

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

**Antonio Lazarovski**

MODELIRANJE 4D PUTANJE ZRAKOPLOVA U KOORDINATNOM SUSTAVU  
WGS-84

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, 2015.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## ZAVRŠNI RAD

MODELIRANJE 4D PUTANJE ZRAKOPLOVA U KOORDINATNOM SUSTAVU  
WGS-84

DESIGNING 4D AIRCRAFT TRAJECTORY IN WGS-84

Mentor: dr. sc. Tomislav Radišić  
Student: Antonio Lazarovski, 0135226390

**Zagreb, 2015.**

## SAŽETAK

Nejednakost potražnje i raspoloživih kapaciteta zračnog prostora u zračnom prometu dovodi do potrebe za inovacijama, te napredak u sustavu za upravljanje sa zračnim prometom - ATM uvođenjem niz alata za testiranje i procjenjivanje novih koncepta u avijaciji. Stvaranja alata za modeliranje putanja zrakoplova u četiri dimenzija u koordinatnom sustavu WGS-84, te uspoređivanje te putanje s putanjom stvarnog leta, može puno pridonijeti razvoju zrakoplovstva. Prikladan program za stvaranje modela zrakoplova je Matlab koji nudi mogućnosti uvrštavanja svih matematičkih funkcija dinamike zrakoplova, te funkcije koje određuju utjecaj stanja atmosfere jednog leta. Procjenjivanje efikasnosti modela zrakoplova se može napraviti analizom, te uspoređivanjem sličnosti u obe putanje.

**KLJUČNI RIJEČI:** 4D putanja; ATM; Stvaranje model zrakoplova; WGS84

The inequality between demand and capacity of airspace in air traffic, is leading to the need of innovation and improvement in the air traffic management, through the introduction of a number of software tools for testing and evaluation of new concepts. Making a tool for the designing of the trajectory of an aircraft in four dimensions in WGS84, and comparing that trajectory with an actual trajectory of a flight, can be useful for the development of aviation. Suitable program for the designing is Matlab which offers the possibility of adding all of the mathematical equations for the aircraft dynamics, and the equations that define the influence of the atmosphere on one flight. Assessing the efficiency of the aircraft model can be done by analyzing and comparing the similarities of both trajectories.

**KEY WORDS:** 4D trajectory; ATM; Designing an aircraft model; WGS84

# SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. OPERACIJE TEMELJENE NA PUTANJI .....	2
2.1. ATM.....	2
2.2. 4D NAVIGACIJA .....	3
2.3. 4D OPERACIJE TEMELJENE NA PUTANJAMA U SESAR .....	5
2.4. KARAKTERISTIKE OPERACIJA TEMELJENE NA PUTANJAMA .....	6
2.5. CONTROLLED TIME OF ARRIVAL (CTA) ILI CONTROLLED TIME OVER (CTO).....	7
2.6. RAZVOJ POSLOVNE PUTANJE .....	8
2.7. SUSTAV ZA RAZMJENU PODATAKA O LETU .....	9
3. MATEMATIČKI MODEL .....	10
4. OPIS MODELA PREDVIĐANJA PUTANJE ZRAKOPLOVA .....	12
4.1. STRUKTURA MODELA.....	12
4.2. MODUL BAZA ZRAKOPLOVNIH PODATAKA (BADA - BASE OF AIRCRAFT DATA).....	13
4.3. MODUL DINAMIKE ZRAKOPLOVA .....	18
4.4. MODUL FMS.....	20
4.4.1. UPRAVLJANJE MODELOM .....	20
4.4.2. DISKRETNO STANJE FMS .....	21
4.5. MODUL ATMOSFERE.....	23
4.5.1. DEFINICIJE .....	23
4.5.2. ODREĐIVANJE STANJA ATMOSFERE .....	24
5. VALIDACIJA MODELA .....	26
5.1. RUTNE INFORMACIJE ZRAKOPLOVA .....	27
5.2. UNOS PODATAKA POTREBNIH ZA IZRAČUNAVANJE PERFORMANSE ZRAKOPLOVA I STANJE ATMOSFERE .....	28
5.3. USPOREDBA PUTANJA .....	34
6. ZAKLJUČAK .....	38
7. POPIS KRATICA .....	39
Popis tabela :.....	40
Popis slika:.....	40
8. LITERATURA .....	41

## 1. UVOD

Evolucija i povećanje prometa u zrakoplovnoj djelatnosti zahtijevala je uvođenje i uspostavljanje novih koncepata u zračnom prometu poput: optimizacije putanje zrakoplova, operacije temeljene na putanji (TBO - Trajectory based operations ), prilaz s neprekinutim snižavanjem (CDA - Continuous descent approach), prilaz s neprekinutim snižavanjem u područjima s velikim prometom(ACDA - advanced CDA), rješavanje konflikata, upravljanje s dolascima (AMAN – arrival manager), te uvođenja bespilotnih letjelica (UAV – unmanned aerial vehicle). Napredak sustava za upravljanje zračnim prometom (ATM – air traffic management) direktno je povezan s razvojem zrakoplovstva u budućnosti.[1]

U tom smislu, buduće upravljanje zračnim prometom zahtijevat će niz alata da bi se pružila prikladna usluga korisnicima i inženjerima uključenim u ATM. Svrha ovih alata je simuliranje, testiranje i evaluacija bilo kojeg novog koncepta prije nego što bi ušao u uporabu.

Cilj ovog rada je dati prikaz dizajna softverskog alatamodela zrakoplova u koordinatnom sustavu WGS84, koji bi se koristio kako bi se predvidjela putanja zrakoplova, te procjena točnosti predviđene putanje usporedbom sa stvarnom putanjom zrakoplova. Rad ima šest poglavlja:

1. Uvod
2. Operacije temeljene na putanjama TBO
3. Matematički model zrakoplova
4. Opis modela predviđanja putanja zrakoplova
5. Validacija modela
6. Zaključak

U drugom poglavlju opisani su TBO-i, njihovi ciljevi, te zahtjevi potrebni za dostizanje i uspostavljanje TBO-a, prednosti i nedostaci 4D navigacije. Treće i četvrto poglavlje sadrže detaljni opis preuzetog modela, te svih modula koji su potrebni da taj model funkcionira. Peto poglavlje sadrži usporedbu simulirane putanje u programu MATLAB, sa stvarnim letom zrakoplova A320.

## 2. OPERACIJE TEMELJENE NA PUTANJI

### 2.1. ATM

Kontinuirani rast u prometnoj potražnji, te potreba zadržavanja sigurnosti usluga i ekspanzivnosti protoka prometa stvorili su potrebu za inovacijama i reformama u sustavu za upravljanje zračnim prometom (ATM – air traffic management).[4]

ATM je skup funkcija u zrakoplovu i na zemlji, potrebnih radi osiguranja sigurnog i učinkovitog kretanja zrakoplova tijekom svih faza operacija zrakoplova. Sam sustav ATM-a sastoji se od tri podfunkcije poput: pružanje zračnih usluga (ATS – air traffic services), upravljanje protokom zračnog prometa (ATFM – air traffic flow management), te upravljanje zračnim prostorom (ASM – airspace management).[4]

Provedba ATM-a se obavlja preko osoblja, tehničkim sustavima i procedurama, dok pružatelji usluga (ANSP – air navigation service providers) osiguravaju upravljanje protokom zračnog prometa, kako bi se izjednačila potražnja i kapacitet zračnog prostora, te podržavaju ostale usluge u zračnom prometu, kao usluge zrakoplovnog informiranja (AIS – aeronautical information service) i meteo usluge.[4]

U konvencionalnom ATM-u, srednjoročno planiranje obavlja kontrolor-planer posada i njihovi sustavi za upravljanja letom (FMS - flight management system), dok izvršavanje plana izvodi izvršni kontrolor i posada. Zahvaljujući desetljeću evolucijskog razvoja, suradnja između ovih dva sektora je optimizirana. Projekt Ujedinjeno Europsko nebo (SESAR – Single European Sky ATM research) uključuje niz promjena u procedurama. Centar ovih promjena je korištenje TBO-a. Koncept operacija za vremensko razdoblje nakon 2020-te nazvan je SESAR2020+, te sadrži veći broj preporuka. [2]

Mogućnosti današnje avijacije nisu u cijelosti iskorišteni kao posljedica malog kapaciteta zračnih luka, te rascjepkanosti zračnog prostora, što dovodi do ograničenja u povezanosti između ANSP usluga i ostalih usluga, što dalje rezultira do prekomjernimduljinama ruta , letovima s neoptimalnim profilima leta, te neiskorištavanju cjelokupnih maksimalnih kapaciteta prostora.[4]

Rascjepkanost prostora, kašnjenja u određenim rutnim segmentima, nedovoljna razmjena podataka su trenutni nedostaci sustava za koji je projekt SESAR predložio niz preporuka poput: operativne promjene u procedurama, tehničkih sustava, te standardizacija sustava, kao i određene mjere modernizacije, s ciljem povećanja efikasnost ATM sustava.[4]

Maksimiziranje učinkovitosti ATM sustava može se postići: povećanjem integriranosti između ANSP-a, zračnih luka, i korisnika zračnog prostora; određenim tehnološkim rješenjima; implementacijom, te razvojem Mrežnog plana (Network plan concept). Ostale izmjene u ATM sustavu koje bi uzrokovale značajnije promjene odnose se na vremenske gubitke koji se događaju na zračnim lukama, i za koje je glavni uzrok - nedostatak kapaciteta u istima.[4]

Povećanje kapaciteta na zračnim lukama može se postići: povećanjem integriranosti zračnog prometa s drugim tipovima prometa, implementacijom novih tehnologija, novih procedura, te boljom koordinacijom tijekom taktičkog planiranja leta.[5]

## **2.2. 4D NAVIGACIJA**

4D putanja zrakoplova sastoji se od tri prostorne dimenzije,te vremena kao četvrtedimenzije. To znači da je bilo kakvo odgađanje zapravo distorzija putanje, kao što bi bila promjena razine leta ili promjena horizontalne pozicije zrakoplova.Implementacijom 4D, intervencije sa strane kontrolora leta rijetko igraju ulogu na cjelokupnu putanju.[1]

Provedbu Upravljanja implementacijom 4D putanje, istražuje SESAR u EU i NextGen u US-u. Cilj je osigurati let po optimalnoj putanji, te što je dulje moguće da zrakoplov bude obvezan ispuniti točan vremenski termin dolaska iznad određene točke.[1]

### **Prednosti 4D operacija:**

- Poboljšanje operacija zračnog prometa povećanjem cjelokupne predvidljivosti prometa
- Optimalne operacije za zrakoplovne kompanije (zrakoplovi koji koriste željene rute i razine leta)
- Bolje pružanje usluga – manja iskrivljenost putanja
- Smanjeni troškovi (gorivo, vrijeme)
- Smanjene emisije
- Povećani kapaciteti(enroute i na zračnim lukama)- kontrolori će biti u mogućnosti obraditi veći broj letova na siguran način
- Lakše upravljanje prometom za kontrolora (manje konflikata). [1]

### **Nedostaci 4D operacija:**

- Ograničeni učinak, osim ako nije rasprostranjeno korištena tj. ako je samo dio putanje zrakoplova unutar TBO-a, limitiran je učinak, jer optimizirani dio putanje će biti kraći, te poremećaji nastali u prostoru gdje se ne primjenjuje TBO širili bi se na nepredvidljiv način. TBO ograničen na jedan funkcionalni blok zračnog prostora(FAB-functional airspace block)ima manju vrijednost ako putanja izlazi van granice FAB prostora.
- Tehnološki izazov - pojavljuje se potreba za novom opremom zrakoplovu, ANSP-a i zračnih luka
- Promjena odnosa- kontrolori moraju shvatiti njihov učinak na trajektoriju kao cjelinu, također piloti moraju prihvatiti više ograničenja (zrakoplov mora doći iznad određene točke u određenom vremenskom intervalu, niti ranije niti kasnije)
- Detektiranje konflikta postaje zahtjevniji posao - trenutna struktura zračnog prostora je takva da se većina konflikta dogodi na određenim točkama. Međutim



uvođenjem TBO putanja, standardnih zračnih putova i točke konflikta više neće imati iste koordinate.

- Otkaz opreme- kapaciteti sektora će biti preračunati da bi se uskladili sa zahtjevima TBO operacija, tako da može doći do preopterećenja kontrolora u slučaju kvara opreme npr. kvar sustava za nadzor.[1]

#### **Tehnološki zahtjevi:**

- poboljšanja meteo modela u FMS-u
- poboljšanja FMS-a da bi se poboljšala sposobnost ispunjavanja vremenskih ograničenja
- uvođenja komunikacija između pilota i kontrolora preko podatkovne mreže (CPDLC-controller pilot data link communications)
- uvođenja upravljanja s podacima unutar sustava (SWIM-system wide information management) [1]

### **2.3. 4D OPERACIJE TEMELJENE NA PUTANJAMA U SESAR**

Prema SESAR-u, korisnici zračnog prostora skupa s ANSP-pružateljima usluga i operatorima aerodroma, moraju pristati na određenu zajedničku putanju. Zrakoplovi i zemaljski sustavi će morati razmjenjivati informacije o putanji i o trenutnoj mogućnosti zrakoplova da ispunizadani CTA. Uvođenje upravljanja s 4D putanjama će se, kako je zakazano, dogoditi u dvije faze. Prva se zove Početna 4D (i4D), a druga Full4D. Sama podjela na dvije faze dolazi iz toga da i4D ne predstavlja tehnički izazov. To znači da pozitivni učinci uporabom i4D se mogu postići s manjom nadogradnjom na tehničkim uređajima, za razliku od Full4D.[1]

I4D sastoji se od davanja vremenskih ograničenja zrakoplovu, koja se odnose na točku spajanja, prema kojoj se više zrakoplova približava, u svrhu sekvencioniranja prometa u prilazu.

Najkorištenija točka spajanja je Initial Approach Fix (IAF). Ovaj tip sekvencioniranja bi se mogao koristiti u blizini nekog aerodroma s više prometa.[1]

#### **2.4. KARAKTERISTIKE OPERACIJA TEMELJENE NA PUTANJAMA**

Operacije temeljene na putanjama ključni su element budućeg koncepta ATM sustava. Omogućavaju da korisnik sam odabire željenu putanju, prema svojim namjerama, složena na najučinkovitiji i isplativiji način, s najmanjim utjecajem na okoliš. Zahtjev korisnika moraju odobriti pružatelji zrakoplovnih usluga i zračna luka.[6]

Prednost TBO je da se korisnik ne mora pridržavati fiksne rutne strukture, te da njegova odgovornost obuhvaća poslovnu putanju (BT – business trajectory), a u ostalim slučajevima kada dolazi do promjena u planu leta zbog određenih utjecaja sa strane ograničavajućih faktora ATM-a, korisnik može tražiti alternativnu putanju.[6]

TBO započinje splaniranjem prije polaska i nastavlja s kontrolom zračnog prometa u stvarnom vremenu. Jedan od temelja na kojemu se zasniva je - poboljšanje razmjene informacija. Definira do kojeg stupanj je potrebno pridržavati se na putanji, da bi se održali specifične funkcije prilaza s neprekinutim snižavanjem.[2]

Cilj TBO-a je omogućiti sigurno i ekspeditivno rješavanje povećanja opterećenja prometa, poboljšanjem predvidljivosti u ATM sustavu, zadržavajući učinkovitost tog sustava. S kontinuiranim dijeljenjem i ažuriranjem trenutnog stanja putanje leta, između svih sudionika ATM sustava, svima se povećava mogućnost za aktivno sudjelovanje u događajima, istovremeno povećavajući ukupnu učinkovitost leta zrakoplova i procese otpreme zrakoplova.[2]

#### **POKAZATELJ POTROŠNJE**

U današnjim operacijama, korisnici zračnog prostora uvijek upotrebljavaju indeks troškova (CI-cost index) da bi omogućili let zrakoplova na način koji najbolje odgovara potrebama zrakoplovnih kompanija.[8]

Indeks troškova jednog leta je omjer troškova goriva na ukupnu cijenu putovanja, u odnosu na troškove poslovanja vezane uz vrijeme leta zrakoplova. Ako je vrijednost

indeksajednaka nuli znači da je brzina u postavkama za maksimalni dolet i da je potrošnja goriva minimalna, ignorirajući svaki trošak vezan uz vrijeme. Maksimalna vrijednost CI-a znači minimalni vremenski period leta zrakoplova, bez obzira na vrijednost troškova goriva. [8]

Posada unosi podatke ranijeizračunatog CI-a, te unosi ga u sustav za upravljanje s letom (FMS – flight management system). FMS tada koristi taj broj i druge parametre za izračunavanje parametara potrebnih za brzinu penjanja, brzinukrstarenja i brzinu spuštanja, kako bi se optimizirao let za kojeg bi bilo poznato ukupno potrošeno gorivo u odnosu na provedeno vrijeme (time cost). [8]

## **2.5. CONTROLLED TIME OF ARRIVAL (CTA) ILI CONTROLLED TIME OVER (CTO)**

Kontrolirano vrijeme dolaska (CTA - controlled time of arrival) ili vrijeme iznad neke točke (CTO – controlled time over) je novi koncept odobrenja sa strane kontrolora, koji se trenutno istražuje u SESAR-u.[8]

CTO/CTA je izdan od strane kontrolora, zrakoplovu u letu, te uvjetuje let u smislu da zrakoplov mora stići na određenu točku u određeno vrijeme. SESAR-ov prototip i4D FMS je trenutno sposoban da se pridržava vremenskom ograničenju s tolerancijom od 10 sekundi.[8]

Kao i kod bilo kojeg drugog odobrenja od strane ATC-a, posada zrakoplova je obvezna tražiti ili obavijestiti ATC ako u bilo kojem trenutku dođe do znanja da nemogu ispuniti prethodno odobrenje. CTO/CTA odobrenje je izrečeno na frekvenciji ako ulazi unutar zahtijevanog vremena dolaska (RTA - required time of arrival), što čini CTO/CTA ostvarljiv uz stopu pouzdanosti od 95%. Uporaba ovih tipova vremenskih ograničenja se trenutno provjerava i validira unutar SESAR-a.[8]

Mogućnost primjene više ograničenja na putanju se istražuje. Ovaj koncept ima potencijal za stvaranje neučinkovitih profila leta, ako se ne primjenjuje oprezno. Prema tome, kada se priroda tih ograničenja istražuje, učinkovitost cijelog profila leta mora biti uzeta u obzir. [8]

## 2.6. RAZVOJ POSLOVNE PUTANJE

Jedan način za opisivanje jednog leta je preko putanja. Svaki let može imati poslovnu ili operativnu putanju, ovisno o tome radi li se o vojnoj ili civilnoj avijaciji. Jedna poslovna putanja ima definirani početak i kraj, te puno razvojnih faza. Svrha jednog ATM sustava je smanjiti broj ograničenja unutar jednog leta, tijekom svih faza. S ciljem povećanja preciznosti leta, putanja jednog zrakoplova izražava se u četiri dimenzije, tri prostorne i jedna vremenska. Postoje tri razvojne faze za putanju[6]:

Poslovna razvojna putanja ( BDT – business development trajectory)- početak planiranja BDT je vremenski neograničen, te ovisi o potrebama korisnika. U svrhu stvaranja rasporeda ovaj ciklus može započeti i godinu dana prije operacije.[6]

Dijeljenjem poslovne putanje (SBT – shared business trajectory)- s potrebnim informacijama od BDT-a, ANSP može prilagoditi poslovnu putanju kad postane dostupna ATM sustavima. Prema potrebama i kompleksnosti prometa, pružatelj usluga upravlja zračnim prostorom.[6]

Referentna poslovna putanja ( RBT – reference business trajectory)-nastaje neposredno prije početka leta, te nastavlja se razvijati tijekom leta. Nizom odobrenja referentna poslovna putanja se nastavlja razvijati na dva načina: automatski kada se predviđena putanja razlikuje od referentne, te može biti ručno pokrenuta u slučaju nemogućnosti realizacije RBT-a.[6]

U nekim slučajevima potrebno je izvršiti reviziju određenih segmenta referentnoj putanji. U tom slučaju pružatelj zrakoplovnih usluga dužan je izdati upute, te pratiti situaciju zrakoplova i njegovu 4D putanju. U izvanrednim situacijama kada je potrebna promjena putanji, sustavi u zrakoplovu rješavaju sekvencioniranje, razdvajanje, loše meteo uvjete, te bilo koje druge promjene.[6]

## 2.7. SUSTAV ZA RAZMJENU PODATAKA O LETU

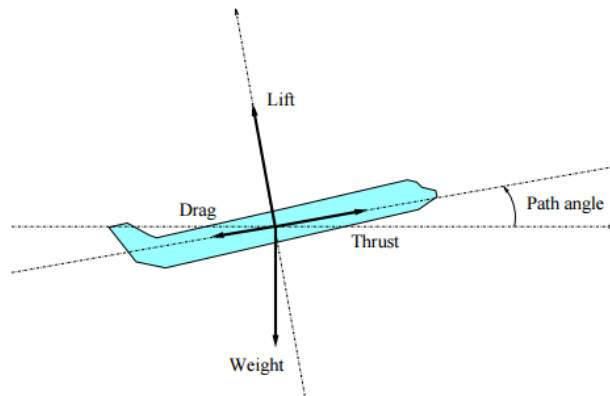
Sustav za razmjenu podataka (Data communication system) omogućava reviziju putanje preko: niza odobrenja, te prognoza i ažuriranje informacija o letu dok je u zraku. Istovremeno osigurava najbolje iskorištenje zračno-zemaljskih sustava. S ovim bi se osiguralo ažuriranje i integriranost 4D putanja i bila bi kompatibilna sistemima u zraku i na zemlji.[8]

Rad u TBO okruženju daje čist prikaz limitirajućih faktora, koji se mogu pojaviti u jednom individualnom letu tijekom određenog perioda vremena, te lateralno ili vertikalno ograničiti trajektoriju.[8]

Kao jedan ekstrem, bezobzirnim inzistiranjem na potpunom pridržavanju TBO, te uz statične vrijednosti na početku leta, sama učinkovitost leta omogućena sa zrakoplovnim sistemom će biti ugrožena. Kao drugi ekstrem, omogućujući potpunu fleksibilnost svim korisnicima zračnog prostora, učinkovitost ATM mreže može biti smanjena, što će utjecati na poslovne ciljeve korisnika zračnog prostora. Tu se dakle pojavljuje problem balansiranja potrebe ATM sistema i individualnih potreba korisnika zračnog prostora.[8]

### 3. MATEMATIČKI MODEL

#### I. THE POINT-MASS MODEL



Slika 1. Model točkaste mase [3]

Ako u horizontalnom letu sile  $T = D$  i  $G = L$ , onda:

$$\frac{T}{G} = \frac{D}{L} \quad (1)$$

T - sila potiska[N]

G - sila gravitacije[N]

L - Sila uzgona[N]

D - sila otpora[N]

$$T = G * \frac{D}{L} \quad (2)$$

$$m * a = m * g * \frac{D}{L} \quad (3)$$

m -masa zrakoplova[kg]

a-akceleracija[m/s<sup>2</sup>]

g-zemljino ubrzanje[m/s<sup>2</sup>]

U penjanju ili spuštanju sila gravitacije bi djelovala pod nekim kutem penjanja/spuštanja te jednačba stanja zrakoplova bi izgledala ovako<sup>1</sup>[3]:

$$D + m * g * \sin\gamma + m * a = T \quad (4)$$

$$m * a = T - D - m * g * \sin\gamma \quad (5)$$

$\gamma$ -kut između vodoravne površine i putanja zrakoplova.

$$T - D = m * a + m * g * \sin\gamma / * V_{TAS} \quad (6)$$

$V_{TAS}$  - stvarna brzina leta.

$$(T - D) * V_{TAS} = m * a * V_{TAS} + m * g * \sin\gamma * V_{TAS} \quad (7)$$

Ako je ubrzanje jednako  $a = dV/dt$ , te uvedemo novu veličinu, brzinu penjanja  $V_{TAS} * \sin\gamma = dh/dt$  dobit će se [3]:

$$(T - D) * V_{TAS} = m * \frac{dV_{TAS}}{dt} * V_{TAS} + m * \frac{dh}{dt} \quad (8)$$

$\frac{dh}{dt}$  – brzina penjanja.

Lijevi dio jednačbe se može gledati kao rad sila koje djeluju na zrakoplov, a desni dio jednačbe predstavlja varijacije ukupne energije.[3]

---

<sup>1</sup>Pretpostavlja se da sile T i D imaju isti smjer i pravac kako i  $V_{TAS}$

## 4. OPIS MODELA PREDVIĐANJA PUTANJE ZRAKOPLOVA

### 4.1. STRUKTURA MODELA

Alat koji bi mogao predvidjeti i evaluirati putanju bilo kojeg zrakoplovatrebao bi imati više komponenata od kojih sljedeća tri su najvažnija: izračunavanje dinamike zrakoplova, FMS i simulacija. Prvi softverski modul za ovaj alat koji određuje dinamičko stanje zrakoplova sastoji se od šest varijabli stanja[7]:

1. Geografska širina- $\varphi$
2. Geografska duljina - $\lambda$
3. Visina - h
4. Brzina leta - V
5. Pravac leta - $\psi$
6. Masa zrakoplova- m.

Prve tri varijable se koriste kako bi se unijela točna pozicija zrakoplova u geodetski koordinatni sustav WGS84. Utjecaj vjetra se također mora uzeti u obzir jer direktno utječe na dinamiku zrakoplova, a može se izraziti pomoću tri komponente vektora, koji kad se zbroje definiraju smjer i jačinu. Ulazni podaci početnog stanja zrakoplova su prethodno navedenih šest varijabli stanja i utjecaja atmosfere. Točke s kojim je ruta definirana su zadane u planu leta zajedno s podacima o visini, geografskoj širini i dužini. Koordinate točaka na ruti prolaze preko modula upravljanja letom tzv. FMS zajedno s ova dva modula, koji su ograničeni sa modulima ISA i BADA jer se kreira trajektorija jednog leta.[7]

Na kraju treće komponente alata je prezentiranje i vizualiziranje modela korisnicima. Ovaj modul omogućuje uporabu podataka potrebnih za simulacije. Baza podataka se isto može koristiti za validaciju modela i usporedbu s letovima u stvarnim uvjetima. [7]



#### **4.2. MODUL BAZA ZRAKOPLOVNIH PODATAKA(BADA - BASE OF AIRCRAFT DATA)**

Učinkovitost operacija u zračnom prometu oslanja se na sustavu ATM-akako bi sigurno i realno predvidjeli trajektorije zrakoplova. Isto tako, ATM istraživanja i razvojne aktivnosti zahtijevaju alate za modeliranje i simuliranje operacija u stvarnosti i zrakoplovne performanse na najbolji mogući način.[11]

Da bi se omogućilo takvo modeliranje i simulacija na putanje zrakoplova, za svaki zrakoplov koji je u uporabi mora postojati također odgovarajući APM – aircraft performance model. U tom smislu je EUROCONTROL, u suradnji s proizvođačima zrakoplova i zrakoplovnih kompanija, stvorio i održava bazu APM-a koja se zove BADA-base of aircraft data.[11]

BADA je skup ASCII datoteka koje sadrže parametre o operativnim performansama, parametre procedura zračnih kompanija i sažete tablice o performansama za 338 tipova zrakoplova. Ovi podaci su stvoreni u svrhu korištenja u simulaciji putanja i algoritmima predviđanja unutar ATM-a. Sve datoteke su održavane unutar sustavaza upravljanje konfiguracijama u tehničkom centru Eurocontrol-u, Francuska.[11]

Informacije o performansama i ostalim specifikacijama koji sadrži BADA, i koje se koriste u izradi modela jednog zrakoplova, koji bi se kasnije koristio za simulacije jesu: [11]

Tabela 1: Informacije o performansama [11]

PARAMETAR	VRIJEDNOST (PRIMJER)
Model, Tip zrakoplova	Airbus A321-111
Broj motora i tip pogona	2 CFM international CFM 56-5B jet
ICAO kategorija turbulencije	M (medium)
Masa(kg) zrakoplova	MTO: 83000, BOW: 47800, Max payload: 21700, Reference:72000
Maksimalna brzina	CAS(knots): 350, Mach: 0.82
Plafon leta (ft) od MSL	39000ft
Površina raspona krila (m <sup>2</sup> )	122.6
Brzina Stalling-a (kt, CAS)	U krstarenje: 145 Početak penjanja: 129 Trenutak uzdizanja: 118 Prilaz: 106 Sljetanja: 103
Brzina penjanja (kt/Mach)	250-300 / 0.78
Brzina spuštanja (kt/Mach)	250-300 / 0.78
Brzina krstarenja (kt/Mach)	250-300/ 0.78
Referentna brzina spuštanja prema BADA(kt/Mach)	250-300/ 0.78

### MODEL I TIP MOTORA

Vrsta motora i broj motora je informacija koja se uzima od proizvođača. Sve daljnje karakteristike i specifikacije zrakoplova ovise o tome koja će se vrsta motora odabrati.[11]

### KATEGORIJA TURBULENCIJE

ICAO oznaka i ICAO kategorija turbulencije uzimaju se od publikacije ICAO-a. (<http://www.icao.int>) [11]

## MASA

Informacije o vrijednosti mase zrakoplova se uzimaju iz baze podataka koju omogućuju proizvođači zrakoplova, i moraju biti specifični i kompatibilni sa modelom/verzijom zrakoplova koji je modeliran u BADA. Sljedeće mase, potrebne za daljnje preračune su navedene u bazi podataka:[11]

- Maksimalna masa zrakoplova – MTOW ( maximum take off weight) – najveća dopuštena masa zrakoplova za uzlijetanje
- Minimalna masa zrakoplova – OER (operating empty weight). U slučaju kada OEW nije dostupan, koristi se BOW (basic operating weight) ili BEW (basic empty weight)
- Maksimalna masa tereta –Payloadmax- MZFW (maximum zero fuel weight) – masa zrakoplova s minimalnom količinom goriva i maksimalnom masom tereta
- Referentna masa zrakoplova – Masa definirana od BADA-e, koja je na 70% vrijednosti između MTOW i OEW.  $((MTOW - OEW) * 0.7)$ . [11]

## MAKSIMALNA VISINA LETA

Za izračunavanje plafona leta  $h_{max/act}$  koriste se temperaturni gradijent - Gt, gradijent mase na maksimalnoj visini - Gw, maksimalna visina pri letu s maksimalnom masom -  $h_{mo}$ ,  $h_{max}$ , te promjena temperature u ISA uvjetima  $\Delta T_{ISA}$ . [11]

## MINIMALNA BRZINA

Minimalna brzina zrakoplova ovisi o tome u kojem djelu leta je zrakoplov. Za izračunavanje moraju biti poznati brzina pri kojoj je zrakoplov u stalling-u, te koeficijenti minimalne brzine za taj tip zrakoplova. Prema BADA-e brzina stalling-a u krstarenju bi imala najveću vrijednost u krstarenju, a najmanja pri sljetanju. [11]

## AERODINAMIČKA SVOJSTVA

Polazeći od uvjeta da u horizontalnom letu, kut penjanja je jednak nuli i da  $F_G = F_L$ , dobije se jednačina[11]:

$$F_G = F_L; \quad (9)$$

$$F_G = m * g; \quad (10)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_{TAS}^2 S * \cos\phi \quad (11)$$

$$m * g = \frac{1}{2} C_L \rho V_{TAS}^2 S * \cos\phi \quad (12)$$

$$C_L = \frac{2 * m * g}{\rho * V_{TAS}^2 * S * \cos\phi} \quad (13)$$

G -zemljino ubrzanje ( $m/s^2$ ),

$V_{TAS}$ - stvarna brzina leta,

$\rho$  – gustoća zraka ( $kg/m^3$ ),

$\phi$  – kut bočnog nagiba.

Taj dobiven izraz(13) s kojim se može dobiti koeficijent uzgona koristit će se u daljnjem modelu. Vrijednost koeficijenta otpora koji će se koristiti u modelu ovisi o koeficijentu uzgona, međutim u različitim fazama leta ima različitu vrijednost, kao rezultat različitih vrijednosti parazitnog i induciranog otpora.[11]

Tako da jednačina za silu otpora D, koja bi se koristila u modeliranju(14)[11]:

$$D = \frac{1}{2} * C_D * \rho * V_{TAS}^2 * S \quad (14)$$

## MAKSIMALNI POTISAK PRI POLIJETANJU I PENJANJU

Polazeći od činjenice da sila potiskanije konstantna i ovisi o temperaturi i gustoći zraka, te o tipu pogona zrakoplova, maksimalni potisak bi za svaki tri tipa pogona, mlazni, turboprop i klipni, imao različita vrijednost, te ovisio bi o vrijednosti koeficijentaza penjanju za maksimalnog potiska koji je različiti za svaki tip pogonskog sustava.[11]

## MAKSIMALNI POTISAK U KRSTARENJU

Vrijednost maksimalnog potiska tijekom polijetanja pomnožen s koeficijentom potiska pri krstarenju  $C_{TCR}$ , koji je univerzalan za sve zrakoplove i iznosi 0.95, daje vrijednost  $(T_{cruise})_{MAX}$ [28][11]:

$$T_{CRUISE} = C_{TCR} * (T_{CLIMB})_{MAX} \quad (15)$$

## POTROŠNJA GORIVA

Za mlazne i turboprop zrakoplove, nominalna potrošnja goriva,  $f_{nom}$ [kg/s] dobije se kao umnožak sile potiska  $T$  i specifične potrošnje goriva  $\eta$ [kg/(min\*kN)][11].

### 4.3. MODUL DINAMIKE ZRAKOPLOVA

Kako bi se na najrealističniji način predstavilo gibanje zrakoplova, te dinamično stanje svih parametara koji limitiraju taj proces, koristi se model TEM-Total Energy Model ili PMM-Point Mass Model. Korištenjem zakona osnove aerodinamike i izjednačavanjem sprega sila koje utječu na zrakoplov, koje bi izgledalo kao na slici br.1 , dobije se model zrakoplova koji može biti opisan kao sistem od šest varijabli stanja(34)[7][9].

$$= \begin{cases} \frac{x_4 \sin(x_5) \cos(u_3) + w_1 \phi}{R_M + (x_3)} \\ \frac{x_4 \cos(x_5) \cos(u_3) + w_2 \lambda}{\cos \Phi (R_T + (x_3))} \\ x_4 \sin(u_3) + w_3 h \\ -\frac{C_D S \rho (x_3) x_4^2}{2 x_6} - g \sin(u_3) + \frac{1}{x_6} u_1 \\ \frac{C_L S \rho (x_3) x_4}{2 x_6} \sin(u_2) \\ -\eta u_1 \end{cases} \quad [7][9] \quad (16)$$

u kojem  $C_L$  i  $C_D$  su aerodinamički koeficijenti uzgona i otpora,  $S$  je ukupna aerodinamička površina krila,  $\rho$  je gustoća zraka, i  $\eta$  je koeficijent koji povezuje potisak s potrošnjom goriva.

$X_1$ .  $\phi$  – zemljopisna širina

$X_2$ .  $\lambda$  – zemljopisna dužina

$X_3$ .  $R_M + h$ -visina zrakoplova

$X_4$ .  $V$ -stvarna brzina zrakoplova

$X_5$ .  $\Psi$ -smjer zrakoplova

$X_6$ .  $m$  -masa zrakoplova

Potrebni podaci koji se također moraju unijeti:

$U_1$  - sila potiska,

$U_2$  -  $\Phi$ -kut bočnog nagiba,

$U_3$  -  $Y$ -kut poniranja/penjanja,

$U_4$  -  $C_D$ -koeficijent otpora,

$R_t$ - transverzalni radijus zakrivljenosti,

$R_m$ -meridijalni radijus zakrivljenosti.

#### 4.4. MODUL FMS

Sustav FMS se može smatrati kao kontrolor koji mjeri parametre dinamičkog stanja zrakoplova, ili zajedno te podatke sa informacijama o planu leta koristiti kako bi odredio ulazne vrijednosti,  $u$ . [7]

##### 4.4.1. UPRAVLJANJE MODELOM

U našem modelu pretpostavljamo da se kontrola horizontalne pozicije zrakoplova obavlja preko ulazne vrijednosti kuta bočnog nagiba  $u_2$ . Ovo se može napraviti prvo preko kontroliranja smjera zrakoplova koristeći formulu [7]:

$$\dot{x}_5 = \frac{C_L S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4}{x_6} \sin(u_2) \quad (17)$$

Tada  $x_5$  može biti korišten za kontrolu horizontalne pozicije zrakoplova  $(\varphi, \lambda)$  preko jednadžbe [7]:

$$\dot{\varphi} = \frac{x_4 \sin(x_5) \cos(u_3) + w_1 \phi}{R_M + h} \quad (18)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{x_4 \cos(x_5) \cos(u_3) + w_2 \lambda}{\cos \phi (R_T + h)} \quad (19)$$

Model pretpostavlja da FMS postavlja kut bočnog nagiba bazirano na uvjetu postoji li greška u HDG i devijacije od početne putanje [7].

Sila potiska  $u_1$  i kut penjanja/spuštanja zrakoplova  $u_3$  koriste se kako bi se odredila brzina leta i brzina penjanja/spuštanja. U krstarenju, FMS postavlja kut penjanja jednak nuli, pri čemu je brzina penjanja/spuštanja jednaka nuli, te onda se potisak koristi kako bi se upravljalo brzinom preko jednadžbe [7]:

$$\dot{x}_4 = -\frac{C_D S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4^2}{x_6} - g \sin(u_3) + \frac{1}{x_6} u_1 \quad (20)$$



U fazama spuštanja ili penjanja, sila potiska je fiksna, te je kut penjanja onda prilagođen kako bi se kontrolirala brzina preko jednadžba (38). FMS tad prihvaća vrijednost brzine penjanja iz formule(39)[7]:

$$v_3 = x_4 \sin(u_3) + w_{3h} \quad (21)$$

#### **4.4.2. DISKRETNO STANJE FMS**

Može biti predstavljeno kao skup varijabli, počinjući od: FL- razina leta, WP-waypoint indeks-skup preletnih točaka, AM-Mod akceleracije, CM - mod penjanja, SHM – mod nominalne brzine, FP-flight phase-faza leta, RPM-reduced power mode-mod leta u uvjetima kada je snaga smanjena, TrM-troposphere mode[7].

##### **4.4.2.1. ACCELERATION MODE**

Mod akceleracije–sadrži tri stanja:

- A (accelerate) – brzina se povećava
- C (constant) – brzina je konstantna
- D(decrease) – brzina se smanjuje

Ovisno o nominalnoj brzini stvarnoj brzini zrakoplova određuje se stanje Mod akceleracije. Kada je razlika između njih veća od 0.5m/s dolazi do promjena u modu akceleracije.[7]

##### **4.4.2.2. CLIMB MODE**

Mod penjanja također sastoji se od tri stanja:

- L – održavanje visina leta
- C – penjanje
- D – spuštanje

Prelaz iz jednog u drugo stanje događa se u slučaju kada je odstupanje od zahtijevane visine više od 20 m. Vrijednost zahtijevane visine leta se može naći u planu leta[7].

#### 4.4.2.3. FLIGHT PHASE

Mod faze letakoristi se za određivanje trenutne faze leta koja se može odrediti prema modu penjanja, trenutnoj visini, kalibriranoj brzini i tipu zrakoplova. Ovisno o tome, faze leta mogu biti[7]:

- TO - take off polijetanje
- IC - initial climb početno penjanje
- CR - cruise krstarenje
- AP - approach prilaz
- LD - landing slijetanje

#### 4.4.2.4. VOĐENJE ZRAKOPLOVA PO HORIZONTALNOJ RAVNINI

Promjenom kuta nagiba  $u_2$  vrši se upravljanje zrakoplovom po horizontalnoj ravnini, te se najčešće radi u slučaju pogreške u smjeru, odnosno devijacija od željene putanje zrakoplova od referentne. Kut nagiba se preračunava kao funkcija  $\text{atan2}$  ( $\text{atan2}$ ) od vrijednosti, smjer između trenutnih točaka rute i trenutne pozicije zrakoplova u odnosu na sljedeću točku(46)(47)[7].

$$\Psi_{AB} = \text{atan2}(\lambda_2 - \lambda_1; \phi_2 - \phi_1) \quad (22)$$

$$\Psi_{CB} = \text{atan2}(\lambda_2 - \lambda_3; \phi_2 - \phi_3) \quad (23)$$

$\Psi_{AB}$ -smjer između trenutnih točaka rute

$\Psi_{CB}$ -smjer između trenutne pozicije i sljedeću točku na rute

Da bi se izračunao utjecaj vjetra moraju se izračunati smjer, brzina vjetra, upadnog kuta vjetra, s čim bi se dalje mogla raditi ispravka smjera zrakoplova[7].

## 4.5. MODUL ATMOSFERE

Ovaj modul sadrži izraze za atmosferska svojstva kao što su tlak, temperatura, gustoća i brzina zvuka, koje su funkcije visine i koje su jedan od zahtjeva za preračunavanja zrakoplovnih performansa. Pretvorbe iz CAS u TAS i u Machov broj također zahtijevaju određivanje nekoliko atmosferskih svojstava koje su funkcije visine[11].

### 4.5.1. DEFINICIJE

Mean Sea Level (MSL) standardni uvjeti atmosfere su oni koji se pojavljuju u uvjetima ISA –standardne atmosfere u točki gdje je geopotencijalna visina prema tlaka jednaka nuli. Označeni su kao  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\rho_0$  i  $a_0$ . [11]

- Temperatura u standardnim atmosferskim uvjetima na MSL:  $T_0 = 288.15$  [K]
- Tlak u standardnim atmosferskim uvjetima na MSL:  $p_0 = 101325$  [Pa]
- Gustoća u standardnim atmosferskim uvjetima na MSL:  $\rho_0 = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Brzina zvuka:  $a_0 = 340.294$  [m/s]

Mean Sea Level (MSL) atmosferski uvjeti su oni koji se pojavljuju u nestandardnim atmosferskim uvjetima (non-ISA), te razlikuju se od  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\rho_0$  i  $a_0$ . [11]

Nestandardni atmosferski uvjeti su oni koji slijede iste pretpostavke kao i ISA, međutim razlikuju se jer je jedan ili oba od sljedećih parametara jednak nuli [11]:

- $\Delta T$ -temperaturna razlika između ISA i non-ISA uvjeta

- $\Delta p$ -razlika u tlakovima između ISA i non-ISA uvjeta

Tropopauza je separacija između dva sloja atmosfere: Troposfera koja se nalazi ispod tropopauze i stratosfera koja se nalazi iznad. Visina tropopauze je konstantna kada je izražena u jedinicama geopotencijalne visine. [11]

#### 4.5.2. ODREĐIVANJE STANJA ATMOSFERE

Kako bi odredili stanje atmosfere, potrebno je odrediti temperaturu zraka, tlakzraka, gustoću zraka, brzinu zvuka, način pretvaranje stvarne brzine leta u kalibriranu brzinu, način pretvaranja Machovog broja u kalibriranu brzinu, te visinu na kojoj se promjena od kalibrirane brzine u Machov broj događa.[11]

Temperatura zraka je funkcija visine leta (24), međutim također može varirati neovisno o visini. Bitno pri izračunavanju temperature je gradijent promjene temperature  $K_T$  koji je jednak  $(-0.0065) \left[ \frac{K}{m} \right]$ . [11]

$$T_{trop} = T_0 + \Delta T + K_T H_p \quad (24)$$

Tlak zraka [Pa] ispod tropopauze je funkcija temperature (25). Također za određivanje tlaka zraka potrebne su vrijednosti:  $P_0$  – standardni atmosferski tlak na MSL koji iznosi 101325 [Pa];  $g$  - zemljino ubrzanje koje iznosi 9.80665 [m/s<sup>2</sup>]; te  $R$  – univerzalna plinska konstanta koja iznosi 287,05287 m<sup>2</sup>/ks<sup>2</sup>. [11]

$$p_{trop} = p_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{K_T \cdot R}} \quad (25)$$

Gustoća zraka se izražava u  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ , te se može izračunati preko tlaka zraka i temperature na određenoj visini korištenjem zakona idealnog plina (26). [11]

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (26)$$

Brzina zvuka, je brzina na kojoj valovi tlaka putuju kroz fluid, te je funkcija temperature zraka. Može se izraziti preko (68) [11]:

$$a = \sqrt{kRT} \quad (68)$$

Iznad tropopauze brzina zvuka je konstantna, jer je temperatura konstantna. [11]

$$a = 295.07 \text{ m/s} \quad (28)$$

Stvarna brzina,  $V_{TAS}$ , se može izračunati kao funkcija kalibrirane brzine (29)  $V_{CAS}$ , te kalibrirana brzina se može također izraziti preko stvarne brzine (30). Ostale varijable koje utječu na vrijednosti stvarne i kalibrirane brzine su: gustoća zraka, tlak zraka, te  $\gamma$ -koeficijent ekspanzije zraka koji iznosi 1,4.[11]

Pretvaranje Mach-a u stvarnu brzinu leta i obrnuto, ovisi o temperature zraka.[11]

$$V_{TAS} = \left[ \frac{2P}{\mu\rho} \left\{ \left( 1 + \frac{p_{0ISA}}{P} \left[ \left( 1 + \frac{\mu\rho_{0ISA}}{2P_{0ISA}} V_{CAS}^2 \right)^\mu - 1 \right] \right)^\mu - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$V_{CAS} = \left[ \frac{2P}{\mu\rho} \left\{ \left( 1 + \frac{p_{0ISA}}{P} \left[ \left( 1 + \frac{\mu\rho_{0ISA}}{2P_{0ISA}} V_{TAS}^2 \right)^\mu - 1 \right] \right)^\mu - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\mu = \frac{\gamma-1}{\gamma}; \quad (31)$$

Prijelazna visina  $h_{p,trans}$  [ft], je geopotencijalna visina na kojoj  $V_{CAS}=M$ , te je funkcija omjera temperature na prijelaznoj visini -  $\theta_{trans}$  (32)(33).[11]

$$V_{TAS} = M\sqrt{\gamma RT} \text{ ili} \quad (32)$$

$$M = \frac{V_{TAS}}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (33)$$

## 5. VALIDACIJA MODELA

U ovom poglavlju predviđena putanja simuliranog modela zrakoplova A320, za koji su sve podatke o performansama uzete s BADA-e, usporedit će se s putanjom stvarnog zrakoplova A320, za koji su podaci o poziciji, vremenu leta, te ostale podatke o letu, preuzete iz QAR<sup>2</sup>. Preuzete informacije iz QAR-a su prilagođene, kako bi bile kompatibilne s korištenim funkcijama u programu simulacije MATLAB. Podaci o poziciji, visini, brzini, smjeru, snimljeni su 8 puta u sekundi, dok podaci o vjetru, potrošnji goriva, temperaturi zraka su snimljeni na većim vremenskim intervalima.

Pozicija zrakoplova izražena je u koordinatama WGS84 sustava kao: geografska širina i geografska dužina u stupnjevima, te visina u metrima. Podaci o geografskoj širini i dužini, u svrhu simulacije, pretvaraju se iz stupnjeva u radijane. Podaci o visini uglavnom će se koristiti u metrima, aliu nekim jednadžbama vršit će se pretvorba iz metara u stope i obrnuto, u ostalom smjer zrakoplova cijelo vrijeme računati će se u stupnjevima 0-360, te brzina zrakoplova u metrima u sekundi.

Određene točke snimljene u putanju stvarnog zrakoplova, određene su kao putne točke planuleta koji će se simulirati. Od ukupnog broja točaka 47190, snimljene u vremenskom intervalu od 5900s ili 98 minuta, odabrane su 21 točke koje bi služile kao plan leta.

---

<sup>2</sup>Quick access recorder

## 5.1. RUTNE INFORMACIJE ZRAKOPLOVA

Potrebno vrijeme pokretanja sustava za snimanja podataka QAR, i prikazivanja trenutnoj poziciji zrakoplova se može utvrditi da je oko 10 s. Početna pozicija zrakoplova je aerodrom Pleso, Velika Gorica, Hrvatska[45.741653, 16.067326], te destinacija Paris-Charles de Gaulle[9.026276, 2.553489]. Približna duljina rute je 1153km. Početna visina je 110.5m. Početni smjer leta je 47.1°. Zrakoplov započinje penjanje, te dostigne visinukrstarenja 11582m za 1978s. Faza leta krstarenjatraje 1724s, u kojoj zrakoplov zadržava visinu, i smjer 270°. Nakon krstarenja zrakoplov započinje spuštanje skretanjem prema desno u smjer 316°. Prvi dio spuštanja traje 198s, u koji zrakoplov spušta na visini 10662m. Drugi dio spuštanja traje 409s, u koji se zrakoplov spusti do 8516m. Treći dio spuštanja traje 616s, u koji zrakoplov spušta do 3457m, usmjeren u 305.9°. Spuštanje u finalnom prilazu zrakoplov započinje na 2733m, i u roku od 518s slijećena aerodrom destinacije.

**Tabela 2. Plan leta simuliranog zrakoplova**

WPT	T[s]	N-S[°]	W-E[°]	H(m)	H(ft)	HDG[°]
1.	538.875	45.741653	16.067326	110.5	362.5	47.1
2.	630	45.786652	16.134087	1067.6	3502.7	46
3.	763.375	45.895538	16.050461	2776.2	9108.4	315
4.	847.125	45.974358	15.928525	3772	12375.3	314.6
5.	873.875	45.999435	15.879244	3975.7	13043.6	300.3
6.	888.875	46.011757	15.848166	4094.2	13432.4	299.2
7.	955.875	46.070206	15.696827	4590.5	15060.7	297.4
8.	1133.875	46.231049	15.280495	6994.6	22948.2	293
9.	1585.125	46.63726	14.203217	10179.5	33397.2	295.5
10.	1662	46.723476	14.026949	10576	34698	310.1
11.	2000.25	47.097748	13.242072	11589	38021.7	297.2
12.	2517.875	47.560875	11.822104	11582.4	38000	270.7
13.	4193.75	47.403095	6.6653	11587.8	38017.6	268.8
14.	4208.375	47.400417	6.620903	11547.6	37885.8	270.2
15.	4241	47.408524	6.52413	11388.7	37364.5	291.2
16.	4403.375	47.49128	6.060072	10662.7	34982.8	285.5
17.	4882.375	47.883217	4.869904	8516.1	27940.1	316.7
18.	5498.875	48.556782	3.70918	3457.2	11342.4	305.9
19.	5618.375	48.665321	3.521852	2725.3	8941.1	332
20.	6089	49.050266	2.966475	1517	4977	269.2
21.	6437.5	49.026276	2.553489	121.9	400.1	266

## 5.2. UNOS PODATAKA POTREBNIH ZA IZRAČUNAVANJE PERFORMANSE ZRAKOPLOVA I STANJE ATMOSFERE

Referentna masa zrakoplova bi trebala biti ne veća od 77 000kg i ne manja od 39000kg. U ovom modelu, s ciljem projekcije što realističnijih rezultati  $m_{ref} = 64\,000\text{kg}$ . Temperatura koja je snimljena od QAR-ana početku leta jednaka je 270.66K, a na aerodromu destinacije jednaka je 277.66K.

Podaci o smjeru i jačina vjetra snimljeni su svake 2 sekunde. Međutim zbog pojednostavljivanja unosa podatka o vjetru, uzeta je srednja vrijednost jačine i smjera vjetra u vremenskom razdoblju od 200s. Također jačina vjetra se mora rasporediti po geografskoj širini X i dužini Y, kako bi se odredilo kad je vjetar imao pozitivni učinak, a kad negativni. Pomoću jednadžbe za sinus i kosinus (79)(80):

$$\sin\alpha = x/W \quad (30)$$

$$\cos\alpha = y/W \quad (31)$$

, te množenjem svaka vrijednost sa (-1), jer zadane vrijednosti za smjera vjetra su za smjer prema kud vjetar puše.



**Tabela 3. Jačina i smjer vjetra**

T[s]	Jačina vjetra[kt]	Smjer vjetra[°]
0	22.64706	43.45
200	9.470588	39.54
400	22.48	83.67
600	36.37255	188.66
800	27.66667	205.75
1000	17.18	247
1200	15.86275	281
1400	15.84	291
1600	15.56	304
1800	15.94	320
2000	16.86	316
2200	18.3	322
2400	22	331
2600	24	332
2800	25	333
3000	29	330
3200	31	327
3400	31	338
3600	34	339
3800	39	344
4000	56	347
4200	62	352
4400	65	0
4600	62	3
4800	66	12
5000	45	20
5200	22	23
5400	19	13
5600	19	0
5800	18	0
6000	19	342

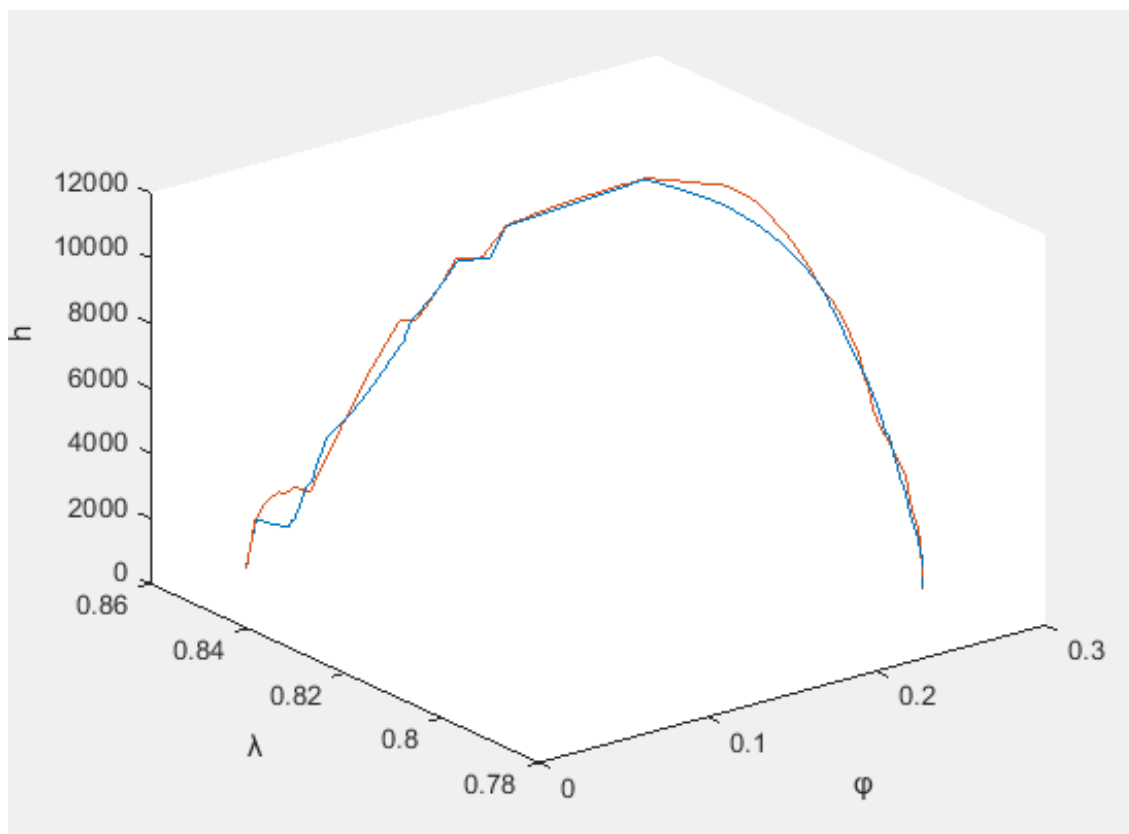
**Tabela 4. Jačina vjetra po X i Y osi**

T[s]	Komponenta vjetra po osi[kt]	
	X os	Y os
0	-7.71666666666667	-8.13851111111111
200	-2.91175555555556	-3.74001111111111
400	-11.3177777777778	-1.04946666666667
600	2.81401111111111	19.0344444444444
800	6.07044444444445	12.8611111111111
1000	8.02533333333333	3.39533333333333
1200	8.00990000000000	-1.47131111111111
1400	7.60348888888889	-2.91690000000000
1600	6.63633333333333	-4.47566666666667
1800	5.27305555555556	-6.17333333333333
2000	6.02414444444445	-6.23506666666667
2200	5.79778888888889	-7.20222222222222
2400	5.48912222222222	-9.89791111111111
2600	5.79778888888889	-10.8033333333333
2800	5.83894444444444	-11.4721111111111
3000	7.45944444444444	-12.5010000000000
3200	8.68382222222222	-13.3755555555556
3400	5.97270000000000	-14.4044444444444
3600	5.96755555555556	-16.4622222222222
3800	6.26593333333333	-19.2916666666667
4000	5.53027777777778	-27.7800000000000
4200	6.48200000000000	-31.3811111111111
4400	4.43965555555556	-33.4388888888889
4600	0	-33.4388888888889
4800	-7.05817777777778	-21.6066666666667
5000	-7.92244444444444	-10.4432222222222
5200	-4.42422222222222	-9.77444444444445
5400	-2.19667777777778	-9.77444444444445
5600	0	-9.26000000000000
5800	0	-9.26000000000000
6000	3.01978888888889	0

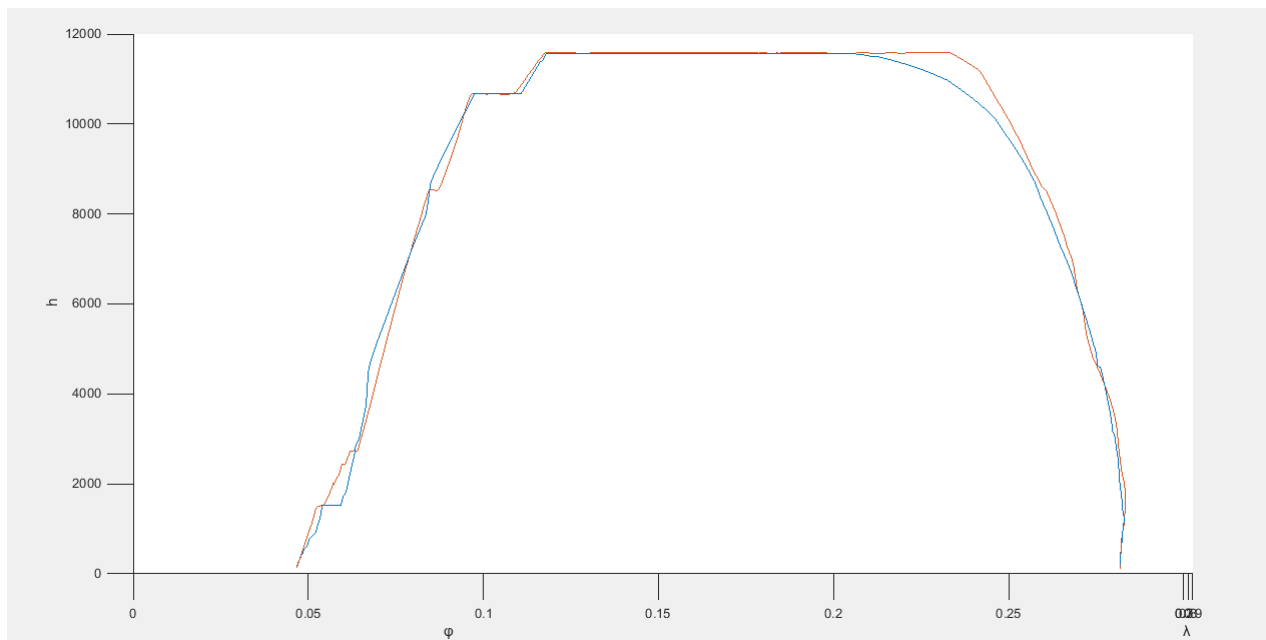
### 5.3. USPOREDBA PUTANJA

Prema slici br.2, u kojoj je predstavljena 3D putanja od oba dva zrakoplova i modela, primjećuje se razlika u putanjama u završnoj fazi penjanja, te u završnoj fazi spuštanja i u prilazu. U fazi krstarenja se ne primjećuje razlika u putanjama.

Brzine u svakoj fazi leta su veće od zadane vrijednosti. Modul smanjeni potisak tijekom penjanja je uveden kako bi se omogućilo penjanje sa snagom manjom od maksimalne. Tijekom svakog leta puno zrakoplova koriste postavke smanjenog potiska tijekom penjanja, da bi smanjili potrošnju, te povećali životni rok trajanja motora, tako da, korištenjem ovog modula dobili smo realističniju putanju u penjanju, iako se model zrakoplova, pri tim postavkama penjao s manjim gradijentom od stvarnog zrakoplova, te je ušao u fazu krstarenja znatno kasnije. Također nepoznati parametar referentne mase stvarnog zrakoplova, uzrokuje nepreciznost u svim fazama leta.



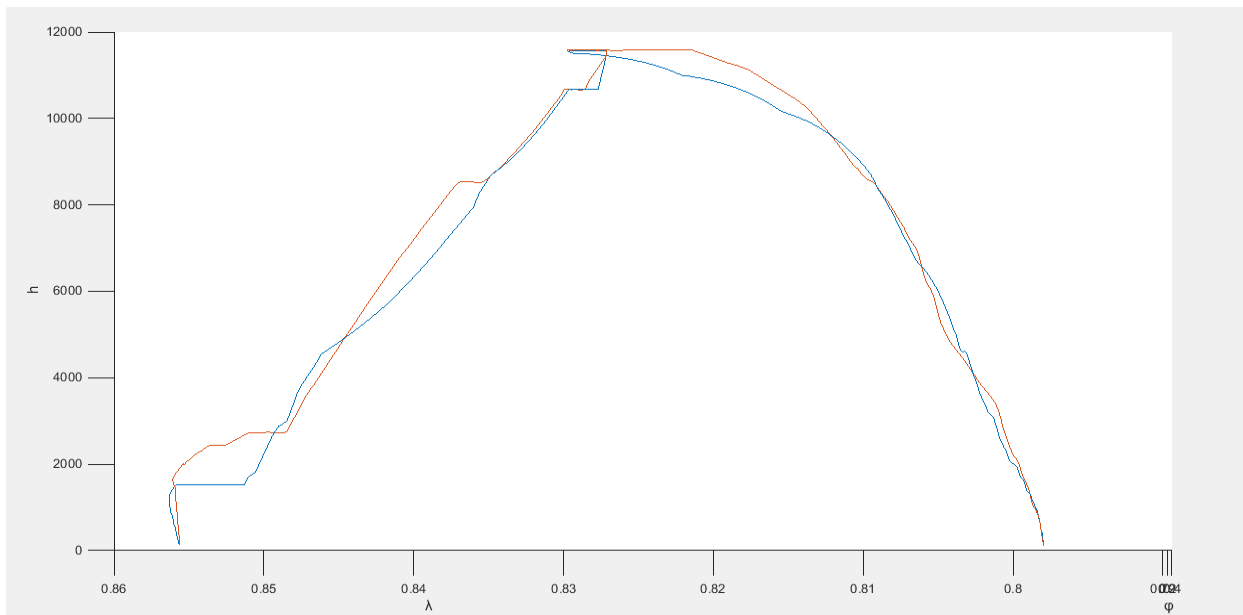
Slika 2. Putanja stvarnog zrakoplova(crvene boje) i simuliranog modela(plave boje)



Slika 3. Putanja modela i stvarnog zrakoplova, prikazano kao promjena geografske širine

Sa slike br. 3 možemo vidjeti da s ove perspektive putanja zrakoplova se u krstarenju i spuštanju preklapaju, međutim u penjanju pojavljuje se značajna razlika, zato što model kasnije ulazi u fazu krstarenja, zbog kašnjenja u dostizanju visine krstarenja.

U perspektivi danoj na slici br.4 putanja simuliranog modela i stvarnog zrakoplova najviše se razlikuje u finalnoj fazi spuštanja, što može biti zbog puno razloga, kao to da stvarni zrakoplovi u spuštanju koriste određeni potisak koji nije jednak nuli. Ovo se može primijetiti s podataka N2(broj okretaja turbine), snimljen sa strane QAR-a. Tijekom penjanja i krstarenja jednak je vrijednosti većoj od 80%, a tijekom spuštanja je približno 40%, dok u simuliranom modelu snaga u spuštanju je jednak nuli, te jedino podešavanje se može napraviti promjenom brzine u spuštanju, koja je značajno povećana, te uz povećanje koeficijent potiska u spuštanju na većim i manjim visinama  $C_{tdes,low}$  i  $C_{tdes,high}$ .



Slika 4. Putanja modela i stvarnog zrakoplova, prikazano kao promjena geografske dužine

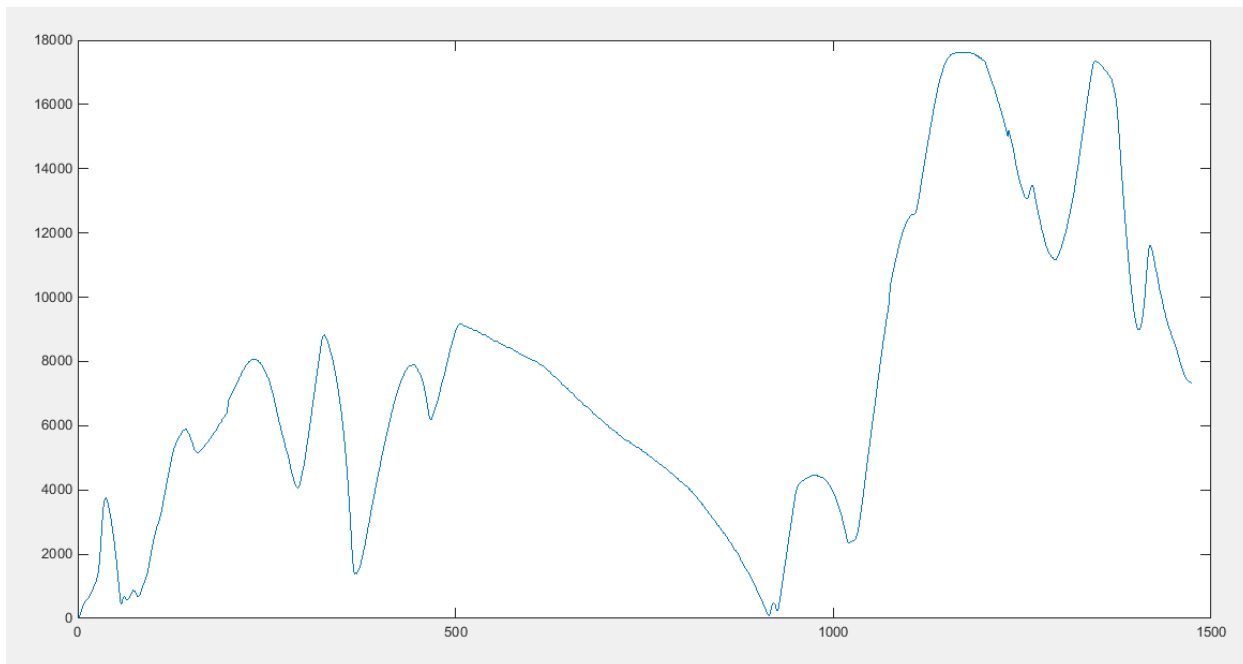
Na slici br.5 je prikazana udaljenost između simuliranog modela i stvarnog zrakoplova u metrima. Da bi došli do ovog rezultata korištena je formula za prebacivanje WGS84 koordinate u ECEF koordinatni sustav formulama (76,77,78). Te za dobivanje grafa na slici 5, korištena je formula (79) za izračun udaljenost u svakoj sekundi, te dobivene vrijednosti su onda prikazane korištenjem naredbe plot(dist).

$$X = (v + x(3)) * \cos((x(1)) * \cos(x(2))) \quad (32)$$

$$Y = (v + x(3)) * \cos((x(1)) * \sin(x(2))) \quad (33)$$

$$Z = ((1 - e^2) * v + x(3)) * \sin(x(1)) \quad (34)$$

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (35)$$



Slika 5. Udaljenost između simuliranog modela i stvarnog zrakoplova u metrima

Povećanje razlika u udaljenosti se može primijetiti u ranim fazama penjanja, te njeno povećanje traje sve do početka faze krstarenja. U ovoj fazi simuliranom modelu je povećana brzina, odnosno Machov broj, kako bi se nadomjestila razlika udaljenosti od stvarnog zrakoplova, koja je dobivena tijekom penjanja. U krstarenju u isti vremenski interval u jednom trenutku, putanje simuliranog zrakoplova i stvarnog zrakoplova preklapaju se.

Međutim zbog nemogućnosti podešavanja sila potiska u spuštanju, dolazi do sve veće pogreške, te do sve veće udaljenosti među putanjama, koje se polako počinju smanjivati prema kraju leta.

## 6. ZAKLJUČAK

U smislu optimizacije zračnog prostora, te predviđanja potencijalnih konflikata, stvaraju se sustavi za predviđanje putanja zrakoplova. Sama arhitektura tih sustava za predviđanje 4-D putanje, 4 dimenzionalna putanja za određeni let je prilično komplicirana, puna nesigurnosti koje proizlaze iz različitih modula, te ulaznih vrijednosti korištenih za ovaj proces. Određivanje sustava za upravljanje letom, atmosferski uvjeti, model točkaste mase, dinamika zrakoplova i ulazne vrijednosti kao potisak, kut poniranja/penjanja, je ključno za predviđanje putanja, međutim sama nepredvidljivost meteoroloških uvjeta, nepreciznost u izračunavanju performansama koristeći priručnik BADA-e, ima veliki negativan utjecaj na točnost predviđanja putanje.

Dobiveni rezultati su nedovoljno precizni. Za povećanje i poboljšanje istih potrebno je dodatno upravljanje s potiskom zrakoplova, te ekstremno podešavanje s brzinama koje su zadane u priručniku BADA-e. Također uvrštavanje određene jednadžbe za upravljanje s performansama u spuštanju i prilazu bi imalo pozitivan učinak.

## 7. POPIS KRATICA

Tabela 5

ATM	Air traffic management
RBT	Reference based trajectory
TBO	Trajectory based operations
4D	Four dimensional (X,Y,Z,time)
ACDA	Advanced continuous approach
CDA	continuous descent approach
SESAR	Single european sky ATM research
SESAR2020+	Single European Sky long term ATM research
CI	Cost index
FMS	Flight management system
I4D	Initial 4D
CTO	Controlled time over
CTA	Controlled time of arrival
ANSP	Air navigation service provider
IAF	Initial approach fix
APM	Aircraft performance model
ASCII	American Standard Code for the Interchange of Information
RTA	Required time of arrival
CPDLC	Controller – pilot data communications
SWIM	System Wide Information Management

## Popis tabela :

Tabela 1: Informacije o performansama [11] .....	14
Tabela 3. Plan leta simuliranog zrakoplova .....	27
Tabela 4. Jačina i smjer vjetra .....	2
Tabela 5. Jačina vjetra po X i Y osi.....	2
Tabela 6.....	39

## Popis slika:

Slika 1. Model točkaste mase [3] .....	10
Slika 2. Putanja stvarnog zrakoplova (crvene boje) i simuliranog modela (plave boje) .....	34
Slika 3. Putanja modela i stvarnog zrakoplova, prikazano kao promjena geografske širine .....	35
Slika 4. Putanja modela i stvarnog zrakoplova, prikazano kao promjena geo. duljine.....	36
Slika 5. Udaljenost između simuliranog modela i stvarnog zrakoplova u metrima.....	37



## 8. LITERATURA

1. Alonso, Lopey, Arnaldo – Software tool for simulation of aircraft trajectories. December 2012.
2. Blom, Bakker – In search of positive emergent behavior in Trajectory Based Operations, September 2014.
3. Energy Rate Prediction Using an Equivalent Thrust Setting Profile, R. Alligier, D. Gianazza, N. Durand, ENAC/MAIAA, IRIT/APO Toulouse, France, hal-00938734, version 1 - 24 April 2014.
4. D1 - Air Transport framework: The current Situation, SESAR consortium, Version3.0, July 2006.
5. D2 - The Performance Targets, SESAR consortium, December 2006.
6. D3 - The ATM Target Concept, SESAR consortium, September 2007.
7. Glover, Lygeros - A stochastic hybrid model for air traffic control simulation R1.10\_HSCCPaperv0.3., 2004.
8. ICAO ATMRPP, WP636, Canada, October 2014.
9. Ramasamy, Sabatini, Gardi - Novel Flight Management System For Improved Safety And Sustainability In The Cns+A Context, 2015.
10. SESAR 2020 Exploratory Research: First Call for Research Projects, March 2015.
11. User manual for The Base Of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9 EEC Technical/Scientific Report No. 11/03/08-08. April 2011.
12. [http://www.skybrary.aero/index.php/4D\\_Trajectory\\_Concept](http://www.skybrary.aero/index.php/4D_Trajectory_Concept) (rujan 2015.)
13. [http://www.skybrary.aero/index.php/Mean\\_Sea\\_Level](http://www.skybrary.aero/index.php/Mean_Sea_Level) (rujan 2015.)