakoplova definiraju i modificiraju u postupku međusobnog usuglašavanja svih uključenih sudionika (engl. Collaborative Decision Making ili CDM). Razliku čine konfliktne situacije u kojima sudjeluju isključivo kontrolori leta i piloti.



Slika 3 Postojeći i novi koncept upravljanja zračnim prometom [4]

Novi koncept upravljanja zračnim prometom koristi operacije zasnovane na putanjama zrakoplova TBO.

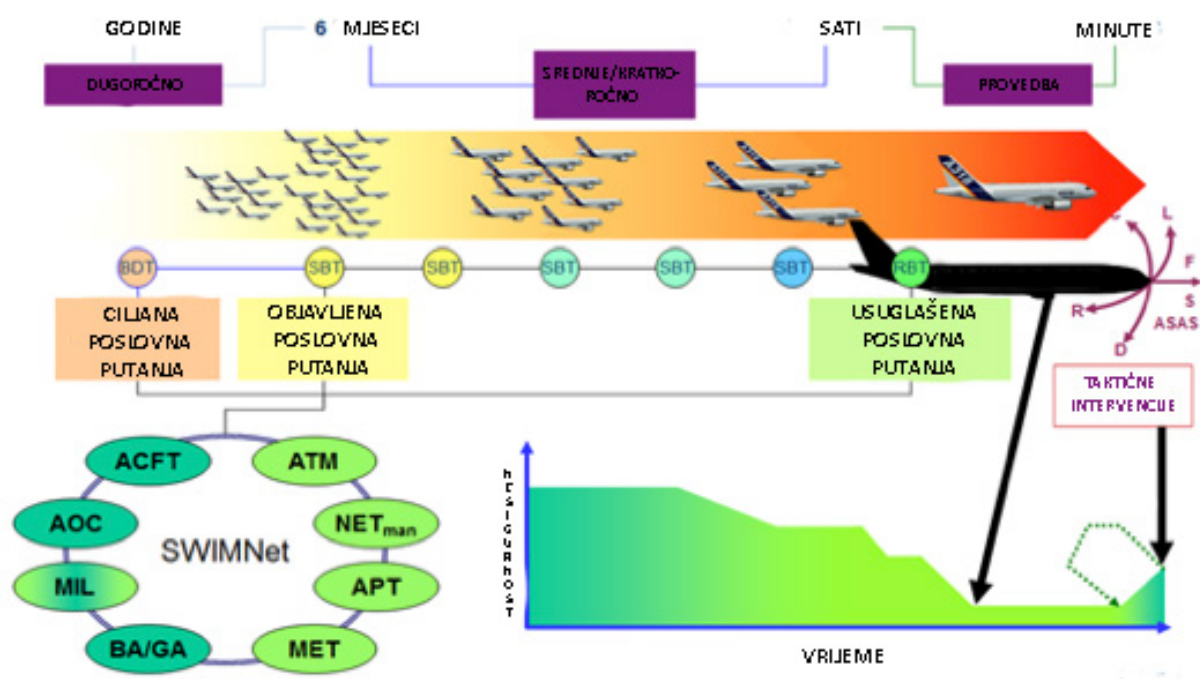
### 2.1.1. Upravljanje putanjama

Proces planiranja poslovne putanje započinje s izradom, od strane korisnika zračnog prostora, željenog plana leta, a završava s uspješnim dolaskom u određenu zračnu luku. Proces kreiranja poslovne putanje (slika 4) može se podijeliti u 3 faze:

- **Ciljana poslovna putanja** (engl. Business Development Trajectory ili BDT) – proces dugoročnog planiranja s ciljem izrade plana leta ili alociranja resursa kojeg provode korisnici zračnog prometa vodeći računa o infrastrukturi i drugim njima poznatim ograničenjima, ali bez obveze informiranja ostalih sudionika;
- **Objavljena poslovna putanja** (engl. Shared Business Trajectory ili SBT) - proces u kojem zračni prijevoznici svoje planove sa željenim putanjama dostavljaju u ATM sustav i u tom času one poprimaju status SBT, jer su raspoložive na uvid svim uključenim korisnicima sustava. Kada se prikupe svi željeni planovi leta za određeni dan, isti se analiziraju od strane sudionika CDM procesa kako bi se stvorili uvjeti za njihovo operativno

provođenje. Ukoliko se uoče bilo kakva ograničenja prijevoznici su o istima informirani i pristupa se postupku modifikacije plana leta u kojem je potrebno riješiti sve uočene konfliktne situacije;

- **Usuglašena poslovna putanja** (engl. Reference Business Trajectory ili RBT) – Proces usuglašavanja završava definiranjem RBT. Radi se o konačnoj putanji, sa stajališta faze planiranja. U danu provedbe pojedini dijelovi leta ponovo se provjeravaju i odobravaju u stvarnom vremenu te je moguća izmjena RBT zbog neplaniranih okolnosti vezanih uz uvjete leta, vremenske prilike, itd. [4]

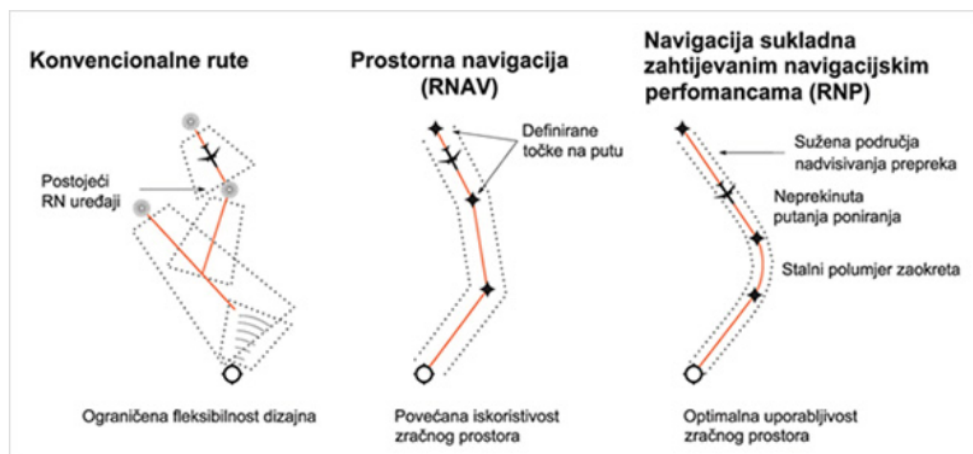


Slika 4 4D putanja kroz proces planiranja i provedbe [5]

### 2.1.2. Upravljanje letom

Upravljanje letom (engl. Flight Management ili FM) odnosi se na funkcionalnost koja osigurava da zrakoplov prati RBT s granicama točnosti specificiranim od strane TM funkcija, odnosno da se zadržava u, za njega, rezerviranom zračnom prostoru. Prilikom definiranja BT sigurnom odvajanju zrakoplova od ostalog prometa posvećuje se velika pažnja. Koliko će zrakoplov biti uspješan u praćenju zadane putanje ovisi o performansama FM sustava. Implementacijom kvalitetnijih FM sustava zahtjevi prema veličini rezerviranog zračnog prostora se smanjuju što rezultira povećanjem ATC kapaciteta.

Osnova za precizno upravljanje letom je odgovarajuća prostorna navigacija (engl. Area Navigation ili RNAV). Za razliku od konvencionalne metode navigacije koja se temelji na korištenju navigacijskih uređaja lociranih na zemlji i u kojoj putanja u potpunosti ovisi o poziciji navigacijskog uređaja, RNAV podrazumijeva navigaciju neovisnu o zemaljskim radionavigacijskim uređajima (slika 5). Oprema instalirana u zrakoplovu automatski određuje poziciju zrakoplova i pilotu prezentira odgovarajuće instrukcije vezane uz putanju. Većina RNAV opreme može generirati signal auto-pilotu koji se temelji na odstupanju trenutne pozicije zrakoplova od željene putanje. Ukoliko navigacijski sustav instaliran u zrakoplovu ima dodatne funkcionalnosti nadzora leta prema zahtijevanim navigacijskim performansama te uzbuđivanja (engl. Required Navigational Performance ili RNP) isti osigurava optimalnu iskoristivost zračnog prostora.



Slika 5 Sadašnji i budući navigacijski koncepti [6]

## 2.2. Izazovi u realizaciji projekta

Pored široke primjene 4D putanja koja je već spomenuta niz je drugih tehničkih, organizacijskih, ekonomskih, političkih/regulatornih izazova ovog projekta od kojih su značajniji navedeni u nastavku [3].

### 2.2.1. Razvoj tehnologije

Implementacija 4D koncepta zahtijeva niz unapređenja postojeće kao i uvođenje u primjenu nove opreme za avione, ANSP-ove i aerodrome od kojih su značajnija:

- Unapređenja sustava za upravljanje letom (engl. Flight Management System ili FMS)

- Zrakoplovi opremljeni sofisticiranim FMS-om imaju mogućnost s velikom točnošću pratiti zadanu putanju, ali mogućnost predviđanja, pogotovo zbog manjkavosti u modelu vremenskih prilika nije na zadovoljavajućoj razini. Nužno je uvesti poboljšanja u FMS-ov sustav za bolje predviđanje i primjenu promjena u okolišu.
- Zemaljski sustavi koriste informacije o putanji dostavljene iz zrakoplova na način da ih integriraju s vlastitim algoritmima što rezultira izrazito točnim proračunima očekivane putanje koju je moguće podijeliti sa susjednim, kao i drugim zainteresiranim, centrima kontrole zračne plovidbe. Ovime se vremenski organičen pogled unaprijed zamjenjuje zajedničkom svijesti o cjelokupnoj putanji. Dodatno, zemaljski sustavi osiguravaju uvid u posljedice mogućih odluka koje se mogu/moraju donijeti u slučaju konflikta te je moguće, ovisno o utjecaju koji svaka pojedina ima na putanju, odabrati onu s najmanjim negativnim utjecajem.
- Uvođenje u primjenu sustava za elektronsku razmjenu podataka zemlja-zrak i zrak-zrak (engl. Controller-Pilot Data-Link Communications ili CPDLC)
  - Glasovna komunikacija, tj. razmjena informacija usmenim putem do sada najrašireniji oblik komunikacije između kontrolora leta i pilota u uvjetima povećanog zračnog prometa pokazuje svoja ograničenja. Zbog toga je Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe (engl. European Organization for the Safety of Air Navigation ili EUROCONTROL) razvila CPDLC sustav za elektronsku razmjenu podataka između kontrolora leta i pilota koja unapređuje poslovni proces – smanjuje radno opterećenje operativnog osoblja te smanjuje broj mogućih grešaka u komunikaciji. Jednoznačno definirane i standardizirane poruke razmjenjuju se putem nezavisnog i sigurnog komunikacijskog kanala te ne postoji rizik njihovog krivog tumačenja.
- Uvođenje u primjenu sustava za upravljanje informacijama (engl. System Wide Information Management ili SWIM)
  - SWIM koncept (uključuje standarde, infrastrukturu, pravila za upravljanje informacijama) donosi ključna poboljšanja u načinu upravljanja informacijama u čitavom europskom sustavu upravljanja zračnim prometom uključujući centre za kontrolu zračne plovidbe, zračne prijevoznike, aerodrome, metreorološke stanice.

Pokriva sve ATM informacije (karakteristike zrakoplova, leta, aerodroma, meteorološke podatke, podatke o protoku zračnog prometa, podatke vezane uz nadzor rada sustava) i osigurava da prava informacija sa zadovoljavajućim statusom kvalitete u pravo vrijeme dođe do prave osobe. Sustav upravlja informacijom tijekom njezinog čitavog životnog ciklusa i osigurava automatiziranu, pouzdanu i neporecivu elektronsku razmjenu podataka između svih zainteresiranih stranaka [7].

### **2.2.2. Usvajanje promjena u načinu obavljanja posla**

Sudionici poslovnog procesa moraju usvojiti novi način obavljanja svojih zadaća. Kontrolori npr. trebaju izdavati naloge vodeći računa o njihovom utjecaju na cjelokupnu putanju dok piloti moraju prihvatiti dodatna ograničenja u svrhu dovođenja zrakoplova u određenu točku u točno definiranom vremenu.

### **2.2.3. Uočavanje konfliktnih situacija**

Trenutna je struktura zračnog prometa takva da se većina konflikata događa u specifičnim točkama (npr. sjecišta zračnih puteva). Uvođenjem operacija temeljenih na poslovnim putanjama zrakoplovi prestaju pratiti do sada ustaljene putanje što znači da točke konflikta neće biti na dosadašnjim čvrstim lokacijama. Ipak, ovo ne bi trebao biti značajniji problem pod uvjetom raspoloživosti odgovarajuće opreme budući da se s uvođenjem novog koncepta očekuje i smanjenje broja konflikata.

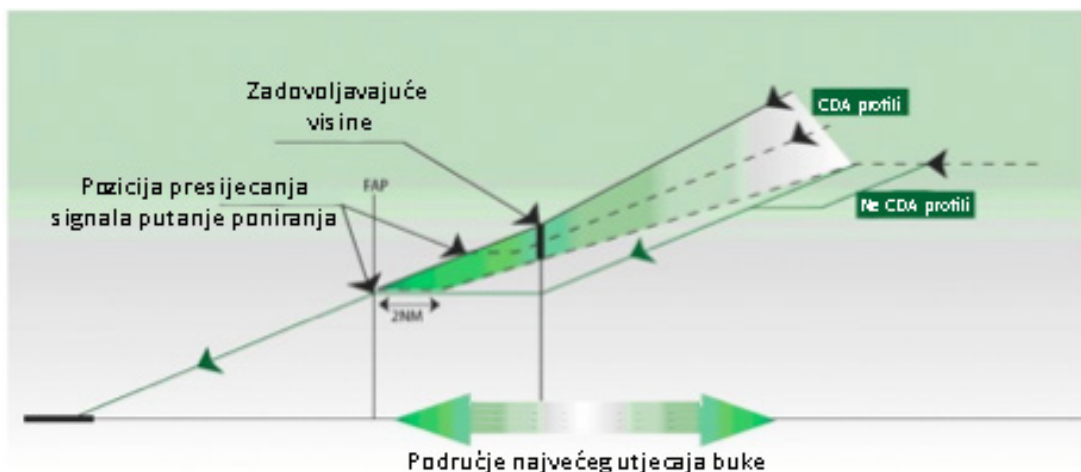
### **2.2.4. Prekid u radu sustava za podršku poslovnom procesu**

Okupljanje zračnog prostora s ciljem učinkovitije upravljanja 4D putanjama može, u slučaju prekida rada sustava za podršku poslovnom procesu, dovesti do preopterećenja operativnog osoblja.

### 3. Model primjene koncepta 4D putanja u prostoru prilazne kontrole

Unapređenja navigacijskih, komunikacijskih i nadzornih sustava omogućavaju primjenu novih koncepata u rješavanju operativnih problema pri slijetanju, posebice u zagušenom prostoru prilazne kontrole (eng. Terminal Manoeuvring Area ili TMA). RNAV, P-RNAV navigacija omogućavaju definiranje novih putanja kako bi se poboljšao proces stapanja prometa. Napredak u komunikaciji predstavlja CPDLC sustav koji osigurava pogodan način razmjene informacija o putanji ne samo za uspostavu komunikacije zemlja–zrak već i zrak–zrak. Unapređenja u nadzornom sustavu (engl. Automatic Dependent Surveillance- Broadcast ili ADS-B) osiguravaju novi način praćenja zrakoplova korištenjem GNSS [8].

U primjenu se uvodi novi način slijetanja zrakoplova kojeg karakterizira kontinuirano spuštanje, odnosno prilaženje zračnoj luci s neprekinutim snižavanjem visine (engl. Continuous Descent Approach ili CDA). CDA započinje na početnoj točki snižavanja (engl. Top of Descent ili ToD) nakon kojeg zrakoplov do sletne piste leti prema individualnom vertikalnom profilu. Konvencionalnu metodu slijetanja karakterizira prilaz sletnoj pisti u iteracijama, zrakoplov se jedno vrijeme spušta, a onda se zadržava na istoj visini do sljedeće iteracije (slika 5). Procedura prilaženja sa neprekinutim snižavanjem visine omogućuje zadržavanje zrakoplova na višim razinama leta, tj. odgađa sam početak operacije spuštanja čime se postižu željeni učinci u nastojanju da se smanji potrošnja goriva te razina buke i emisije štetnih ispušnih plinova koji negativno utječu na stanovništvo u naseljima u blizini zračne luke.



Slika 6 Profili prilaženja zrakoplova po konvencionalnoj i CDA metodi [9]



Za primjenu TBO u TMA od ključnog je značaja da se u zrakoplovima koriste upravljačke funkcije koje reguliraju i prilagođavaju brzinu zrakoplova za vrijeme čitavog leta kako bi zrakoplov stigao do određene točke u zahtijevano vrijeme dolaska (engl. Required Time of Arrival ili RTA). Ovime se uvelike povećava mogućnost predviđanja dolaska zrakoplova do prilaza zračnoj luci. Pristup prostoru temeljen na vremenu ocijenjen je najpogodnijim načinom za realizaciju u potpunosti automatiziranog upravljanja dolaznim prometom.

U nastavku je prezentirano rješenje koje se koristi u zračnoj luci Beijing Capital gdje se novi pristup u optimiranju slijetanja velikog broja zrakoplov bazira se na *multi-agent* tehnici [8], koja omogućava kreiranje sveobuhvatnog plana za određivanje redosljednih putanja i dolaska u točku stapanja bez konfliktnih točaka. Arhitektura sustava se temelji na strukturi u kojoj se putanje stapaju u točku (eng. Point Merge ili PM) čime se onemogućava ubrzavanje ili odgađanje RTA (metodom čekanja) po ulasku u predefiniranu redoslijednu rutu. Sustav je dizajniran na način da se koriste dva osnovna modela upravljanja dolaznim tokovima: model redosljednih putanja (engl. Sequencing Leg Model ili SLM) i model dolaska u točku stapanja (engl. Link Model ili LM). Pored toga, dizajnirani su sustavi (u daljnjem tekstu *agenti*) za podršku automatizaciji procesa, a koriste se za:

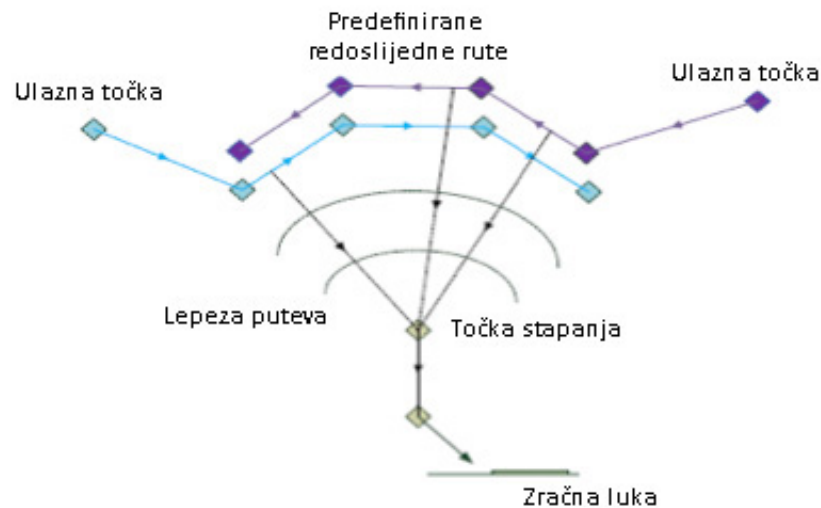
- upravljanje zrakoplovom (engl. Aircraft Agent ili AA);
- upravljanje tokom prometa (engl. Flow Manager Agent ili FMA)
- uočavanje i rješavanje konfliktnih situacija (engl. Conflict Detection and Resolution Agent ili CD&RA)
- planiranje 4D putanje (engl. 4D Trajectory Planning Agent ili 4DTPA).

### **3.1. Struktura Point Marge sustava**

PM predstavlja metodu koja sistematično upravlja tokovima zračnog prometa. Kao zamjenu za standardno vektoriranje, koncept PM koristi kontrolu brzine i izravne instrukcije koji zrakoplov po predefiniranim točkama dovode do točke stapanja. Koriste se posebno objavljene rute čije procedure omogućuju prilaz, a sustav osigurava automatizirano razdvajanje zrakoplova, čak i u visoko zagušenom prostoru. Struktura ruta koja podržava PM može biti definirana kao standardni instrumentalni dolazak (engl. Standard Instrument Arrival ili STAR) , tranzicija, inicijalna prilazna procedura ili dio iste., a sastoji se od (slika 7):

- Jedne točke stapanja prometa (PM)

- Predefinirane redosljedne putanje – ruta u određenom smjeru koje su ekvidistantne od točke stapanja prometa, koji čine rute za svaki nadolazeći tok prometa, te rute mogu biti razdvojene vertikalno, lateralno ili oboje



Slika 7 Struktura točke stapanja prometa [8]

### 3.2 Upravljanje prilazom temeljeno na PM sustavu

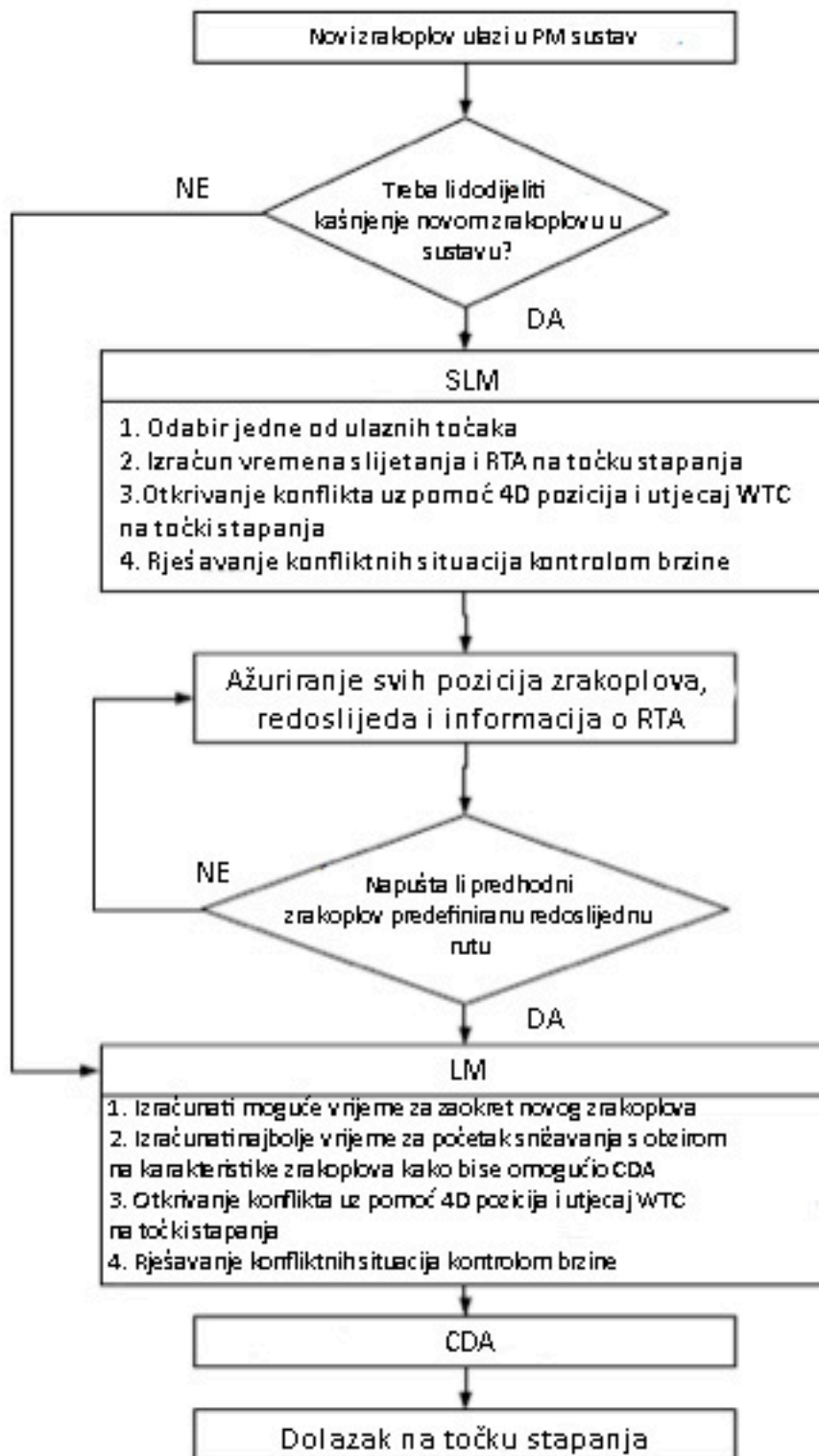
U prvoj se fazi sav promet u prilazu dijeli u dvije grupe, a potom svaka od grupa prati redosljednu putanju. Na istim rutama zrakoplovi održavaju istu razinu leta, a razdvajaju se automatski, horizontalno uz pomoć kontrole brzine. Potom se, u svrhu maksimalne optimizacije prometa, a i poštene raspodjele čekanja, letovi redaju te dobivaju dozvolu za nastavak prema PM. Kako jedan zrakoplov napušta sekvencijsku rutu i kreće prema točki stapanja, slijedeći nastavlja po redosljednoj ruti sve dok se ne oslobodi prostor za siguran nastavak prema PM. Svi slijedeći zrakoplovi prolaze sličan postupak. Tijekom direktnog leta prema točki stapanja, u skladu sa performansama, svi zrakoplovi prate CDA. Vrijeme spuštanja i dolaska na PM izdaje kontrolor zračne plovidbe uz asistenciju za to predviđenih programa, dok je sam let kontroliran od strane FMS-a u zrakoplovu.

Kako broj zrakoplova u prostoru raste i dolazi do svoje najveće vrijednosti CD&RA se aktivira i stvara kašnjenje koje se ugrađuje u PM sustav u stvarnom vremenu. S obzirom da ne postoje procedure koje bi omogućile zrakoplovima koji su već napustili redosljednu rutu čekanje ili preusmjeravanje, razdvajanje se mora osigurati unaprijed. Ograničavajući, to jest,

dinamično mijenjajući količinu zrakoplova koji u jedinici vremena mogu doći na PM, a analogno tome i ući kroz ulaznu točku osigurava se kontinuiran i siguran tok prometa. Kad je promet prevelik smanjuje se frekvencija stapanja zrakoplova i povećava kašnjenje, dok je u slučaju manjeg prometa moguće učestalije puštanje zrakoplova te kašnjenja praktički i nema.

Kao što je već spomenuto, sustav se sastoji od dva glavna modela upravljanja prilaznim prometnim tokovima: SLM i LM. SLM osigurava da zrakoplovi lete po lukovima točno određenom brzinom kako ne bi došlo do konflikta. U isto se vrijeme proračunavaju predviđena vremena te, po potrebi, produljuje, tj. skraćuje putanja, a istodobno i vrijeme potrebno za dolazak do PM za svaki pojedini zrakoplov. U sklopu LM-a određuje se koji će zrakoplovi kojim redoslijedom napuštati prvi segment i prateći CDA nastaviti prema PM.

AA dinamički razmjenjuje informacije s ostala tri agenta. U prezentiranom rješenju informacije koje se odnose na promjenu puta i informacije vezane uz redanje zrakoplova razmjenjuju se s 4DTPA. Vrijeme dolaska na ulaznu točku i RTA se razmjenjuje s FMA, sigurno korištenje prostora u nadležnosti je CD&RA. 4DTPA optimizira poredak za slijetanje i prilazne putanje, a kao krajnji rezultat proračuna generiraju se podaci ključni za nastavak leta – vrijeme odvajanja prema PM, vrijeme početka snižavanja i sletna pozicija za svaki pojedini zrakoplov. FMA izravno komunicira s okolinom te reagira na kašnjenja i zagušenja u susjednim sektorima (uključujući kapacitet zračne luke). Ubrzavanjem ili usporavanjem prometa teži se što većoj učinkovitosti prilazne kontrole. CD&RA dinamički detektira i rješava konfliktne situacije i kao takav predstavlja temelj cijelog sustava točke stapanja [8].



Slika 8 Dijagram toka za modeliranje dolaska zrakoplova u PM sustav [8]

## **4. Prilaženje za slijetanje**

Prilaz za slijetanje je, u slučaju uspješnog slijetanja, posljednja etapa leta. Tijekom prilaza pilot postavlja zrakoplov u konfiguraciju za slijetanje te prateći propisane procedure, oslanjajući se na vizualne reference ili slušajući upute kontrolora u obliku vektoriranja smanjuje visinu i brzinu približavajući se sletnoj pisti.

### **4.1 Vrste prilaza**

Ovisno o navigacijskim sredstvima na aerodromu, opremljenosti zrakoplova te vrsti dozvole za koju je pilot licenciran prilaženje se može provoditi prema pravilima za vizualno ili instrumentalno letenje. Vizualan prilaz odnosi se na prilaz koji se vrši isključivo za vrijeme vizualnih meteoroloških uvjeta (engl. Visual Meteorological Conditions ili VMC), tj. vidljivost od 5000 m, horizontalna udaljenost 1500m te vertikalna 1000ft od baze oblaka uz neprekidan vizualni kontakt s tlom. Od pilota se očekuje da je upoznat s aerodromom na koji slijeće. Vizualni prilaz koristi se kako bi se smanjilo radno opterećenje kako pilota tako i kontrolora. Tijekom vizualnog prilaza pilot se sam, uz informaciju o ostalom prometu, razdvaja od ostalih zrakoplova te daljnja komunikacija s prilaznom kontrolom više nije potrebna. Također, vizualni prilaz podrazumijeva najjednostavniju, najbržu i najkraću putanju prema pisti i time se povećava kapacitet aerodroma.

Uz vizualni, često se koristi, a za međunarodne zračne luke je i obavezan, instrumentalni prilaz. Instrumentalni prilaz je metoda prilaza za slijetanje pri kojem pilot koristi navigacijska sredstva na tlu i instrumente te prikazivače u kabini kako bi pravilno došao do pozicije za slijetanje. Instrumentalni prilaz dijeli se na precizni i neprecizni. U praksi postoje brojne verzije preciznog prilaza kao što su Sustav za precizno prilaženje prema instrumentima (eng. Instrument Landing System ili ILS), radar za precizno prilaženje (engl. Precision Approach Radar ili PAR), mikrovalni sustav za precizno prilaženje (engl. Microwave Landing System ili MLS) te drugi. Svaki od vrsta prilaza ima svoje prednosti i mane. Iako je MLS razvijan kao zamjena za postojeći ILS i nudio brojne prednosti u smislu jednostavnijeg postavljanja zemaljskih stanica i šireg loka rada u odnosu na ILS MLS se nije razvio kako su inženjeri koji su stajali iza razvoja istog mislili. Razvoj GPS-a i liberalizacija korištenja u smislu ukidanja selektivne dostupnosti (engl. Selective Availability ili SA) koje je osiguralo povećanu i konstantnu točnost podataka, kao i razvoj ostalih globalnih satelitskih navigacijskih sustava (GLONASS, GALILEO, COMPASS), te regionalnih navigacijskih sustava (QZSS, IRNSS, BEIDOU I)

okrenuo je industriju u smjeru razvoja satelitskog navođenja, a kao rezultat toga ostao je ILS koji se trenutno nalazi u širokoj primjeni.

ILS je sustav sastavljen od četiri osnovne komponente. Na aerodromu, i u blizini, se nalaze tri elementa: odašiljač usmjerivača pravca prilaznja (engl. Localiser – LLZ), odašiljač signala putanje poniranja (engl. Glide Path – GP) te tri radiomarkera – vanjski, srednji i unutarnji koji služe kao dodatna provjera visine u odnosu na udaljenost od praga piste. LLZ i GS rade na sličnom principu: odašilju dva različito modulirana signala koji se preklapaju na točno određenim mjestima. Odašiljač pravca slijetanja je smješten 1000 ft iza kraja piste i više parova usmjerenih antena odašilje noseći VHF signal moduliran audiotonom od 90Hz i 150Hz i 1020 Hz (za identifikaciju) postavljena horizontalno tako da jedna antena odašilje uski snop malo lijevo a druga malo desno od produžene središnjice sletne piste. Oba su signala podešena tako da se na dubina modulacije na središnjici piste bude 20%. Uređaj u zrakoplovu, koji predstavlja četvrtu osnovnu komponentu, prima signal te ovisno o razlici između ta dva signala određuje svoju poziciju u odnosu na središnjicu piste. Odašiljač putanje poniranja je postavljen s jedne strane piste u ravnini zone dodira. Odašilju se UHF signali modulirani s 90 Hz i 150 Hz koji se emitiraju u vertikalnoj ravnini tako da im je sjecište na nagibu od oko 3% u odnosu na horizontalu. Uređaj u zrakoplovu sastoji se od prijarnika signala putanje poniranja, prijarnik usmjerivača pravca prilaza, prijarnik s pokazivačem signala radiomarkera te jedan pokazivač koji signalizira nalazi li se zrakoplov na željenoj poziciji, tj. na sjecištu signala. Ukoliko je zrakoplov ispod željene pozicije kazaljka će se otkloniti prema gore i obrnuto. Ukoliko je zrakoplov lijevo od željene putanje kazaljka će se otkloniti prema desno, i obrnuto. Ovisno koliko se kazaljka odmakne pilot je u mogućnosti u svakom trenutku znati svoju poziciju u odnosu na željenu putanju.

Neprecizni instrumentalni prilaz predstavlja zadnju vrstu prilaza. Prilikom nepreciznog prilaza pilot dobiva samo informaciju o njegovoj relativnoj poziciji u odnosu na produženu središnjicu piste no ne i nagib [10].

#### **4.2. Vertikalna navigacija**

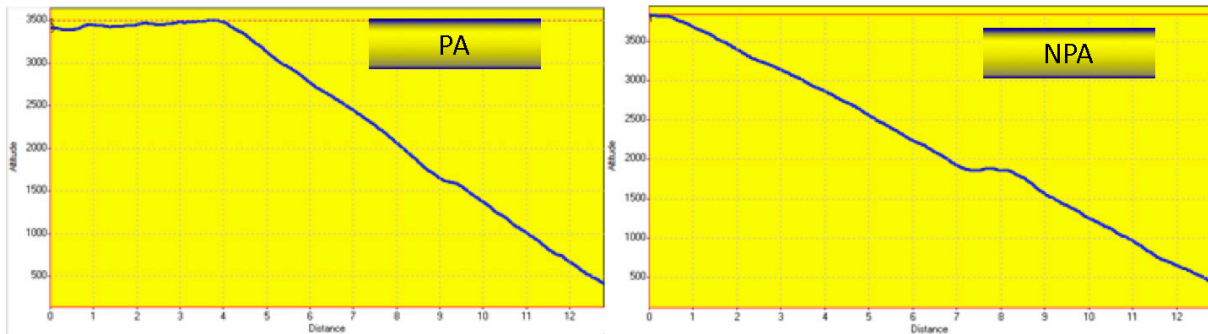
Pomoć za pronalazak idealne putanje snižavanja nudi koncept VNAV-a (eng. Vertical Navigation). Vertikalna navigacija koristi se na više načina, ovisno o opremljenosti zrakoplova. Koristeći GNSS i računalo u zrakoplovu zvano FMS određuje visinu zrakoplova te

uz učitane prilazne procedure (ograničenja brzine, visine, nagib...) određuje treba li zrakoplov povećati ili smanjiti brzinu spuštanja. Ovisno o opremljenosti zrakoplova moguće je da pilot samo dobiva informacije o željenom trendu kretanja zrakoplova ili da autopilot sam iščitava podatke i upravlja zrakoplovom. Dodatno, kako zrakoplov spušta tako mu se i smanjuje brzina, a ovisno o specifičnom prilazu postoje ograničavajuće brzine koje je potrebno smanjivati u određenim trenucima, a ovisno o tome koristi li se pri tom koncept 4D ruta računalo je u mogućnosti samo izračunavati udaljenost od pojedinih točaka, vrijeme kada iznad određene treba biti te ovisno o performansama zrakoplova, ograničavajućim faktorima prilaza i vremenskim uvjetima regulira snagu motora kako bi samostalno ispunio navedene zahtjeve.

Vertikalna navigacija rješava i problem utjecaja vjetra. Sustav je osmišljen da održava putanju što bližu onoj idealnoj. Ukoliko vjetar puše i/ili ima nalete obrnute od smjera kretanja zrakoplova (čeonni vjetar) računalo će automatski povećati snagu i time se održati na željenoj putanji. Veći je problem u slučaju leđnog vjetra kada, u nekim slučajevima, autopilot prati VNAV putanju, ali uslijed vjetra i povećanog nagiba dođe i do povećana brzine te se tada žrtvuje praćenje rute u svrhu održavanja sigurne brzine za let zrakoplova u određenoj konfiguraciji.

## 5. Proračun elemenata leta i analiza odstupanja 4D putanje u prilazu

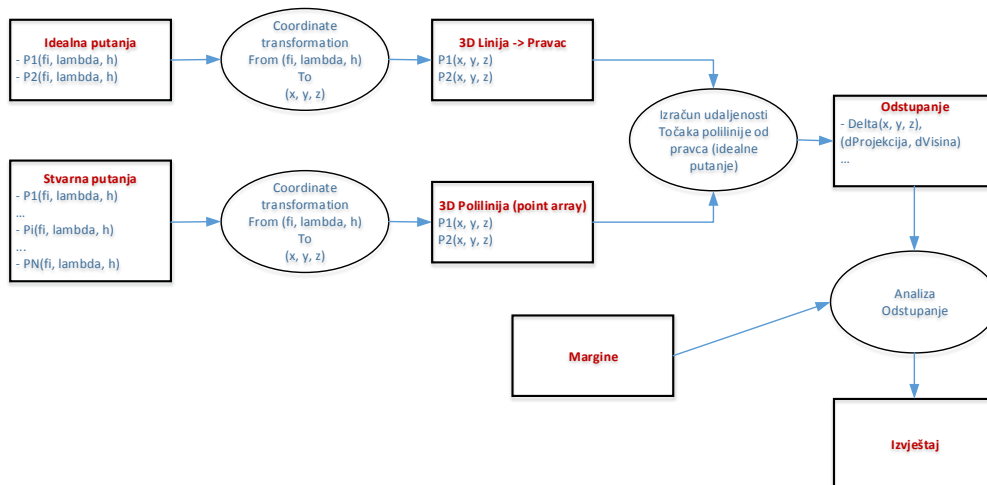
Za proračun elemenata leta u prilaženju za slijetanje korišteni su zapisi iz GPS uređaja za dva prilaženja uzletno-sletnoj stazi 23 na Međunarodnoj zračnoj luci Pleso (slika 9). Zrakoplov je navođen uz pomoć putanja upisanih u GPS od kojih je jedna simulacija preciznog instrumentalnog prilaza ILS, a druga simulacija nepreciznog instrumentalnog prilaza NPA.



Slika 9 Vertikalni profili leta zrakoplova

Analizirat će se odstupanja zadanih letova od idealne putanje kako bi se zaključilo da li je GPS zadovoljavajuća zamjena/nadopuna za postojeća zemaljska navigacijska sredstva.

Proračun elemenata leta i analiza odstupanja od idealne putanje leta provodi se za dva zadana leta prema prezentiranom dijagramu toka (slika 10).



Slika 10 Dijagram toka za proračune i analize rezultata

Pojedinačni koraci prezentiranog dijagrama toka navedeni u nastavku prema redoslijedu odvijanja:



1. određivanje početne i krajnje točke dijelova leta za koje će se provesti proračun i analiza,
2. konverzija pozicija zapisanih letova iz sfernog u kartezijev koordinatni sustav,
3. određivanje najmanje prostorne udaljenosti točke od idealne putanje
4. određivanje x,y,z koordinata točaka idealne putanje i konverzija u sferni sustav,
5. određivanje vertikalnog i horizontalnog odstupanja letova od idealne putanje te
6. usporedba izračunatih odstupanja s RNP APCH zahtjevima detaljno su opisani u narednim poglavljima.

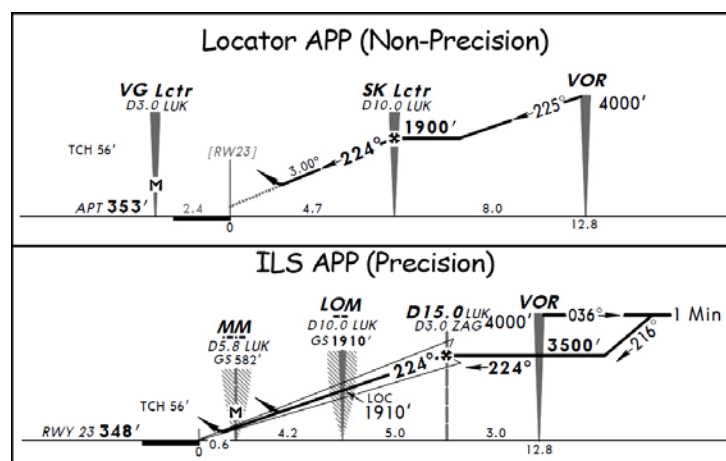
Proračuni su izrađeni korištenjem Microsoft Excel programa.

### 5.1. Proračun elemenata leta i određivanje idealne putanje

Uvidom u:

- vertikalni profil zadanih letova (program OziExplorer – slika 9) te
- procedure prilaza za zadane letove (Jeppesenove prilazne karte – slika 11)

određene su margine unutar kojih će se provesti proračun i analiza.



Slika 11 Procedure NPA i ILS prilaza [11]

Budući da se vertikalne putanje za dva analizirana leta do NBD SK značajno razlikuju usporedba s idealnom putanjom provodi se isključivo za završni dio prilaza koji su za oba leta gotovo identični te predstavljaju produženu liniju uzletno-sletne staze, u smjeru 224° i pod nagibom od 3°.

Stoga se za konstruiranje idealne putanje koriste točke:

X1 → završetak prilaza koji se nalazi 56 stopa iznad praga piste (404 ft MSL), te 45,74942 sjeverno i 16,07876 istočne (lokacija određena uz pomoć Google Maps);

X2 → početak kontinuiranog snižavanja kolocirano s neusmjerenim radiofarom NDB SK na visini od 1900 stopa (pri NPA nominalna visina je 1900 ft, a pri ILS prilazu 1910 ft, no razlika je zanemariva- >0,05%), te lokaciji 45,80555 sjeverno i 16,16444 istočno (objavljene koordinate NDB SK).

Kako bi se kreirala idealna putanja s ciljem kasnije usporedbe letova s tom putanjom potrebno je zapisane pozicije oba leta te pozicije početne i krajnje točke idealne putanje definirane u WGS84 sustavu (geografska širina i duljina te nadmorska visina) konvertirati u koordinate (x, y, z) Kartezijevog sustava s ishodištem u središtu zemlje.

#### 5.1.1. Konverzija koordinata iz sfernog u kartezijev koordinatni sustav

Za konverziju koordinata iz sfernog u kartezijev koordinatni sustav korištene su sljedeće formule [12]

$$X = (v + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (1)$$

$$Y = (v + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (2)$$

$$Z = [(1 - e^2) * v + h \sin \phi \quad (3)$$

gdje je  $h$  nadmorska visina,  $\lambda$  geografska duljina, a  $\phi$  geografska širina dok je

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * \sin^2 \phi}} \quad (4)$$

Zbog zemljinog nepravilnog oblika u formule za konvertiranje koordinata iz sfernog koordinatnog sustava u koordinate kartezijevog sustava umjesto prosječnog polumjera zemlje uvrštavaju se stvarne udaljenosti  $v$  od centra elipsoida izračunate po formuli (4) posebno za svaku geografsku širinu, gdje je:

- $a$  ekvatorijalni polumjer koji iznosi 6378137 m
- $\phi$  kut geografske širine
- $e^2$  konstanta koja iznosi 0,00669438.

### 5.1.2. Određivanje najmanje prostorne udaljenosti točke od idealne putanje

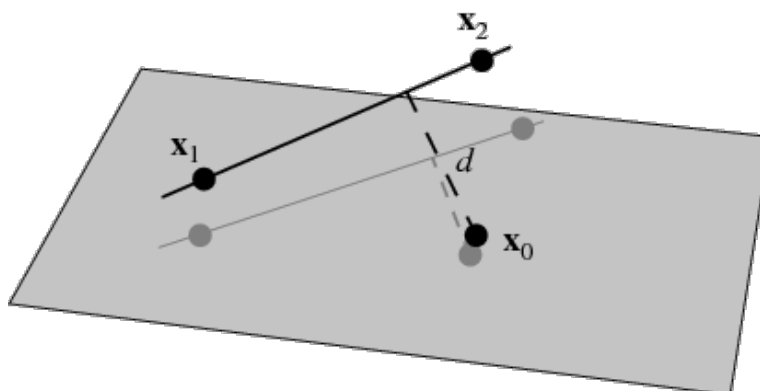
U sljedećem koraku određene su najmanje udaljenosti svake od zapisanih pozicija leta (točka  $X_0$ ) od idealne putanje specificirane početnom  $X_2$  i krajnjom  $X_1$  točkom (slika 12).

Za izračun najmanje udaljenosti točke  $X_0(x_0, y_0, z_0)$  od idealne putanje koristi se formula:

$$d = [(x_1 - x_0) + (x_2 - x_1)t]^2 + [(y_1 - y_0) + (y_2 - y_1)t]^2 + [(z_1 - z_0) + (z_2 - z_1)t]^2 \quad (5)$$

gdje je  $t$  parametar odgovarajuće, tj. za određenu poziciju leta) točke na idealnoj putanji, a određuje se pomoću formule:

$$t = \frac{|x_1 - x_0|^2 * |x_2 - x_1|^2 - [(x_1 - x_0) * (x_2 - x_1)]^2}{|x_2 - x_1|^2} \quad (6)$$



Slika 12 Najmanja prostorna udaljenost točke od linije [13]

Rezultati proračuna opisanih u poglavljima 5.1.1. ( $x, y, z$  koordinate zapisanih pozicija zrakoplova) i 5.1.2 (parametar  $t$  za svaku od pozicija i udaljenost od najbliže točke na idealnoj putanji) dostupni su na CD-u (prilog 1) u excel dokumentu Proračuni:

- List *Ruta 1 – NPA* sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani NPA pristup
- List *Ruta 2 – ILS* sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani ILS pristup

### 5.1.3. Određivanje $x, y, z$ koordinata točaka idealne putanje i konverzija u sferni sustav

Prvi preduvjet za određivanje vertikalnog i horizontalnog odstupanja od idealne putanje je određivanje za svaku točku na idealnoj putanji definiranu parametrom  $t$  njezinih  $x, y, z$  koordinata. Koristi se formula (7) koja definira vektor linije, a u koju se uz  $x, y, z$  koordinate

točaka kojima je linija definirana (u našem slučaju početna X2 i krajnja X1 točka idealne putanje) uvrštavaju prethodno izračunate vrijednosti parametra t.

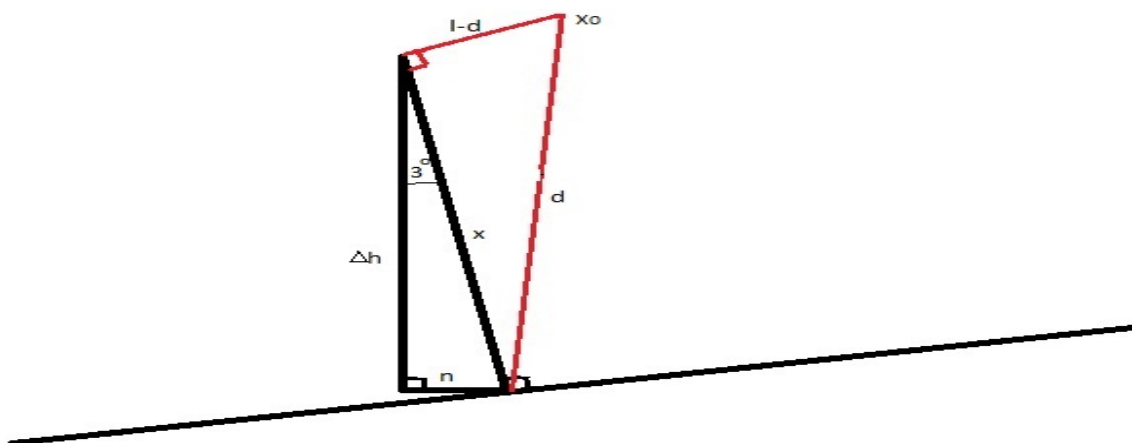
$$v = \begin{bmatrix} x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z_1 + (z_2 - z_1)t \end{bmatrix} \quad (7)$$

Za potrebe izračuna vertikalnog odstupanja potrebno je dobivene x,y,z koordinate za točke idealne putanje konvertirati u sferni koordinatni sustav te visinu odgovarajućih točaka izraziti u stopama. Za konverziju su korišteni gotovi složeni algoritmi [13] čija je ispravnost je provjerena dodatnim konverzijama geografskih širina i duljina.

Rezultati gore specificiranih proračuna dostupni su na listovima:

- List *Idealna putanja – NPA* sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani NPA pristup
- List *Idealna putanja – ILS* sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani ILS pristup

#### 5.1.4. Određivanje vertikalnog i horizontalnog odstupanja



Slika 13 Grafički prikaz vertikalnog i horizontalnih odstupanja

Grafički prikaz vertikalnog i horizontalnih odstupanja (slika 13) shematski prikazuje pristup izračunu željenih vrijednosti. Razlika u visini ( $\Delta h$ ) između visine promatrane točke ( $X_0$ ) i visine odgovarajuće točke na idealnoj putanji je poznata. Korištenjem pravila za pravokutne trokute moguće je odrediti da je kut  $\alpha$  istog iznosa kao i nagib prilazne putanje ( $3^\circ$ ). Pomoću trigonometrijske formule  $x = \frac{h}{\sin \alpha}$  dobiva se hipotenuza koja predstavlja odstupanja u

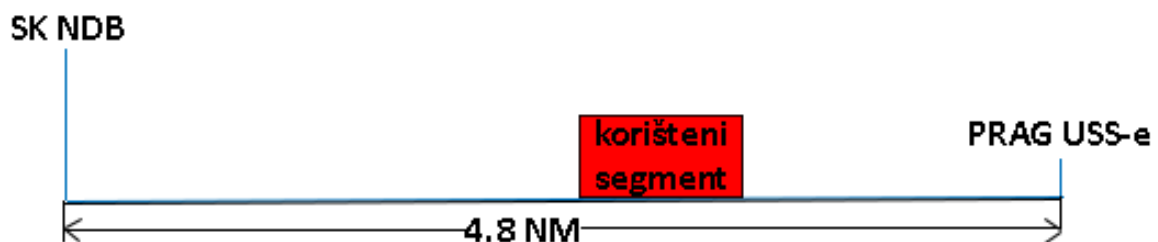
ravnini idealne putanje.  $x$  je vrijednost prikazuje odstupanje realne pozicije zrakoplova od željene pozicije u vertikalnoj ravnini. Ovisno o  $\Delta h$  ima pozitivnu ili negativnu vrijednost što analogno govori o tome nalazi li se zrakoplov u tom trenutku iznad ili ispod željene putanje. Istom se metodom izračunava vrijednost odmaka okomito od idealne putanje ( $l - d$ ), uvrštavajući poznate vrijednosti  $x$  i  $d$  za najmanju prostornu udaljenost idealne i realne točke. Hipotenuza čije su katete uzdužno i okomito odstupanje u odnosu na smjer pružanja idealne putanje predstavlja horizontalno odstupanje. Kako je idealna putanja pozicionirana u smijeru  $224^{\circ}$  mogu se usporediti geografske širine odgovarajućih točaka na idealnoj i snimljenoj putanji. Ukoliko je geografska širina realne točke veća od one odgovarajuće točke na idealnoj putanji odstupanje je u desnu stranu u odnosu na smjer kretanja zrakoplova, i obrnuto.

Rezultati su prezentirani u:

- List *Udaljenosti* – NPA sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani NPA pristup
- List *Udaljenosti* – ILS sadrži navedene rezultate proračuna za simulirani ILS pristup

## 5.2. Analiza odstupanja od idealne putanje

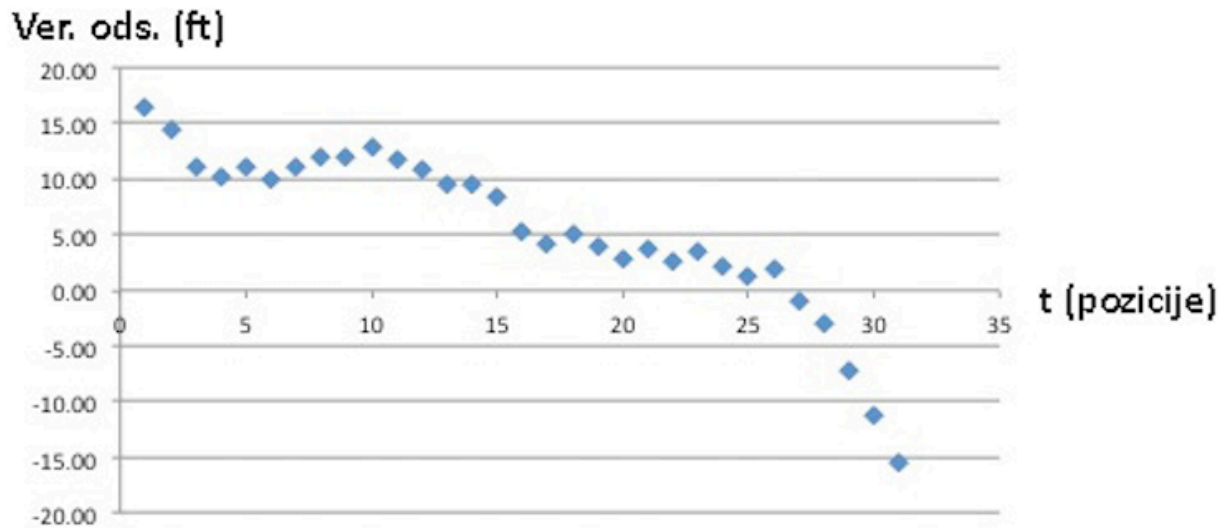
Karakteristične veličine bitne za analizu odstupanja su prosječna odstupanja te najveće odstupanje u završnom dijelu prilaza za slijetanje i prikazane su tablično. Radi bolje preglednosti vertikalna i horizontalna odstupanja grafički su prikazana za manji segment rute. Kako bi se bolje prikazao odnos između vertikalnih i horizontalnih odstupanja, a i odnos između odstupanja PA i NPA promatran je isti sement rute (slika 14) za sva četiri grafikona.



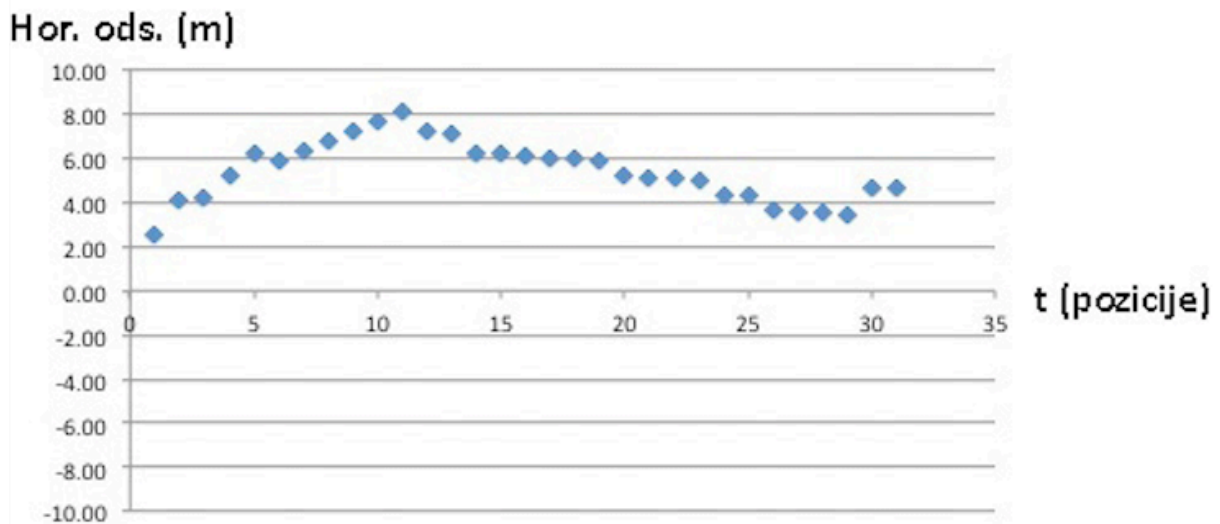
Slika 14 Prikaz korištenog segmenta

Odstupanja za simulaciju ILS prilaza, prema provedenim proračunima iznose:

PA prilaz	Vertikalna ravnina (ft)	Horizontalna ravnina (m)
Maksimalno odstupanje	140,29	15,58
Prosječno odstupanje	49,82	8,09



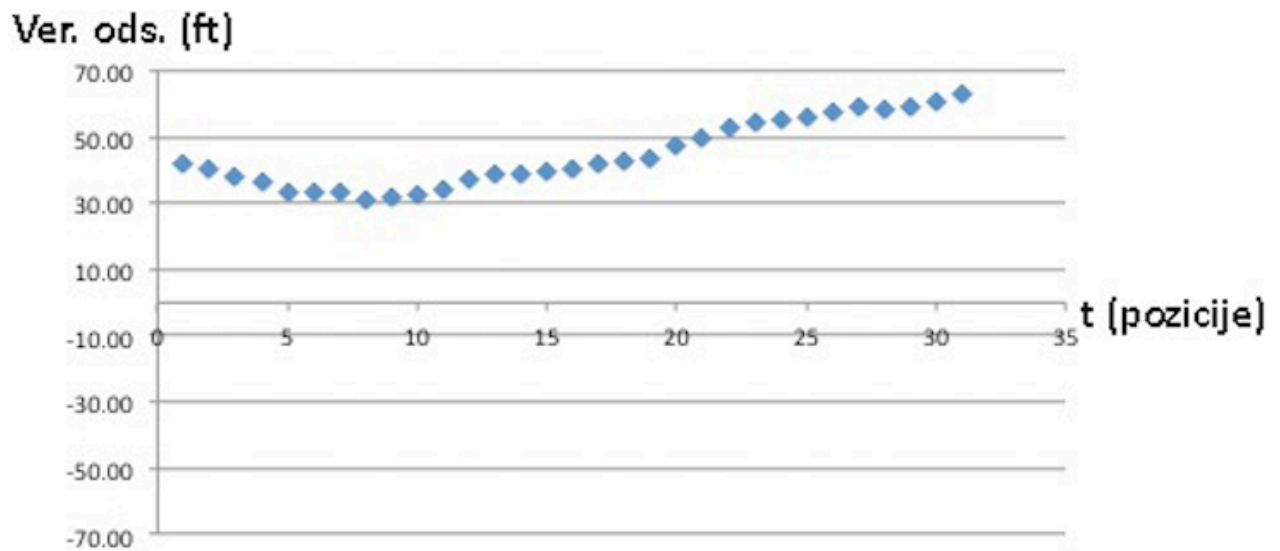
Slika 15 Vertikalna odstupanja za PA



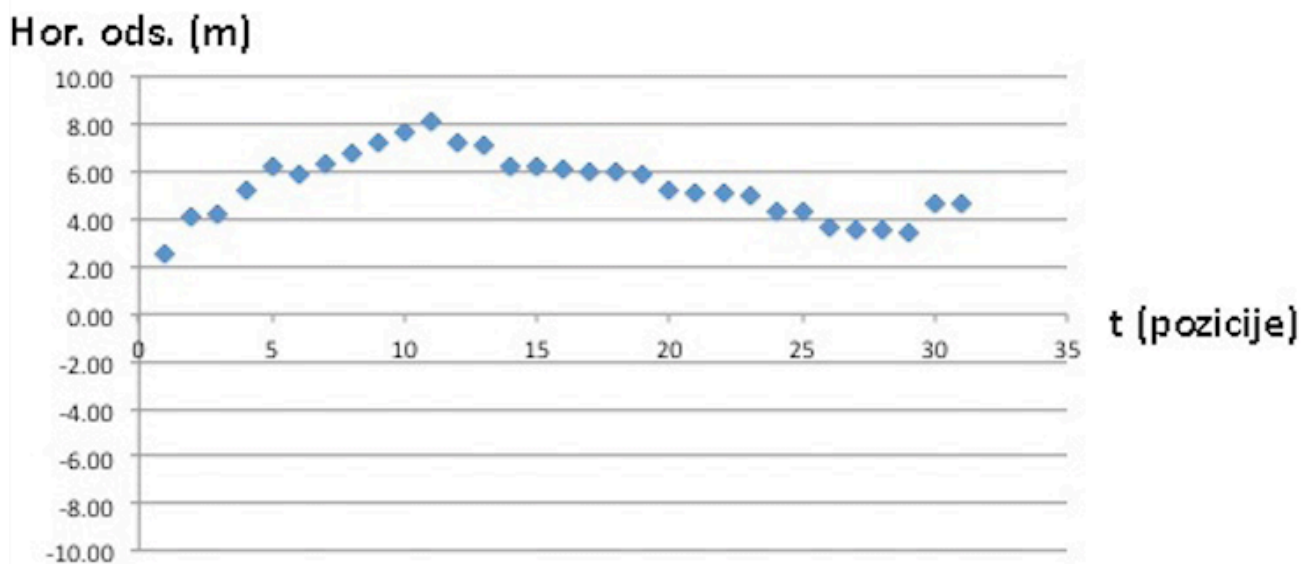
Slika 16 Horizontalna odstupanja za PA

Odstupanja za simulaciju NPA prilaza, prema provedenim proračunima iznose:

NPA prilaz	Vertikalna ravnina (ft)	Horizontalna ravnina (m)
Maksimalno odstupanje	75,52	17,25
Prosječno odstupanje	37,30	6,22



Slika 17 Vertikalna odstupanja za NPA



Slika 18 Horizontalna odstupanja za NPA

RNP APCH zahtjevi koji se primjenjuju u završnoj fazi leta definirani dokumentom AMC 20-27 traže da odstupanja u vertikalnoj ravnini pri letu ispod 5000 ft MSL ne budu veća od 199 ft od očekivane pozicije te da odstupanja u horizontalnoj ravnini ne budu veća od 0,3 NM (555 m). Za oba odstupanja vrijedi da navedeni zahtjevi budu ispunjeni 95% vremena trajanja leta.

Usporedba dobivenih rezultata s navedenim zahtjevima pokazuje da su letovi oba prilaza (ILS i NPA) sa zadovoljavajućom točnošću pratila idealnu putanju te nije zabilježena niti jedna pozicija u kojoj je bilo vertikalno bilo horizontalno odstupanje od idealne putanje bilo izvan zadanih margina.



## 6. Zaključak

U okviru završnog rada načinjeni su proračuni elemenata leta te su određena vertikalna i horizontalna odstupanja od proračunate idealne putanje za dva prilaženja uzletno-sletnoj stazi 23 na Međunarodnoj zračnoj luci Pleso. Analizirana prilaženja navođena su Globalnim navigacijskim satelitskim sustavom, a predstavljaju simulaciju letova navođenih sustavom za instrumentalno slijetanje od kojih je jedan precizni instrumentalni prilaz, a drugi neprecizni. Usporedbom izračunatih vertikalnih i horizontalnih odstupanja od idealne putanje željelo se zaključiti da li su letovi navođeni GNSS sustavom u skladu s RNP APCH zahtjevima koji se primjenjuju u završnoj fazi leta. U svrhu provjere navedene usklađenosti izrađeni su vlastiti proračuni korištenjem Microsoft Excel programa.

U radu je ukratko prezentiran koncept 4D putanja s naglaskom na njegovu primjenu u prostoru prilazne kontrole te je dan pregled različitih vrsta prilaženja i osnovna načela vertikalne navigacije. Opisani su pojedinačni koraci izvedenih proračuna te rezultati analize odstupanja.

Rezultati proračuna odstupanja simuliranih letova od generirane idealne putanje pokazuju da se GPS može koristiti kao navigacijsko sredstvo koje nadopunjuje/zamjenjuje konvencionalna zemaljska radionavigacijska sredstva, kako u prilaženju za slijetanje tako i šire. Naime, ukoliko udovoljava zahtjevima propisanim dokumentom ANC 20-27 u kompleksnoj fazi leta koja uključuje promjene visine za očekivati je da je primjenjiv i fazi leta na ruti koja je jednostavnija za manevriranje, a ima i veća dozvoljena odstupanja.

Ograničenje predstavlja činjenica da se prilikom proračuna u obzir nije uzeo utjecaj vjetra. Za konačan zaključak o mogućnosti korištenja GPS-a kao navigacijskog sredstva u prilaženju za slijetanje potrebno je načiniti proračune i analize uključujući i utjecaj vjetra te mogućnost primjene GPS-a provjeriti na većem skupu na taj način navođenih zrakoplova u prilaženju za slijetanje.

## LITERATURA

- [1] Flight planning in Europe, EUROCONTROL  
<http://www.eurocontrol.int/dossiers/flight-planning-air-route-network-and-airspace-design-europe> (30.8.2015.)
- [2] Supporting SEASER, A6 alliance  
<http://www.a6alliance.net/supporting-sesar/> (30.6.2015.)
- [3] 4D Trajectory Concept, SKYbrary Aviation Safety  
[http://www.skybrary.aero/index.php/4D\\_Trajectory\\_Concept](http://www.skybrary.aero/index.php/4D_Trajectory_Concept), (7.7.2015.)
- [4] Radišić T. Utjecaj operacija zasnovanih na putanjama na kompleksnost zračnog prometa“, Sveučilište u Zagrebu; 2014.
- [5] Barff A. ASAS In The SESAR Ops Concept. 4th ASAS-TN2 workshop, 23.-25.4.2007., Amsterdam, Netherlands
- [6] Hrvatska kontrola zračne plovidbe, PNB koncept  
<http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=36> (25.7.2015.)
- [7] SWIM, SESARJU  
<http://www.sesarju.eu/sesar-solutions/swim> (10.7.2015.)
- [8] Man L. An agent-based approach to automated merge 4D arrival trajectories in busy terminal maneuvering area. 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology; 24.-26.9.2014.; Shanghai, China; doi:10.1016/j.proeng.2014.12.531
- [9] Skybrary, Continuous Descent  
[http://www.skybrary.aero/index.php/Continuous\\_Descent](http://www.skybrary.aero/index.php/Continuous_Descent) (5.7.2015.)
- [10] Novak D. Zrakoplovna prostorna navigacija. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [11] Marvin M. Calculating navigation elements in flight segments during non-precision approach. Salon-de-Provence; 2014.
- [12] Department of Geo-information processing  
<http://kartoweb.itc.nl/geometrics/coordinate%20transformations/coordtrans.html>  
(5.6.2015.)
- [12] Schneider P.J., Eberly D.H. Geometric tools for computer graphics. New York: Elsevier Science; 2002.

- [13] Ordnance Survey: Britain's mapping agency, Engleska  
<https://www.ordnancesurvey.co.uk/.../projection-and-transformation-calculations.xls>  
(25.7.2015.)
- [14] Swierstra S., Bronsvort J., McDonald G., Garcia-Avello C., Bayraktutar I. The Dawn of the Trajectory. 9th USA/Europe ATM Research and Development Seminar (ATM2011); 14.-17.6.2011., Berlin, Germany
- [15] de Muynck R.J., Verhoeff L., Verhoeven R.P.M., de Gelder N. Enabling technology evaluation for efficient continuous descent approaches. 26th ICAS congress 2008 (including ATIO 2008); 14.-19.9.2008; Anchorage, Alaska, USA
- [16] Franjkovic D., Bucak T., Martek M. Basic Area Navigation (B-RNAV). Promet, Vol 12. 2000.

## POPIS KRATICA

4D	Četverodimenzionalan (eng. Four dimensional)
4DTPA	Agent za planiranje 4D putanje (eng. 4D Trajectory Planning Agent)
AA	Agent za upravljanje zrakoplovom (engl. Aircraft Agent)
ADS-B	Automatski ovisan nadzor – radiodifuzijsko emitiranje (engl. Automatic Dependent Surveillance- Broadcast)
ANSP	Pružatelji usluga u zračnoj plovidbi (engl. Air Navigation Service Provider)
ATM	Upravljanje zračnim prometom (engl. Air Traffic Management)
BDT	Ciljana poslovna putanja (engl. Business Development Trajectory)
BT	Poslovna putanja (engl. Business Trajectory)
CDA	Prilaženje s neprekinutim snižavanjem (engl. Continuous Descent Approach)
CD&RA	Agent za uočavanje i rješavanje konfliktnih situacija (engl. Conflict Detection and Resolution Agent)
CDM	Zajedničko donošenje odluke (engl. Collaborative Decision Making)
CPDLC	Sustav za elektronsku razmjenu podataka zemlja-zrak i zrak-zrak (engl. Controller-Pilot Data-Link Communications)
EUROCONTROL	Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe (engl. European Organization for the Safety of Air Navigation)
FAB	Funkcionalni blok zračnog prostora (engl. Functional Airspace Block)
FM	Upravljanje letom (engl. Flight Management)
FMA	Agent za upravljanje letom (engl. Flight Management Agent)
FMS	Sustav za upravljanje letom (engl. Flight Management System)
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sustav (engl. Global Navigation Satellite System)
GPS	Globalni pozicijski sustav (engl. Global Positioning System)
ILS	Sustav za precizno prilaženje prema instrumentima (eng. Instrument Landing System)
LM	Model dolaska u točku stapanja (engl. Link Model)

MLS	Mikrovalni sustav za precizno prilaženje (eng. Microwave Landing System)
NDB	Neusmjereni radiofar (engl. Non-directional Beacon)
NPA	Neprecizno prilaženje (engl. Non-Precision Approach)
P-RNAV	Precizna navigacijska specifikacija prostorne navigacije (engl. Precision Area Navigation)
PA	Precizno prilaženje (engl. Precision Approach)
PAR	Radar za precizno prilaženje (engl. Precision Approach Radar)
PM	Točka stapanja (engl. Point Merge)
RBT	Usuglašena poslovna putanja (engl. Reference Business Trajectory)
RNAV	Prostorna navigacija (engl. Area Navigation)
RNP	Zahtijevane navigacijske performanse (eng. Required Navigational Performance)
RTA	Zahtijevano vrijeme dolaska (eng. Required Time of Arrival)
SA	Selektivna dostupnost (engl. Selective Availability)
SBT	Objavljena poslovna putanja (engl. Shared Business Trajectory)
SES	Jedinstveno europsko nebo (engl. Single European Sky)
SESAR	Istraživanje o upravljanju zračnim prometom jedinstvenog europskog neba (engl. Single European Sky ATM Research)
SLM	Model redosljednih putanja (engl. Sequencing Leg Model)
STAR	Standardni instrumentalni dolazak (engl. Standard Arrival Route)
SWIM	Sustav za upravljanje informacijama (engl. System-Wide Information Management)
TBO	Operacije zasnovane na putanjama zrakoplova (engl. Trajectory-based Operations)
TM	Upravljanje putanjama (engl. Trajectory Management)
TMA	Prostor prilazne kontrole (engl. Terminal Manoeuvring Area)
ToD	Početna točka snižavanja (engl. Top of Descent)
VMC	Vizualni meteorološki uvjeti (engl. Visual Meteorological Conditions)
VNAV	Vertikalna navigacija (engl. Vertical Navigation)

## POPIS SLIKA

Slika 1 Karta mreže zračnih ruta [1] .....	3
Slika 2 Putanje leta u zračnom prometu podijeljenom na FAB-ove [3].....	5
Slika 3 Postojeći i novi koncept upravljanja zračnim prometom [4] .....	6
Slika 4 4D putanja kroz proces planiranja i provedbe [5].....	7
Slika 5 Sadašnji i budući navigacijski koncepti [6] .....	8
Slika 6 Profili prilaženja zrakoplova po konvencionalnoj i CDA metodi [9] .....	11
Slika 7 Struktura točke stapanja prometa [8].....	13
Slika 8 Dijagram toka za modeliranje dolaska zrakoplova u PM sustav [8].....	15
Slika 9 Vertikalni profili leta zrakoplova .....	19
Slika 10 Dijagram toka za proračune i analize rezultata.....	19
Slika 11 Procedure NPA i ILS prilaza [11].....	20
Slika 12 Najmanja prostorna udaljenost točke od linije [13] .....	22
Slika 13 Grafički prikaz vertikalnog i horizontalnih odstupanja .....	23
Slika 14 Prikaz korištenog segmenta .....	24
Slika 15 Vertikalna odstupanja za PA .....	25
Slika 16 Horizontalna odstupanja za PA.....	25
Slika 17 Vertikalna odstupanja za NPA.....	26
Slika 18 Horizontalna odstupanja za NPA .....	26

## **PRILOG - CD Proračuni**



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## METAPODACI

**Naslov rada:** PRORAČUN ELEMENATA 4D PUTANJE LETA ZRAKOPLOVA U PRILAZU ZA  
SLIJETANJE

**Autor:** Matej Oroz

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

**Naslov na drugom jeziku (engleski):**

4D TRAJECTORY ELEMENT ANALYSIS OF AN AIRCRAFT IN APPROACH

---

**Povjerenstvo za obranu:**

- doc. dr. sc. Biljana Juričić, predsjednik
- izv. prof. dr. sc. Doris Novak, mentor
- dr. sc. Tomislav Radišić, član
- prof. dr. sc. Tino Bucak, zamjena

**Ustanova koja je dodjela akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Zavod za aeronautiku

**Vrsta studija:** sveučilišni

**Naziv studijskog programa:** Aeronautika

**Stupanj:** preddiplomski

**Akademski naziv:** univ. bacc. ing. aeronaut.

**Datum obrane završnog rada:** 15.9.2015.





Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada

pod naslovom **PRORAČUN ELEMENATA 4D PUTANJE LETA ZRAKOPLOVA U PRILAZU ZA SLIJETANJE**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 07/09/15

\_\_\_\_\_  
(potpis)