

Utjecaj različitih metoda razdvajanja zrakoplova na efikasnost letenja

Jurkovac, Viktor

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:119:083467>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Viktor Jurkovic

UTJECAJ RAZLIČITIH METODA RAZDVAJANJA
ZRAKOPLOVA NA EFIKASNOST LETENJA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 23. rujna 2024.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Upravljanje protokom zračnog prometa**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7735

Pristupnik: **Viktor Jurkovac (0135247667)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Utjecaj različitih metoda razdvajanja zrakoplova na efikasnost letenja**

Opis zadatka:

Uvodno navesti cilj i strukturu rada. Proučiti literaturu te pokazatelje učinkovitosti letenja. Navesti i razraditi metode razdvajanja zrakoplova. Usporediti primjenu metode razdvajanja putem vektoriranja i promjene visine za određene prometne situacije. Usporediti primjenu metode razdvajanja putem vektoriranja i promjene brzine za određene prometne situacije. Usporediti primjenu metode razdvajanja putem promjene razine leta i promjene brzine za određene prometne situacije. Analizirati i obraditi rezultate istraživanja te pojedine prometne situacije. Dati zaključna razmatranja.

Zadatak uručen pristupniku: 21. svibnja 2024.

Rok za predaju rada: 23. rujna 2024.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Biljana Juričić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

**UTJECAJ RAZLIČITIH METODA RAZDVAJANJA
ZRAKOPLOVA NA EFIKASNOST LETENJA**

**THE IMPACT OF AIRCRAFT SEPARATION
METHODS ON FLIGHT EFFICIENCY**

Mentor: prof. dr. sc. Biljana Juričić

Student: Viktor Jurkovac, univ. bacc. ing. aeronaut

Zagreb, 2024.

KAZALO

1.	Uvod.....	1
2.	Oblasna kontrola zračnog prometa Zagreb	2
2.1.	Sustavi za nadzor zračnog prometa	2
2.2.	Prikaz podataka o zrakoplovu	3
3.	Alati ATM sustava za razdvajanje zrakoplova	5
3.1.	Short Term Conflict Alert (STCA)	5
3.2.	Tactical Controller Tool (TCT)	6
3.3.	QDM	7
3.4.	Velocity vector	8
3.5.	Alat SEP	9
4.	Metode razdvajanja zrakoplova	10
4.1.	Horizontalno razdvajanje zrakoplova	11
4.1.1.	Lateralno razdvajanje zrakoplova	13
4.1.2.	Longitudinalno razdvajanje zrakoplova.....	13
4.2.	Vertikalno razdvajanje zrakoplova	15
4.3.	Razdvajanje zrakoplova brzinom	16
5.	Pokazatelji učinkovitosti zračnog prometa.....	17
5.1.	Potrošnja goriva u horizontalnom letu	17
5.2.	Emisije ispušnih plinova	20
5.3.	Vrijeme leta	20
6.	Simulacija metoda razdvajanja zračnog prometa	21
6.1.	Simulacijski programi SimA i Thales TopSky BEST	21
6.2.	Izrada simuliranog zračnog prometa	21
6.3.	Testiranje vježbe i simulacija zračnog prometa	25
6.4.	Razdvajanje brzinama	26

6.5.	Razdvajanje vektorima	29
6.6.	Razdvajanje razinom leta	32
7.	Rezultati i analiza simulacija	35
7.1.	Rezultati razdvajanja metodom vektoriranja.....	35
7.2.	Rezultati razdvajanja brzinama	39
7.3.	Rezultati razdvajanja razinom leta	40
7.4.	Mišljenje pilota na zrakoplovu A320	42
7.5.	Analiza dobivenih rezultata	43
8.	Zaključak	48

SAŽETAK

Svake godine kontrola zračne plovidbe mjeri porast zračnog prometa. S time, sve je više regulacija prometa te raste i potreba za efikasnijom primjenom različitih metoda razdvajanja prometa, s naglaskom na održavanje iste razine sigurnosti. Takvih metoda ima tri te je ovaj rad napravljen sa svrhom pokazivanja optimalnog rješenja konflikta zrakoplova. Za potrebe izračuna mjerenih parametara korišteni su programi Thales Best te SimA. Simulacije su odrađene na simulatoru Hrvatske kontrole zračne plovidbe (HKZP) u Velikoj Gorici.

KLJUČNE RIJEČI: kontrolor leta, efikasnost leta, vektoriranje, separacija, potrošnja goriva, razina leta

SUMMARY

Every year air traffic control measures the increase in air traffic. With this, there is more regulation of traffic and the need for more efficient application of different methods of aircraft separation, with an emphasis on maintaining the same level of safety. There are three such methods, and this thesis was made with the purpose of showing the optimal solution for conflicting aircraft separation. Thales Best and SimA programs were used to calculate the measured parameters. The simulations were performed on the simulator of the Croatia Control in Velika Gorica.

KEY WORDS: air traffic controller, flight efficiency, vectoring, separation, fuel consumption, flight level

1. Uvod

Organizacija prometa jedan je od najvažnijih čimbenika kod osiguravanja sigurnosti zračnog prometa. Zbog sve većih zahtjeva korisnika, potrebno je odrediti optimalne načine vođenja prometa pokušavajući pri tome smanjiti negativne čimbenike kao što su duljina trajanja leta, potrošnja goriva, a time i emisije ispušnih plinova s obzirom na rastući trend zagađenja planete.

Uz zahtjeve korisnika, veliku ulogu u razdvajanju i planiranju prometa ima zračni prostor koji je predefiniран i određen svojim vertikalnim i horizontalnim granicama, ali i sami kontrolori zračnog prometa te njihove mogućnosti i reakcije. Prilikom razdvajanja prometa, svaki kontrolor subjektivno procjenjuje koja metoda mu najbolje odgovara prema trenutnoj prometnoj situaciji i budućim rutama. Prema tome, nema jedne metode koja je idealna ili uvijek najbolji izbor.

U ovom će se radu prikazati 3 glavne metode razdvajanja zrakoplova te će se uzimati u obzir teorija učena na školovanju kontrolora zračnog prometa u Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe. Te tri glavne metode se mogu koristiti i u kombinacijama, ali tih mogućnosti ima previše za potreban izračun pa te kombinacije neće biti uzimane u obzir. Simulacije će biti odrađene u Thales Best simulatoru u Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe.

Za proračun ovih metoda biti će odabrani jednostavni konflikti u kojima dva zrakoplova dolaze na istu točku u isto vrijeme na istoj visini, a mijenjati će se kut prilaza zrakoplova od razlike 10° do 90° između svakog para. Na kraju će se dobiti podaci o prijedenoj udaljenosti, vremenu leta te potrošnji goriva za svaki pojedini slučaj i za svaku pojedinu metodu razdvajanja pa će se uspoređivati koja metoda je najbolja za koji kut prilaza zrakoplova.

Radi pojednostavljenja samog izračuna, koristit će se jedan tip zrakoplova A320 te će svi zrakoplovi biti izrađeni s jednakim performansama, brzinom i visinom leta. Može se smatrati da bi i ostali slični tipovi komercijalnih zrakoplova imali slične rezultate simulacija.

Ovaj diplomski rad „Utjecaj različitih metoda razdvajanja zrakoplova na efikasnost letenja“ je rađen u svrhu unaprjeđenja rada u oblasnoj kontroli. Naime, autor rada je i sam oblasni kontrolor zračnog prometa te je upoznat s različitim zahtjevima prometa. Cilj rada je zaključiti koja metoda razdvajanja je optimalna u pojedinom tzv. školskom slučaju prometa.

2. Oblasna kontrola zračnog prometa Zagreb

Hrvatska kontrola zračne plovidbe je jedini pružatelj usluge oblasne kontrole zračnog prometa u Republici Hrvatskoj. Osnovna zadaća je pružanje usluga u zračnoj plovidbi uz visok stupanj sigurnosti zračnog prometa, a posluje sukladno propisima EU i RH, te standardima i praksom ICAO-a i EUROCONTROL-a. U skladu s Uredbom Komisije (EU) 2015/340, Hrvatska kontrola zračne plovidbe ima dozvolu za školovanje kontrolora zračnog prometa te sukladno međunarodnom standardu ISO 9001:2015, kao i prema Uredbi 1035/2011, certificirana je za pružanje usluga:

- operativnih usluga u zračnom prometu (ATS),
- komunikacije, navigacije i nadzora (CNS),
- zrakoplovnog informiranja (AIS),
- zrakoplovne meteorologije (MET),
- usluga oblikovanja letačkih postupaka (FPD),
- funkcije upravljanja zračnim prostorom (ASM),
- funkcije upravljanja protokom zračnog prometa (ATFM) [1].

Središnji dio uprave nalazi se u Velikog Gorici u blizini aerodromskog kontrolnog tornja na zračnoj luci Franjo Tuđman, dok su podružnice raspoređene u gradove Osijek, Pula, Rijeka, Lošinj, Zadar, Split/Brač i Dubrovnik.

2.1. Sustavi za nadzor zračnog prometa

Ovisno o načinu identifikacije, praćenja i postupaka razdvajanja zrakoplova, oblasna kontrola zračnog prometa može biti proceduralna ili radarska. Proceduralna kontrola je kontrola korištena obično u područjima s vrlo malo zrakoplova i karakteristika joj je u tome što kontrolor leta prati i razdvaja zrakoplove isključivo prema pilotovom izvještaju o poziciji i vremena preleta neke točke, dok radarska koristi radar kao način upravljanja zračnim prometom.

Oblasna kontrola zračnog prometa u Hrvatskoj je radarska. Sustavi za nadzor bitna su karika u pružanju sigurne, ekspeditivne i efikasne usluge upravljanja zračnim prometom. Nekooperativnu i neovisnu detekciju omogućuju primarni radarski sustavi koji prikazuju

poziciju zrakoplova u slučajevima kada nehotežno zbog kvara ili namjerno ne odgovore na upit naprednijeg zemaljskog sustava kao što je na primjer sekundarni radar. Kako bi zemaljski sustavi jednoznačno identificirali zrakoplov, potrebna je suradnja zrakoplovnih sustava sa zemaljskim. Taj cilj postignut je korištenjem sekundarnih radara i transpondera unutar zrakoplova. Današnji sekundarni mode S radarski sustavi, uz prikaz identifikacije i visine, omogućuju prikaz brojnih drugih podataka vezanih za pojedini zrakoplov te selektivnu komunikaciju.

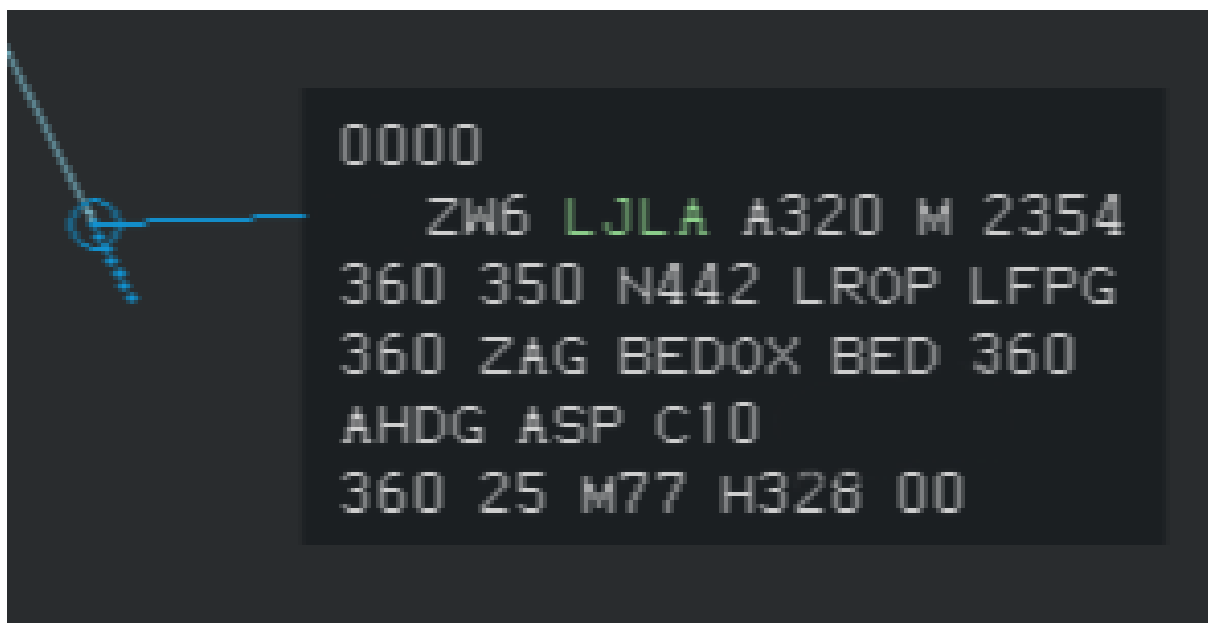
Hrvatska kontrola zračne plovidbe u svom sustavu nadzora posjeduje četiri suvremena mode S radarska sustava na Plesu, Monte Kope, Kozjaku i Psunju koji zajedno s podacima danim od vojnih radara na Sljemenu, Učki i Roti osiguravaju cjelokupno i pouzdano pokrivanje područja odgovornosti oblasne kontrole zračnog prometa Zagreb. Cjelokupno pokriće zračnog prostora omogućeno je dobrom raspodjelom dostupnih radara po geografskim pozicijama.

ADS-B (Automatic dependent surveillance – broadcast) je najnovija tehnologija upravljanja zračnim prometom u oblasnoj kontroli leta gdje zrakoplov sam šalje podatke i identifikaciju pomoću svojeg transpondera prema zemaljskim sekundarnim radarima. Ovaj sustav sadrži preciznije i redovitije podatke zrakoplova. [2]

Podaci dobiveni kombinacijom svih dostupnih sustava za nadzor zračnog prometa ažuriraju se prilikom svakog okreta radara.

2.2. Prikaz podataka o zrakoplovu

Svaki radarski odraz zrakoplova na zaslonu ima pripadajući *label* koji je zapravo plan leta koreliran na isti taj odraz. Na slici 1 ispod može se vidjeti primjer jednog takvog *labela* za kojeg je svaka oznaka pojašnjena u tablici 1.



Slika 1: Label zrakoplova na radarskom zaslonu

Tablica 1: Prikaz podataka u label-u zrakoplova na radarskom ekranu

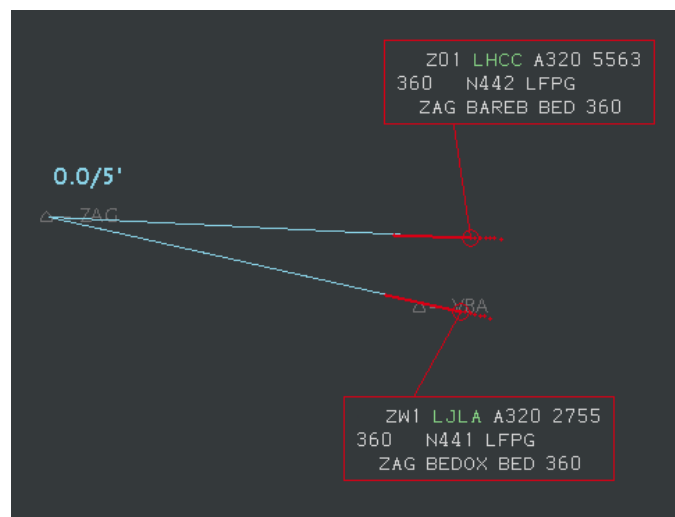
ASSR – DODIJELJENI SQUAWK	SEKTORSKI INDIKATOR	TIP ZRAKOPLOVA	WTC KATEGORIJA ZRAKOPLOVA	TSSR – TRANSMITIRANI SQUAWK
POZIVNI ZNAK	DODIJELJENA RAZINA LETA	BRZINA U ODNOSU NA ZEMlju	AERODROM POLIJETANJA	AERODROM SLIJETANJA
TRENTNA RAZINA LETA	SLJEDEĆA TOČKA	ULAZNA/IZLAZNA TOČKA	IZLAZNA TOČKA IZ ZAGREB FIR	TRAŽENA RAZINA LETA
IZLAZNA RAZINA LETA IZ SEKTORA	DODIJELJENA BRZINA	DODIJELJENA BRZINA PROMJENE VISINE		
DODIJELJENI SMJER LETA	INDICIRANA BRZINA U ČVOROVIMA	BRZINA PO MACHOVOM BROJU	SMJER LETA ZRAKOPLOVA	BRZINA PROMJENE RAZINE LETA ZRAKOPLOVA

3. Alati ATM sustava za razdvajanje zrakoplova

Zbog efikasnosti i sigurnog protoka velikog broja zrakoplova razvijeni su brojni alati i sustavi koji pomažu u sprječavanju potencijalnih opasnih incidenata i nesreća, a nazivamo ih mrežama sigurnosti. Mreže sigurnosti bilo za sprječavanje sudara zrakoplova u zraku ili zrakoplova s terenom i preprekama mogu biti zemaljske ili zrakoplovne. S obzirom na tematiku rada obrađen će biti dio zemaljskih mreža sigurnosti. Zemaljske mreže sigurnosti integrirani su dio osiguravanja sigurnosti ATM sustava. Koristeći primarno podatke ATS sustava za nadzor pružaju upozorenja do četiri minute unaprijed nepoželjne situacije i iziskuju neodložnu procjenu i reakciju kontrolora zračnog prometa na prometnu situaciju. Sustav oblasne kontrole zračnog prometa u Zagrebu sastoji se od brojnih alata i mreža sigurnosti koji se vrlo često unaprjeđuju te se dodaju novi, stoga će u ovom poglavlju biti obrađeni neki od najbitnijih.

3.1. Short Term Conflict Alert (STCA)

STCA je zemaljski sustav za prevenciju sudara zrakoplova u zraku. Upozorenje na ekranu kontrolora zračnog prometa pojavljuje se dvije minute prije potencijalnog ili stvarnog narušavanja minimalne separacijske norme (5NM i/ili 1000 ft) u vizualnom obliku, a upozorenje na ekranu oblasnog kontrolora u Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe prikazuje se u obliku crvenih uočljivih rubova prozorčića s podacima o pojedinom letu (*label*) (slika2).



Slika 2: Prikaz obavijesti STCA na radarskom ekranu

Do potencijalno opasnih situacija može doći tijekom kontrolorovog velikog radnog opterećenja ili krivih prioriteta uzrokovanih stresom. Veliku važnost učinkovitosti ovog

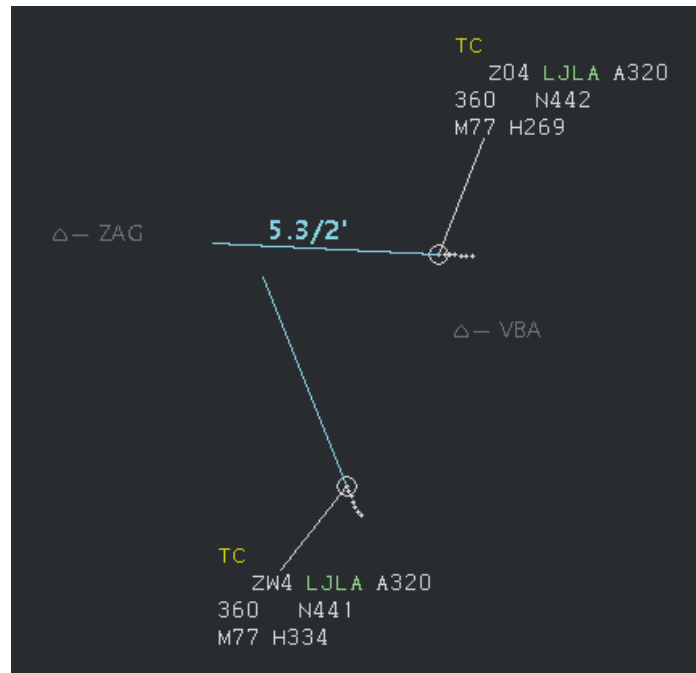
sustava pridonosi povjerenje kontrolora zračnog prometa u sam sustav koji se očituje u njegovoj pouzdanosti i točnosti, a potreban je trening i radno iskustvo kako bi se ono steklo. STCA je nepouzdan u slučajevima iznenadnih nepredvidljivih manevara zrakoplova.

Ukoliko kontrolor ne reagira na upozorenja, u zrakoplovima se aktivira sustav upozorenja TCAS koji sam razdvaja zrakoplove prema primljenim podacima o položaju okolnog prometa. Cilj svakog kontrolora je da do ovog upozorenja ni ne dođe, što znači da mora ranije reagirati, napraviti plan i odabrati primjerenu metodu razdvajanja.

Učinkovitost uzbunjivanja STCA uvelike ovisi o optimizaciji parametara za otkrivanje sukoba i vremenskim parametrima za lokalni zračni prostor, a najbolje je koristiti posebne parametre za svaki tip zrakoplova radi preciznije implementacije. Ponekad je potrebno isključiti STCA upozorenja za neki predodređeni zračni prostor zbog odvijanja raznih vježbi ili specifičnih letova kako bi se spriječila nepotrebna upozorenja dana od strane sustava. [2]

3.2. Tactical Controller Tool (TCT)

TCT je alat koji žutom oznakom TC u *labelu* upozorava kontrolora leta na to da će unutar 4 minute separacijske norme biti manje od 5.5NM i 790ft, a ako sustav predvidi više konfliktnih situacija s jednim zrakoplovom, pojavljuje se oznaka TC+ (slika 3). Za razliku od STCA koristi i rutne informacije, a ne samo prema trenutnoj putanji zrakoplova. Upravo zbog toga je vrlo koristan alat za predviđanje narušavanja separacije kod naglih zaokreta zrakoplova po ruti na koje je kontrolor leta možda zaboravio prilikom velikog radnog opterećenja. Nadalje, alat prepoznaje kada je zrakoplovu zadan smjer leta (npr. *present heading*) te ako u tom slučaju norme ne bi pale ispod vrijednosti navedenih iznad, upozorenje se ne će pojaviti. Klik na oznaku TC pali SEP za konfliktni par zrakoplova. Još jedna od prednosti ovog alata u odnosu na STCA je u tome što se upozorenje javlja i prilikom upisivanja dodijeljene razine leta prije nego zrakoplov krene u vertikalnu tranziciju.

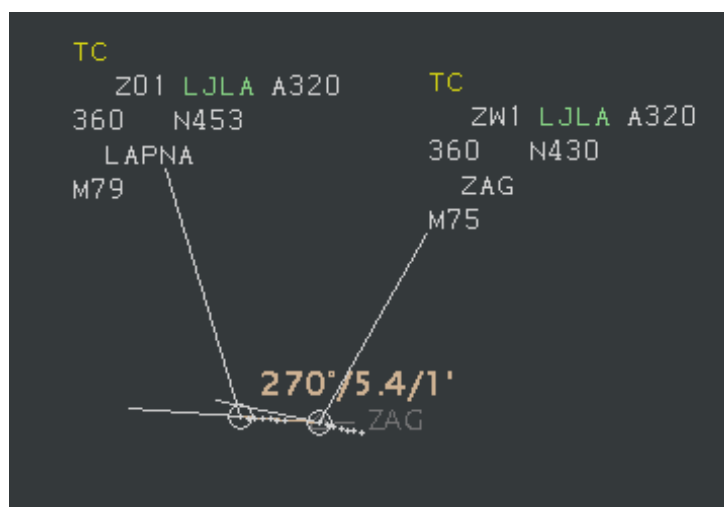


Slika 3: Prikaz upozorenja TCT na radarskom ekranu

3.3. QDM

QDM je jedan poprilično jednostavan ali efikasan alat za razdvajanje zrakoplova. Kontroloru zračnog prometa omogućava mjerenje bilo koje udaljenosti i magnetskog smjera na radarskom zaslonu. Ukoliko se spoji zrakoplov s točkom ili dva zrakoplova, alat će prikazati tri informacije:

- Magnetski smjer od prvog prema drugom zrakoplovu.
- Njihovu udaljenost u nautičkim miljama.
- Broj minuta koliko je potrebno prvom zrakoplovu da dođe do trenutne pozicije drugog zrakoplova.

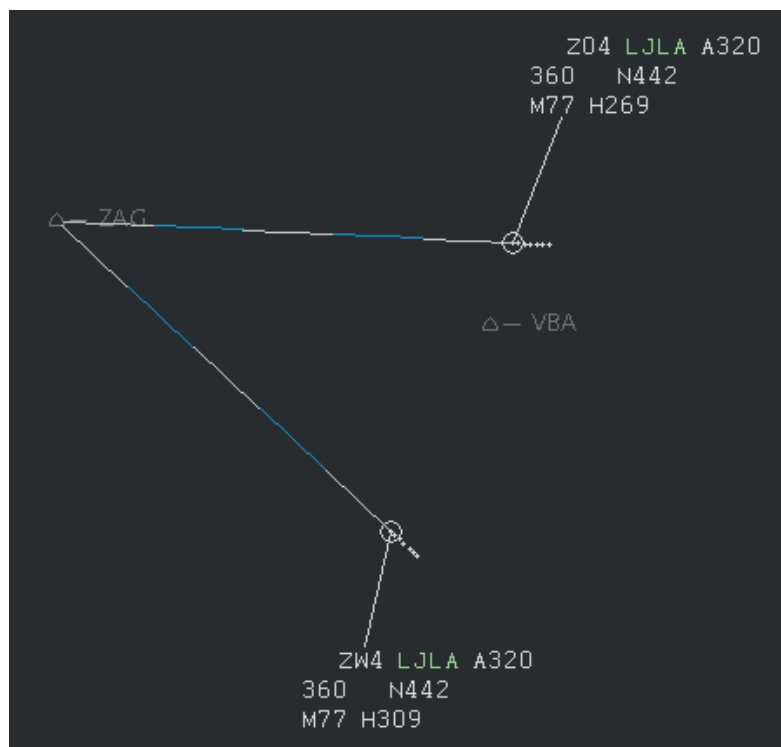


Slika 4: Prikaz alata QDM na radarskom ekranu

Spajanjem QDM linije zrakoplova ZW1 sa Z01 na slici 4 je vidljivo kako se Z01 u odnosu na ZW1 nalazi u magnetskom smjeru 270 stupnjeva, na udaljenosti od 5.4 nautičkih milja i da je ZW1 potrebno 1 minuta vremena da postojećom brzinom dođe do točke na kojoj se u tom trenutku nalazi Z01. QDM je kontroloru veoma koristan pri računanju udaljenosti, a time i potrebnih mjera radi održavanja separacijskih normi. [2]

3.4. Velocity vector

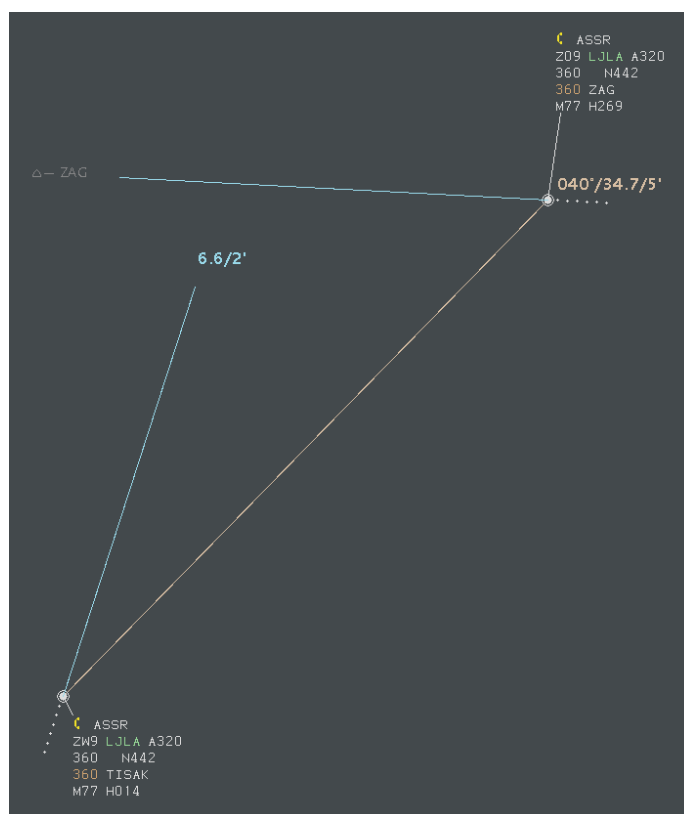
Velocity vector je alat koji koristi trenutne podatke o smjeru i brzini leta te grafički prikazuje na kojoj će se poziciji zrakoplov nalaziti za vrijeme selektirano od strane kontrolora zračnog prometa. Na slici 5 može se vidjeti izmjenjivanje plavih i bijelih oznaka kako bi se lako mogli razlikovati intervali od jedne minute. Kontrolor leta može odabrati da radarska pozicija zrakoplova ne prikazuje *velocity vector* do maksimalnih 10 minuta. Ovaj alat se najčešće koristi za računanje potrebnih brzina promjena razine leta za npr. zadovoljavanje dogovorenih visinskih uvjeta između dva različita sektora te za računanje potrebnog vremena za dva zrakoplova na različitim razinama leta da se raziđu (da se zadovolji horizontalna norma razdvajanja) kako bi jedan ili oba od njih mogli nastaviti sa promjenama prema svojoj traženoj razini leta. Drugi primjer bi se mogao odnositi na prometne situacije razrađene u ovome radu.



Slika 5: Prikaz alata velocity vector na radarskom ekranu

3.5. Alat SEP

SEP (Minimum Separation Display Tool) alat jedan je od najupotrebljavanijih alata za horizontalno razdvajanje zrakoplova koji aktivacijom prikazuje najbližu horizontalnu udaljenost između dvaju zrakoplova u nautičkim miljama te vrijeme u minutama za koliko će doći do te udaljenosti. Zbog svoje vrlo jednostavne primjene omogućava brzo i kontinuirano praćenje prometne situacije ili potencijalnog konflikta. SEP koristi podatke o brzinama i poziciji zrakoplova kako bi proračunavao predikciju putanje svakog zrakoplova. Alat se upotrebljava klikom na dva zrakoplova u interesu. Pritiskom na dva zrakoplova dobivaju se podaci prikazani na slici 6, a to su prvi broj koji prikazuje najbližu udaljenost u nautičkim miljama te vrijeme za koliko će ta udaljenost biti postignuta.



Slika 6: Prikaz alata SEP na radarskom ekranu

Konkretno u slučaju prikazanom na slici 6, kontrolor zračnog prometa može očitati kako će zrakoplovi Z09 i ZW9 biti najbliže udaljeni za 2 minute na udaljenosti od 6.6 nautičkih milja, što je dovoljna horizontalna separacija. Nedostatak SEP alata je u tome što koristi samo trenutne podatke o brzini i poziciji zrakoplova što pri neopreznoj upotrebi može dovesti do neželjenih situacija. Tako horizontalna separacija neće biti ista ako zrakoplov preleti neku točku i na njoj promjeni svoju putanju prema planu leta. [2]

4. Metode razdvajanja zrakoplova

Svaki zračni prostor je određen oznakom klase prema kojoj je definirano potrebno razdvajanje zračnog prometa od strane kontrole leta. U Hrvatskoj postoje tri klase zračnog prostora: G, D i C prikazane u tablici 2 ispod.

Tablica 2: Klase zračnog prostora i uvjeti klasa [3]

KLASA	PRUŽANA ATS USLUGA	TIP LETA	ATC ODOBRENJA	RAZDVAJANJA	INFORMACIJE O PROMETU
A	ATC	IFR	zahtijevaju svi zrakoplovi	svi letovi	nije primjenjivo
B	ATC	IFR, VFR, SVFR	zahtijevaju svi zrakoplovi	svi letovi	nije primjenjivo
C	ATC	IFR, VFR, SVFR	zahtijevaju svi zrakoplovi	IFR/SVFR od IFR/SVFR/VFR	za sve VFR letove
D	za IFR – ATC i informacije o VFR prometu za VFR – informacije o IFR i VFR prometu savjetovanja za obje vrste na zahtjev	IFR, VFR, SVFR	zahtijevaju svi zrakoplovi	IFR/SVFR od IFR/SVFR	za sve IFR i VFR letove
E	za IFR – ATC i informacije o VFR prometu za VFR – informacije o prometu	IFR, VFR, SVFR	nužno za IFR letove	IFR/SVFR od IFR/SVFR	za sve IFR i VFR letove gdje je moguće
F	za IFR – savjetodavne usluge i letne informacije za VFR – letne informacije (FIS)	IFR, VFR	nisu potrebna, samo savjeti	IFR/SVFR od IFR/SVFR savjet o razdvajanju ako je potrebno	pružano gdje je moguće ako je zatraženo
G	letne informacije (FIS)	IFR, VFR	nisu nužna, ne pruža	ne pruža	pružano gdje je moguće ako je zatraženo

S obzirom da cijela oblasna kontrola upravlja letovima u klasi prostora C, osim u slučaju da Osijek TMA ne radi kada taj zračni prostor poprima obilježja D klase ispod FL115, detaljnije će se razmotriti samo ona za potrebe ovog rada. Prema ICAO-u (eng. International Civil Aviation Organisation), kontrola leta je zadužena za održavanje separacije između:

1. IFR letova
2. IFR i VFR letova
3. IFR i specijalnih VFR letova
4. specijalnih VFR letova ako je tako propisao pružatelj usluga u zračnom prometu [3]

Metode razdvajanja zrakoplova ključne su za sigurno upravljanje zračnim prometom i sprječavanje sudara u zraku. Postoji nekoliko osnovnih metoda razdvajanja zrakoplova, a one uključuju:

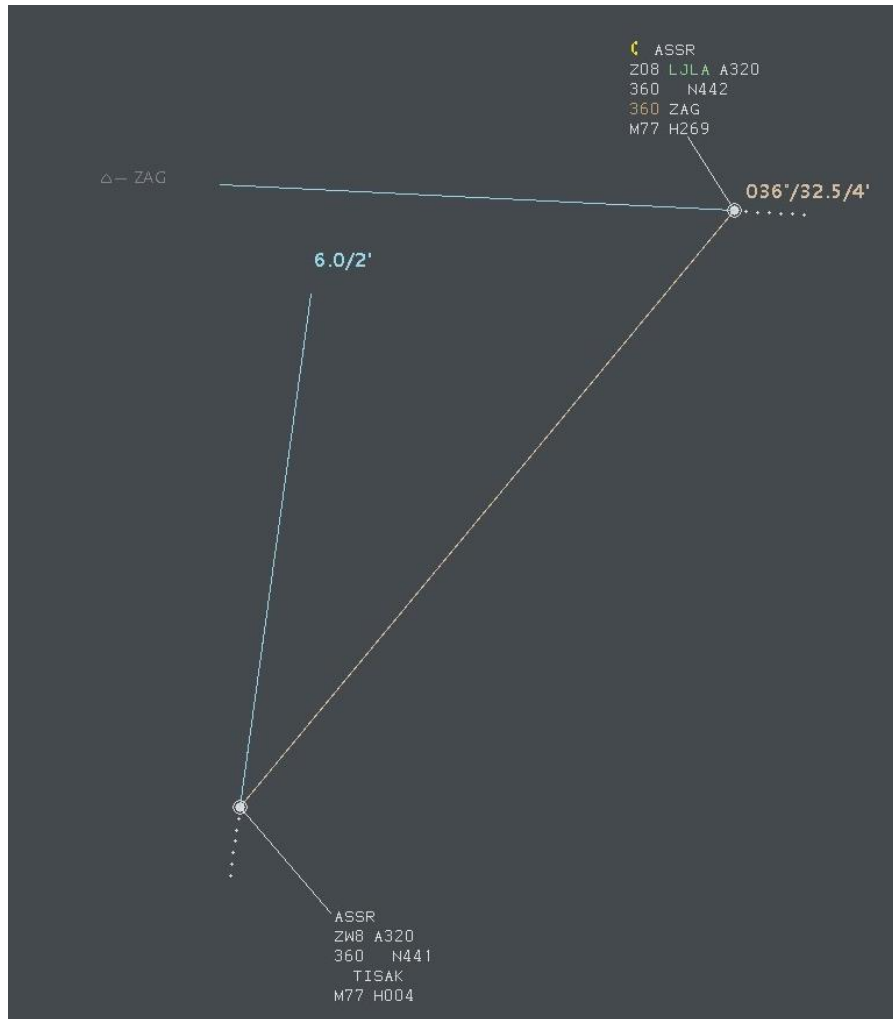
1. horizontalno razdvajanje
2. vertikalno razdvajanje
3. razdvajanje prema vremenu
4. razdvajanje prema brzini
5. razdvajanje brzinom promjene visine

Generalno pravilo razdvajanja u Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe je 5 NM horizontalne i 1000 ft vertikalne udaljenosti između zrakoplova. S obzirom da se u oblasnoj kontroli najčešće koriste 3 metode razdvajanja zrakoplova, te iste su niže detaljnije objašnjene.

4.1. Horizontalno razdvajanje zrakoplova

Horizontalno razdvajanje zrakoplova odnosi se na praksu održavanja sigurne udaljenosti između zrakoplova u horizontalnoj ravnini kako bi se spriječile kolizije, a kao što je ranije spomenuto, HKZP drži normu od 5 nautičkih milja horizontalne udaljenosti (slika 5). Jedan od najupotrebljavanijih alata za horizontalno razdvajanje zrakoplova je alat SEP (eng. Minimum Separation Display Tool) koji aktivacijom prikazuje najbližu horizontalnu udaljenost između dvaju zrakoplova u nautičkim miljama te vrijeme u minutama za koliko će doći do te

udaljenosti. Zbog svoje vrlo jednostavne primjene omogućava brzo i kontinuirano praćenje prometne situacije ili potencijalnog konflikta. SEP koristi podatke o brzinama i poziciji zrakoplova kako bi proračunavao predikciju putanje svakog zrakoplova. Na slici 7 može se vidjeti kako će minimalna udaljenost između zrakoplova biti za 2 minute, a iznositi će 6.0 NM.



Slika 7: Horizontalno razdvajanje zrakoplova pomoću alata SEP

Zbog kompleksnosti prostora, vremenskih neprilika, regulacija te konstantno rastućeg broja korisnika, zrakoplove više nije moguće razdvajati samo definiranim rutama. Zrakoplovne rute se presijecaju u mnogo točaka te su sve one potencijalno opasne za letove. Također, zrakoplovi koji su na istoj ruti ne moraju letjeti istim brzinama te se nerijetko događa da zrakoplov koji je iza prvog zrakoplova bude brži pa se time i smanjuje potrebna udaljenost između njih. Postoje dva tipa horizontalnog razdvajanja zrakoplova; lateralno i longitudinalno.

4.1.1. Lateralno razdvajanje zrakoplova

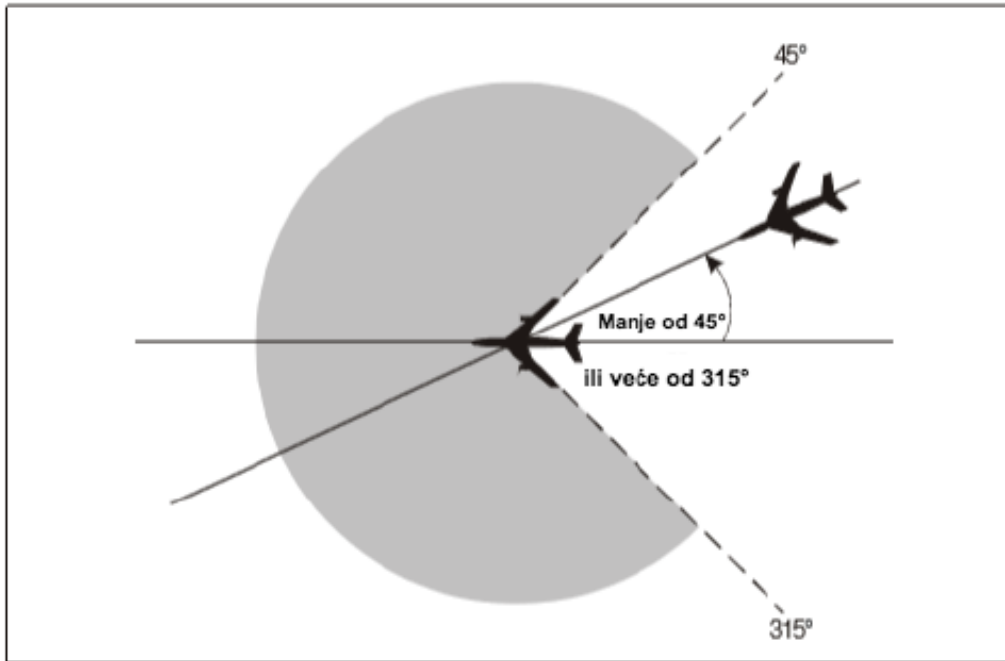
Lateralna se separacija postiže usmjeravanjem zrakoplova po različitim zračnim putanjama i geografskim pozicijama pomoću navigacijskih sredstava ili prostorne navigacije (RNAV) bez mogućnosti njihovog doticaja. Nakon procjene trenutne situacije, kontrolor zračnog prometa koristi metode zadavanja novih magnetskih smjerova (heading) ili odobrenja direktnog letenja prema nekoj točki (direct) s ciljem održavanja separacijskih normi.

Kontrolori leta koriste radar za praćenje položaja zrakoplova te izračun potencijalnih smjerova leta koji bi osigurali efikasan protok prometa. To se u praktičnom dijelu kontrole leta naziva razdvajanje vektorima ili, jednostavnije, vektoriranje. Vektor je pokazivač smjera leta zrakoplova. Za izračun potrebnog vektora koji bi osigurao siguran promet, koristi se alat zvan QDM. QDM je jedan poprilično jednostavan ali efikasan alat za razdvajanje zrakoplova koji kontroloru zračnog prometa omogućava mjerenje bilo koje udaljenosti i magnetskog smjera na radarskom zaslonu. Taj smjer se zove „heading“.

Kvalitetnim planiranjem unaprijed kontrolor je u mogućnosti iskoristiti strukturu zračnog prostora na način da zrakoplove usmjerava direktnim pravcima prema izlaznim točkama što u određenim trenucima može razriješiti konflikt, a u isto vrijeme koristiti zračnim prijevoznicima zbog skraćivanja ruta i troškova. Ukoliko dođe do smanjivanja preciznosti ispod zadanih razina ili otkaza navigacijske opreme, kontrolor zračnog prometa je dužan primijeniti alternativne separacijske metode i minimume prikladne toj situaciji.

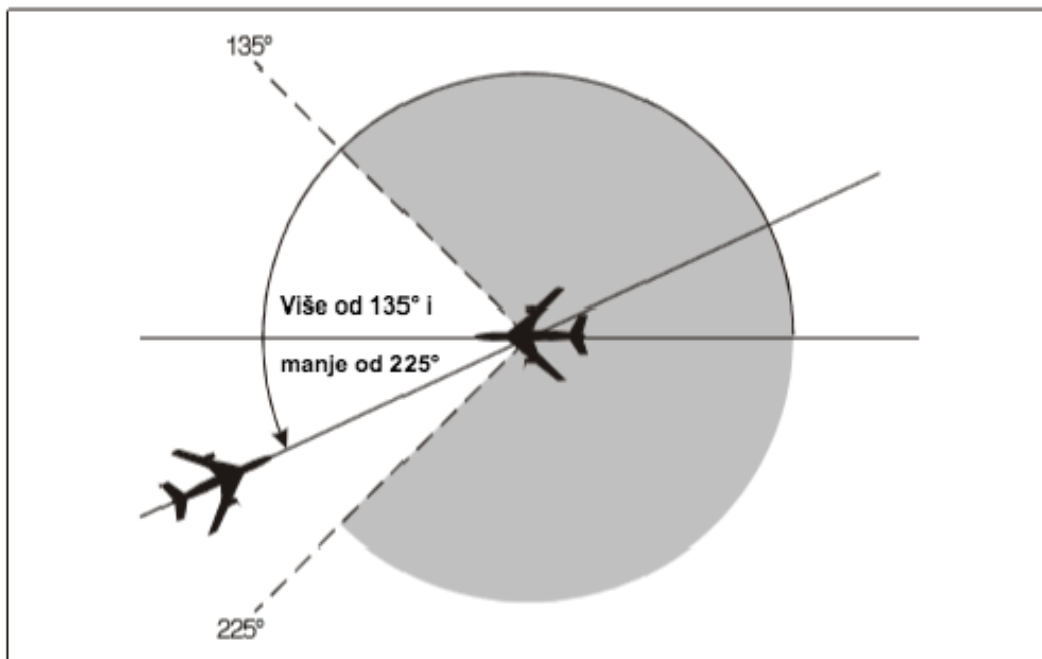
4.1.2. Longitudinalno razdvajanje zrakoplova

Longitudinalna se separacija primjenjuje u slučajevima kada se zrakoplovi nalaze na istoj, konvergirajućoj ili recipročnoj putanji. Iste putanje su putanje zrakoplova s jednakom ili presijecajućom putanjom s kutnom razlikom manjom od 45 stupnjeva ili većom od 315 stupnjeva (slika 8) [4].



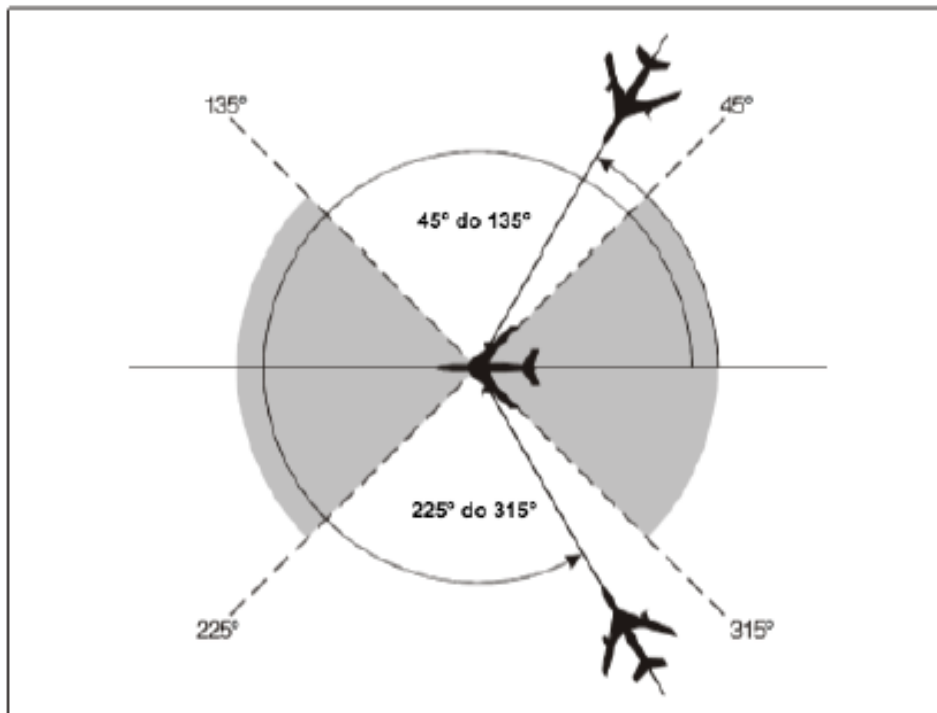
Slika 8: Prikaz istih putanja zrakoplova [4]

Recipročne putanje su suprotne ili presijecajuće putanje s kutnom razlikom većom od 135 stupnjeva ili manjom od 225 stupnjeva (slika 9).



Slika 9: Prikaz suprotnih putanja zrakoplova [4]

Konvergirajuće putanje su sve druge putanje koje nisu iste ili recipročne (slika 10).



Slika 10: Prikaz konvergirajućih putanja zrakoplova [4]

4.2. Vertikalno razdvajanje zrakoplova

Vertikalno razdvajanje zrakoplova odnosi se na održavanje sigurnih udaljenosti između zrakoplova u vertikalnoj ravnini. Ovo je ključno za sprečavanje sudara između zrakoplova koji lete na različitim visinama. Kao i horizontalno razdvajanje, vertikalno razdvajanje je presudno za sigurnost zračnog prometa. Visina zrakoplova u oblasnoj kontroli izražava se u stopama iznad srednje razine more (MSL, eng. mean sea level) prema standardnom tlaku od 1013 hPa.

U dijelovima zračnog prostora s malim brojem dostupnih visina, održavanje vertikalnog razdvajanja može biti izazovno. Zrakoplovi moraju biti razdvojeni minimalnom vertikalnom separacijom, koja iznosi 1000ft (300m) ispod razine leta FL290 i 2000ft (600m) na ili iznad te razine leta ukoliko se ne radi o RVSM (eng. Reduced Vertical Separation Minima) zračnom prostoru. To je zračni prostor u kojem je dozvoljen let samo onih zrakoplova koji imaju adekvatnu, napredniju i precizniju tehnologiju za izvršavanje leta. Unutar RVSM zračnog prostora minimalna vertikalna separacija iznosi 1000ft ispod razine leta FL410 ili drugačije propisane razine leta, te 2000ft na ili iznad te razine. [3]

Radi lakše organizacije prometa, u hrvatskoj kontroli zračne plovidbe, a i u europskim zemljama, vrijedi pravilo da zrakoplovi koji lete prema istoku, između smjera 000 i 179 stupnjeva, lete na neparnim, a oni koji lete prema zapadu, između smjera 180 i 359 stupnjeva, lete na parnim razinama leta (*flight level*) [5].

4.3. Razdvajanje zrakoplova brzinom

Razdvajanje zrakoplova prema brzinama odnosi se na upravljanje udaljenostima između zrakoplova temeljem njihovih brzina i putanja. Kontrolor zračnog prometa može pilotima dati instrukciju da lete točnom brzinom ili bilo kojom brzinom iznad ili ispod zadane brzine što im daje veću fleksibilnost pri planiranju ostatka leta te potrošnje goriva i vremena.

5. Pokazatelji učinkovitosti zračnog prometa

Pokazatelji zračnog prometa se odnose na statističke i operativne informacije koje prate stanje i trendove u zrakoplovnoj industriji. Prema ciljevima Upravitelja mreže (eng. Network Manager; NM) i SES (eng. Single European Sky) legislative te općenitim zahtjevima korisnika, cilj je optimizirati pokazatelje zračnog prometa. Europska Komisija ih je propisala za opći zračni promet članica Međunarodne organizacije za civilno zrakoplovstvo (International Civil Aviation Organisation-ICAO) za regiju Europe u svrhu pružanja usluga u zračnoj plovidbi koje vode do jeftinijih letova, manjih kašnjenja i uštede te smanjenje utjecaja zračnog prometa na okoliš. [6] Pokazatelji, između ostalog, uključuju broj incidenata i/ili konflikata, prijedenu udaljenost zrakoplova, vrijeme leta i kašnjenja, potrošnju goriva te emitiranje ispušnih plinova CO₂ i NO_x.

Za potrebe današnjih analiza u kontroli zračne plovidbe se koristi program NEST (eng. Network Strategic Tool). To je simulacijski program za dizajniranje i razvoj strukture zračnog prostora, planiranje kapaciteta i post-operacijske analize, organizaciju protoka zračnog prometa, pripremu scenarija za simulacije u stvarnom vremenu i studije na lokalnoj razini i razini mreže [7].

Program NEST ima unaprijed definirane formule te korisnik dobije samo tablicu s izračunatim vrijednostima. U ovom radu, pokazatelji zračnog prometa su ručno računati preko formula objašnjenih dalje u radu. Također, neće se razmatrati svi pokazatelji nego samo ovi niže navedeni.

Za potrebe ovog rada istraživat će se 3 indikatora za praćenje učinkovitosti leta – prijedena udaljenost leta, vrijeme potrebno za let te potrošnja goriva zrakoplova [8].

5.1. Potrošnja goriva u horizontalnom letu

Potrošnja goriva u zrakoplovstvu, kao i u svakom drugom obliku prometa, ovisi o nekoliko čimbenika, a uvelike utječe na operativne troškove i okoliš. U obzir se uzimaju tipovi zrakoplova, njihova težina, vrste motora, vremenski uvjeti, prijedene udaljenosti, visine i brzine leta, kao i same konfiguracije zrakoplova prilikom leta.

S obzirom da je rad temeljen na oblasnoj kontroli leta te na dio leta u krstarenju, računata je potrošnja goriva samo za taj segment leta prema sljedećim formulama iz BADA priručnika [9].

Potrošnja goriva izražena je u kilogramima kao umnožak nominalnog protoka goriva (f_{nom}) i vremena mjerenog segmenta leta. Nominalni protok goriva se računa po formuli:

$$f_{nom} = \eta \times T \text{ [kg/min]}$$

Gdje su:

- f_{nom} – nominalni protok goriva
- η – specifična potrošnja goriva $[\frac{kg}{min \times kN}]$
- T – potisak [kN]

Specifična potrošnja goriva je specificirana kao funkcija stvarne brzine izražene u čvorovima i ovisi o koeficijentima koji se nalaze u BADA dokumentu o performansama zrakoplova A320. Za mlazne zrakoplove specifična potrošnja goriva dana je formulom:

$$\eta = C_{f1} \times (1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}})$$

Gdje su:

- C_{f1} – koeficijent specifične potrošnje goriva = 0,94
- V_{TAS} – stvarna brzina zrakoplova [kt], 1 m/s = 1,94384 kt
- C_{f2} – koeficijent specifične potrošnje goriva = 100000

Drugi dio formule za nominalni protok goriva je potisak koji je u horizontalnom letu jednak vrijednosti otpora strujanja zraka ($T=D$). Za određivanje otpora potrebna nam je stvarna brzina izražena u metrima po sekundi, a određuje se prema formuli:

$$D = \frac{C_D \times \rho \times V_{TAS}^2 \times S}{2}$$

Gdje su:

- C_D – koeficijent otpora
- ρ – gustoća zraka [kg/m^3]
- S – površina krila= $122,6 \text{ m}^2$

Koeficijent otpora zraka govori o tome koliki će otpor imati tijelo u nekom fluidu, što je on manji to će ukupni otpor zrakoplova biti manji. Koeficijent ovisi o koeficijentu parazitnog otpora (CD_0), koeficijentu induciranog otpora (CD_2) i koeficijentu uzgona (CL) koristeći formulu:

$$C_D = CD_0 + C_{D2} \times C_L^2$$

Prema definiranim podacima o performansama za let iznad 8000m vrijednosti koeficijenta su:

- $C_{D0} = 0,024$
- $C_{D2} = 0,0375$

Za let od 8000m do 3000m ti koeficijenti iznose:

- $C_{D0} = 0,0456$
- $C_{D2} = 0,0381$

Jedini preostali koeficijent za izračunati je koeficijent uzgona koji se računa formulom:

$$C_L = \frac{2 \times m \times g_0}{\rho \times V_{TAS}^2 \times S \times \cos \phi}$$

Gdje su:

- m – masa zrakoplova= 64000 kg
- g_0 – gravitacijska akceleracija= $9,80665 \text{ m/s}^2$
- ϕ – kut nagiba zrakoplova, u horizontalnom letu je nula

Za otpor i koeficijent uzgona potrebno je izračunati gustoću atmosferskog zraka. Gustoća zraka može se uzeti iz tablice standardne atmosfere u kojoj se gustoća određuje formulom:

$$\rho = \rho_n \times (1 - 2,256 \times 10^{-5} \times H)^{4,256}$$

Gdje su:

- ρ_n – gustoća zraka na razini mora u standardnim atmosferskim uvjetima = 1,225 kg/m³
- H – visina leta zrakoplova [m]

Baza zrakoplovnih podataka (BADA) kreirana je u suradnji Eurocontrola, proizvođača zrakoplova i aviokompanija za pružanje teoretskih specifikacija 1409 modela zrakoplova i povezanih specifičnih podataka za precizno simuliranje ponašanja zrakoplova. [9] Uz potrebne formule iz BADA priručnika preuzeti su dokumenti koji sadrže podatke o performansama zrakoplova tipa A320 koji je bio u vježbama. [10]

5.2. Emisije ispušnih plinova

Ispušni plinovi u zrakoplovstvu nastaju izgaranjem goriva u motorima zrakoplova te se sastoje od različitih kemijskih spojeva koji negativno utječu na okoliš i ljudsko zdravlje te ih se stoga pokušava minimizirati.

Ispušni plinovi se u najvećoj mjeri sastoje od ugljičnog dioksida CO₂ te dušikovih oksida (NO_x). Oba plina doprinose globalnom zagrijavanju te stvaranju ozona u troposferi čime se stvara manji prostor te se plinovi zadržavaju bliže zemlji i time pridonose zagađenju zraka. To direktno utječe i na kvalitetu zemlje i vode.

Zbog utjecaja ispušnih plinova na klimatske promjene, industrija zračnog prometa radi na razvoju održivijih rješenja, uključujući održiva zrakoplovna goriva (SAF) i učinkovitijih motora. Također, radi se na optimizaciji ruta, smanjenju težina zrakoplova te optimalnom korištenju zračnog prostora.

5.3. Vrijeme leta

Vrijeme leta zrakoplova se računa od trenutka kada zrakoplov poleti sa zračne luke do trenutka slijetanja. Međutim, zrakoplov i u stanju mirovanja na stajanci, ukoliko mu rade motori, i u vožnji po voznim stazama zračne luke troši gorivo te time ispušta i štetne plinove. Iz ovih razloga, ali i zbog zadovoljstva korisnika komercijalnog zračnog prometa, cilj je smanjiti vrijeme koje zrakoplov provede s upaljenim motorima.

6. Simulacija metoda razdvajanja zračnog prometa

6.1. Simulacijski programi SimA i Thales TopSky BEST

Simulacijski program SimA su izradili eksperti Hrvatske kontrole zračne plovidbe te se koristi za izradu svih potrebnih vježbi na simulatoru za potrebe školovanja i održavanja dozvola kontrolora zračnog prometa. Program je napravljen tako da se može generirati vježba iz podataka o stvarnom proteklom prometu, iz programa NEST (eng. Network Strategic Tool), ili napraviti novi promet dizajniran točno za potrebe učenja ili simulacije određene situacije.

Program BEST je THALES-ov program, jedan od vodećih u svijetu za simulacije zračnog prometa. Dizajniran je od strane kontrolora zračne plovidbe te se uvelike koristi za simulacije zbog funkcionalnosti, realističnih scenarija te mogućnosti obuke kontrolora leta. [11]

6.2. Izrada simuliranog zračnog prometa

Za potrebe ovog rada napravljene su dvije verzije simulacijske vježbe koja su korištene za daljnja tri slučaja metoda razdvajanja: razdvajanje vektorima, razdvajanje brzinama, razdvajanje različitim razinama leta.

Simulirani parovi zrakoplova su, zbog jednostavnosti izrade rute, planirani da dolaze u isto vrijeme na navigacijsku točku ZAG koja predstavlja bilo koju drugu navigacijsku točku, a može se pretpostaviti i da ZAG predstavlja izlaznu točku iz trenutno operativnog sektora. Također, svaki par zrakoplova je postavljen da se pojavljuje na određenoj udaljenosti od navigacijske točke ZAG koja je određena minimalnom udaljenosti potrebnoj da parovi simuliranih zrakoplova zadavanjem brzina zadovolje horizontalne norme (metodi razdvajanja brzinama je potrebno najviše vremena). Tako je odlučeno kako bi se mogli realno usporediti pokazatelji učinkovitosti za sve 3 metode razdvajanja, što je detaljnije objašnjeno dalje u radu kod opisa samih simulacija.

Odabrani zrakoplovi su tipa A320 (Airbus 320). Ovaj tip zrakoplova je odabran zbog toga što je uz B737 (Boeing 737) najzastupljeniji tip zrakoplova trenutno na tržištu te oba tipa dijele podjednake performanse. Shodno tome, A320 je uz B737 najzastupljeniji tip zrakoplova u Hrvatskom zračnom prostoru, a time su rezultati ovoga rada vrlo često

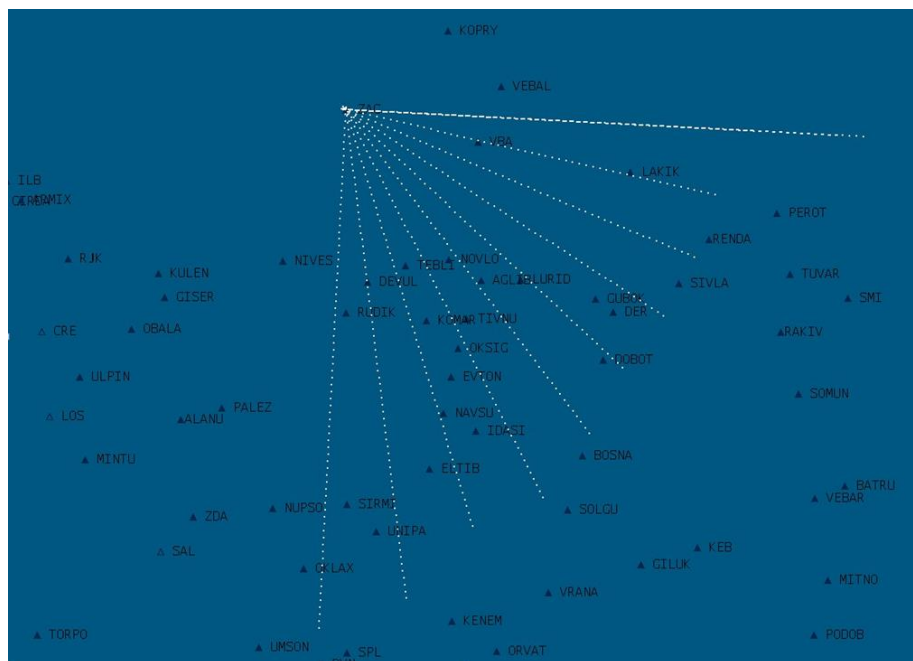
primjenjivi u praksi. Iako za A320 razina leta FL360 nije najviša visina koju taj zrakoplov može doseći, prema iskustvu, zaključeno je kako je upravo ta visina jedna od najzastupljenijih u ljetnim mjesecima rada kada su zrakoplovi puni putnicima i gorivom. Nadalje, odabrana je brzina krstarenja Ma 0.77 radi potreba provođenja simulacija u kojima će se ubrzavati zrakoplov za 0.02 Ma, a prema iskustvu autora u vrlo rijetkim slučajevima taj tip zrakoplova može ubrzati na veću brzinu od Ma 0.79.

Nadalje, prvo su zadani parovi zrakoplova ZRAKOPLOV1 i ZRAKOPLOW1 te tako do broja 9. Zbog nemogućnosti pozivnih znakova zrakoplova duljih od 7 znamenaka, pozivni znakovi su skraćeni na Z01 i ZW1, i tako do broja 9. Svi zrakoplovi izrađeni s brojem „0“ su postavljeni isto: da lete u smjeru navigacijske točke ZAG, smjer 270°, na razini leta FL360, brzinom Ma 0.77. Zrakoplovi izrađeni sa slovom „W“ su postavljeni performansama isto, ali je svaki pomaknut za 10° po QDM-u od navigacijske točke ZAG kako bi se dobio izračun po kutovima prilaženja od 10° do 90° razlike, po 10° razmaka (tablica 3 i slika 11).

Tablica 3: Prikaz početne postavbe parova zrakoplova u simulacijama

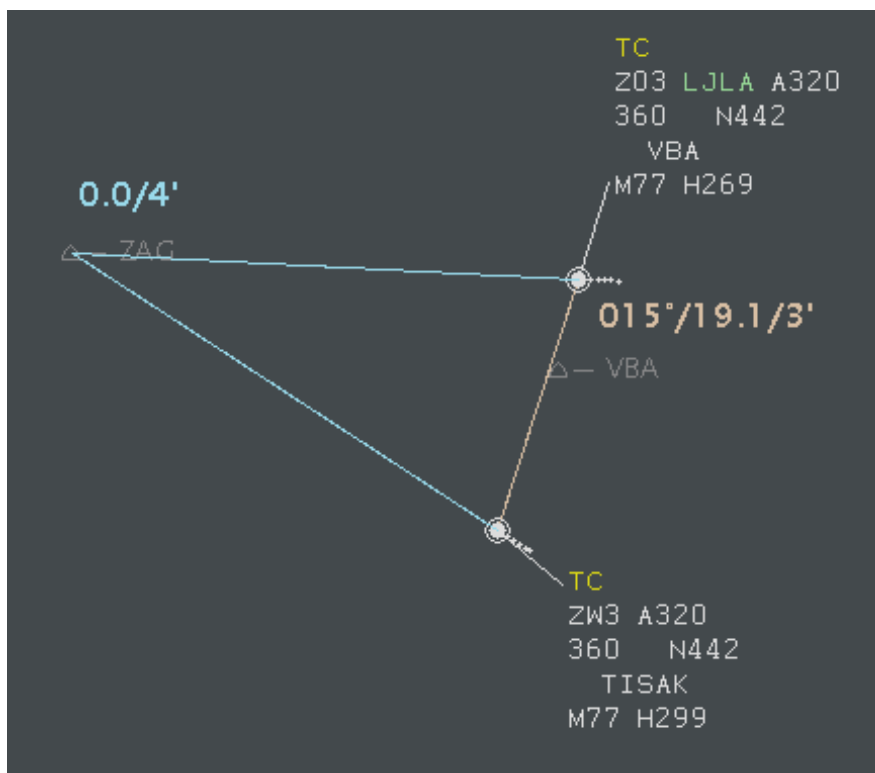
ZRAKOPLOV	SMJER KRETANJA ZRAKOPLOVA	RAZLIKA STUPNJEVA IZMEĐU ZRAKOPLOVA
Z01	270°	10°
ZW1	280°	
Z02	270°	20°
ZW2	290°	
Z03	270°	30°
ZW3	300°	
Z04	270°	40°
ZW4	310°	
Z05	270°	50°
ZW5	320°	
Z06	270°	60°
ZW6	330°	
Z07	270°	70°
ZW7	340°	

Z08	270°	80°
ZW8	350°	
Z09	270°	90°
ZW9	360°	



Slika 11: Prikaz početno postavjenih putanja zrakoplova

Svaki od parova zrakoplova je postavljen tako da na navigacijskoj točki ZAG imaju 0 NM razmaka (slika 12). U drugoj verziji simulacijske vježbe, za potrebe razdvajanja brzinama, zrakoplovi imaju već inicijalno postavljene potrebne brzine 0.75Ma ili 0.79Ma što će biti objašnjeno u poglavlju „Razdvajanje brzinama“.



Slika 12: Početno stanje prvog para zrakoplova (Z03 i ZW3)

Razmak između svakog para zrakoplova je 10 minuta. Aerodrom polijetanja i aerodrom slijetanja su dodani zbog funkcionalnosti vježbe, nebitni su za traženi izračun (slika 13).

Pending Aircraft			
Callsign	Activation	Departure	Destination ^
Z02	08:10:05	LROP	LFPG
ZW2	08:10:05	LROP	LFPG
Z03	08:20:05	LROP	LFPG
ZW3	08:20:05	LROP	LFPG
Z04	08:30:05	LROP	LFPG
ZW4	08:30:05	LROP	LFPG
ZW5	08:40:05	LROP	LFPG
Z05	08:40:05	LROP	LFPG
Z06	08:50:05	LROP	LFPG

Slika 13: Prikaz vremenskog odmaka parova zrakoplova

Iako simulacijski sustavi imaju mogućnost izrade utjecaja vjetra na promet, za potrebe ovog rada su stvoreni idealni uvjeti, bez vjetra te uz konstantan tlak i temperaturu.

6.3. Testiranje vježbe i simulacija zračnog prometa

Nakon izrade vježbe, ista je pokrenuta nekoliko desetaka puta kako bi se odredile potrebne instrukcije koje bi, i kada, kontrolor morao zadati kako bi razdvojio promet. Isprobani su različiti smjerovi leta kod vektoriranja te su izračunate i provjerene potrebne minute za postizanje horizontalne norme promjenama brzina. Cilj je bio zadovoljiti normu razdvajanja zrakoplova na navigacijskoj točki ZAG dobivanjem 5 ili više nautičkih milja između zrakoplova.

Norma razdvajanja je smatrana zadovoljenom ukoliko je SEP pokazao da će minimalna separacija biti 5 ili više nautičkih milja između zrakoplova. Kad je taj uvjet zadovoljen, zrakoplovi nastavljaju letjeti dok se SEP sam ugasi pokazujući time da su zrakoplovi prošli točku minimalne udaljenosti među sobom te se zrakoplov kojem su promijenjeni uvjeti leta se vraća na točku ZAG. Važno je napomenuti kako je taj zrakoplov moguće vraćati na ZAG i koju sekundu prije ukoliko je minimalna udaljenost bila veća od 5.0NM, ali u praksi pri minimalnim udaljenostima blizu horizontalne norme razdvajanja, kontrolor zračnog prometa čeka da se SEP ugasi.

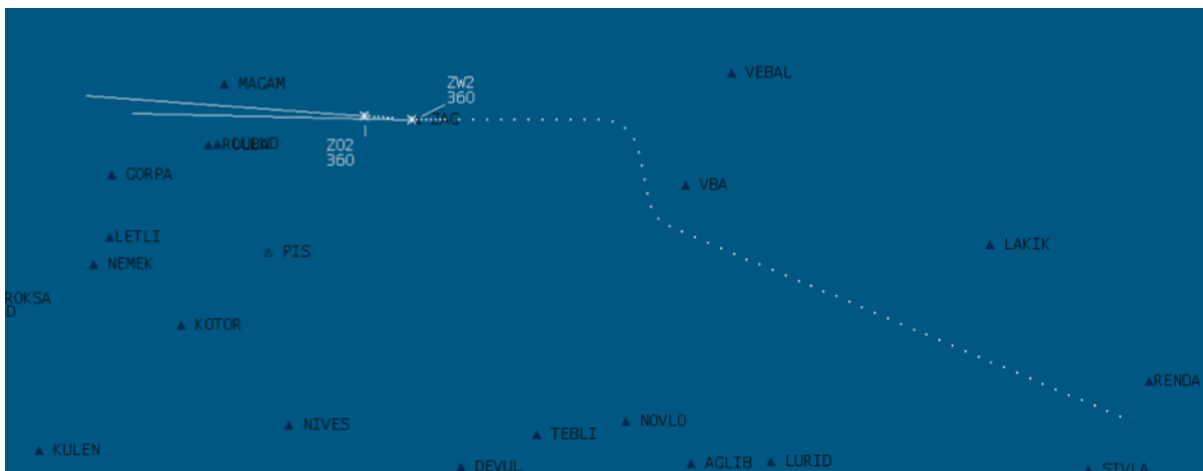
Nadalje, za svaku pojedinu metodu razdvajanja je jedna komponenta, vrijeme ili udaljenost reakcije, smjer kretanja ili brzina, točno definirana, a ostale su podložne promjenama. To je objašnjeno za svaku pojedinu metodu razdvajanja dalje u radu.

S obzirom da je cilj usporediti koja je metoda razdvajanja optimalna za pojedini slučaj, morao se odrediti početni položaj zrakoplova koji bi odgovarao svim simulacijama pa je stoga odlučeno da će se početna pozicija zrakoplova odrediti metodom razdvajanja s brzinama jer toj metodi treba najveća udaljenost za djelotvornost.

Kada su dobiveni potrebni podaci, vježba se ponovno pokretala s ciljem izračuna potrebnih parametara – prijedene udaljenosti zrakoplova i proteklog vremena leta. Na slici 14 je prikazan jedan od primjera metode razdvajanje vektorima gdje se može vidjeti povijest kretanja svakog od zrakoplova u konfliktu. Svaka točkica predstavlja prošle pozicije zrakoplova očitane na radarskom zaslonu pseudopilota. Za računanje putanje zrakoplova nije korišten radarski zaslon kontrolora leta zbog toga što ta opcija ne postoji na tom sustavu. Ti

podaci će se kasnije koristiti za proračun koja je metoda isplativija i efikasnija za smanjenje štetnih emisija, putnike i samu zrakoplovnu kompaniju, tj. zrakoplov.

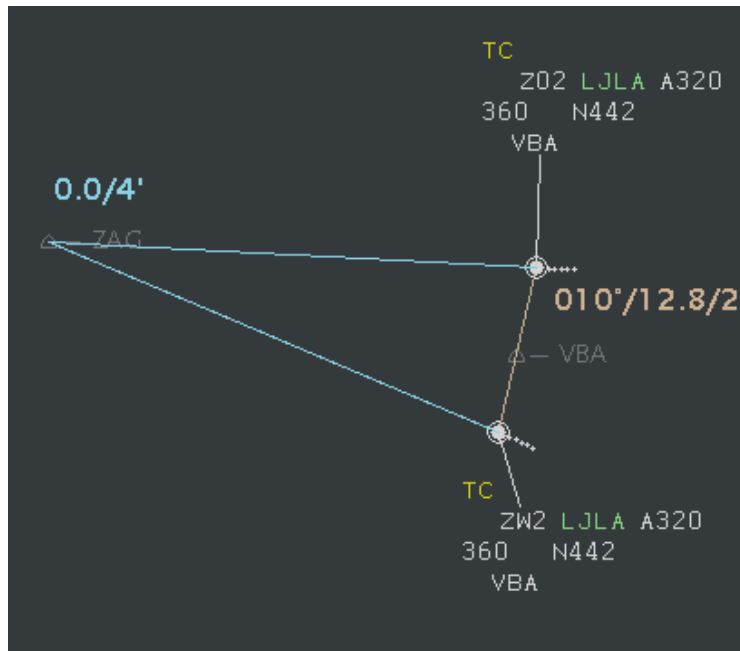
Simulacijski program BEST ima mogućnost zaustavljanja vježbe i programiranja određenih instrukcija sa 100%-tnom točnošću te se time postiglo da svaki zrakoplov „ZWx“ u točno određenom trenutku izvrši određenu zadanu instrukciju kako bi se izbjeglo moguće variranje podataka s obzirom na različita vremena reakcija različitih kontrolora leta i različitih pilota.



Slika 14: Izgled prikaza prijedene putanje zrakoplova u programu Best

6.4. Razdvajanje brzinama

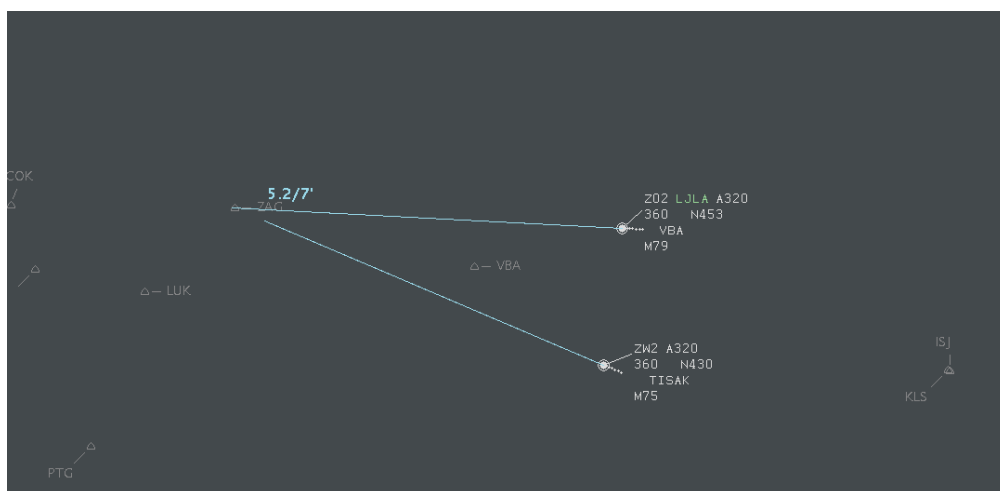
Kod simulacije razdvajanja brzinama, korištena je tzv. simulatorska školska instrukcija razdvajanja ubrzavanjem i usporavanjem zrakoplova za $Ma 0.02$ (slika 15). Temeljeno na osobnom iskustvu sa stvarnim prometom, zaključeno je kako zrakoplovi u velikom broju slučajeva negoduju na instrukcije za promjenu brzine leta veće od $Ma 0.02$. U svakodnevnome radu se veće razlike u brzinama razmatraju jedino ako kontrolor zračnog prometa sam procijeni da je to jedini ili optimalan način za razdvajanje konfliktne situacije. Temeljeno na prethodnim zaključcima, studente kontrolore zračnog prometa se tako uči na simulatoru te je upravo i to jedna od motivacija za pisanje ovog rada.



Slika 15: Početno stanje zrakoplova kod metode razdvajanja brzinama

S obzirom da je vrijeme potrebno za vidljivu promjenu u udaljenosti zrakoplova na krajnjoj točki veće u ovom slučaju nego kod razdvajanja vektorima, u ovoj metodi razdvajanja, zrakoplovi ranije dobivaju instrukcije za promjene brzine te su prema ovoj metodi napravljeni svi parovi zrakoplova za obje verzije vježbe.

Prvi u paru „Z0x“ je ubrzan za 0.02 Ma, dok je drugi „ZWx“ usporen za 0.02 Ma (slika 16) od prethodno postavljene brzine Ma 0.77 koja je određena na način objašnjen prethodno u radu. Tako je rađeno sa svakim parom, ali je mijenjano vrijeme davanja instrukcije različitim parovima, tj. instrukcije su dane na različitim udaljenostima od točke. Svakom zrakoplovu u paru je instrukcija dana u isto vrijeme.



Slika 16: Postavljanje minimalne sigurne udaljenosti za par zrakoplova metodom razdvajanja brzinama

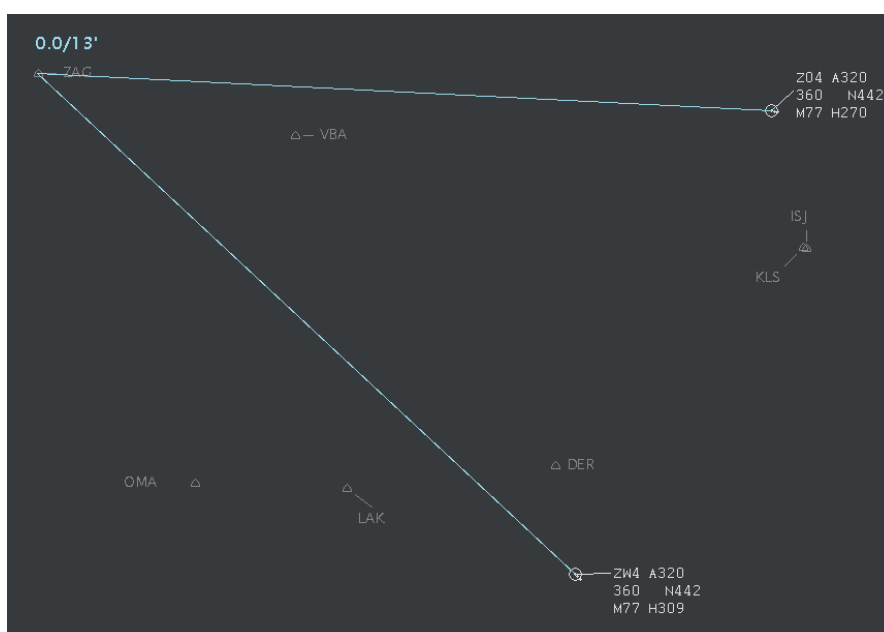
U tablici 4 je prikazana početna udaljenost zrakoplova od navigacijske točke ZAG te koliko su bili udaljeni nakon promjena brzina prema SEP-u. Početne udaljenosti su dobivene metodom pokušaj-pogreška gdje je, pomoću alata SEP, određeno kada je krajnje vrijeme davanja instrukcije da bi se na točki ZAG dobila potrebna udaljenost zrakoplova. Ove vrijednosti vrijede za sve dalje prikazane simulacije.

Tablica 4: Prikaz vrijednosti kod metode razdvajanja brzinama

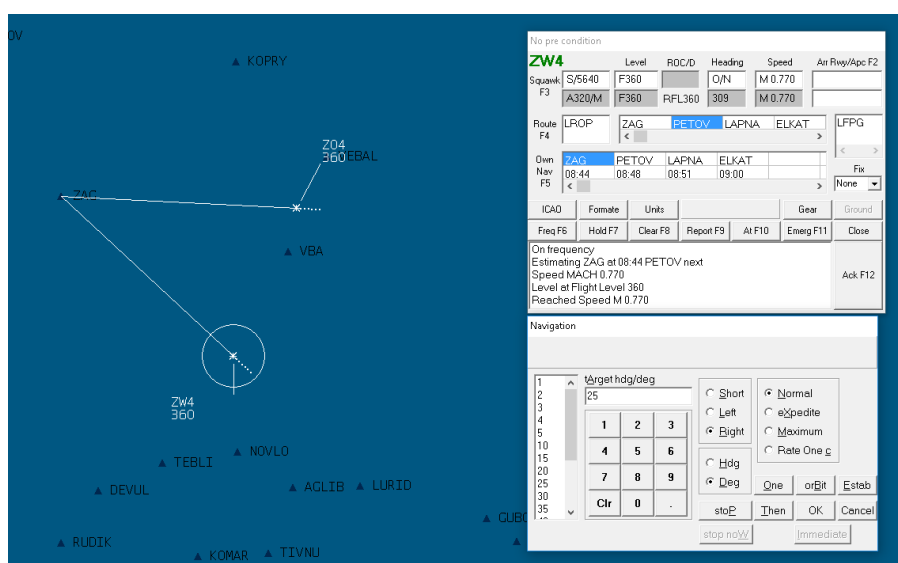
ZRAKOPLOV	PROMJENA BRZINE	DOBIVENA BRZINA	UDALJENOST OD TOČKE KAD JE DANA INSTRUKCIJA	UDALJENOST PARA ZRAKOPLOVA NA TOČKI ZAG NAKON PROMJENE BRZINE PREMA SEP-U
Z01	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	14 min / 102 NM	5.0 NM
ZW1	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z02	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	14 min / 102 NM	5.2 NM
ZW2	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z03	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	14 min / 102 NM	5.1 NM
ZW3	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z04	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	14 min / 102 NM	5.4 NM
ZW4	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z05	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	15 min / 109 NM	5.7 NM
ZW5	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z06	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	16 min / 117 NM	5.4 NM
ZW6	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z07	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	16 min / 117 NM	5.5 NM
ZW7	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z08	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	18 min / 132 NM	5.2 NM
ZW8	- 0.02 Ma	0.75 Ma		
Z09	+ 0.02 Ma	0.79 Ma	19 min / 139 NM	5.0 NM
ZW9	- 0.02 Ma	0.75 Ma		

6.5. Razdvajanje vektorima

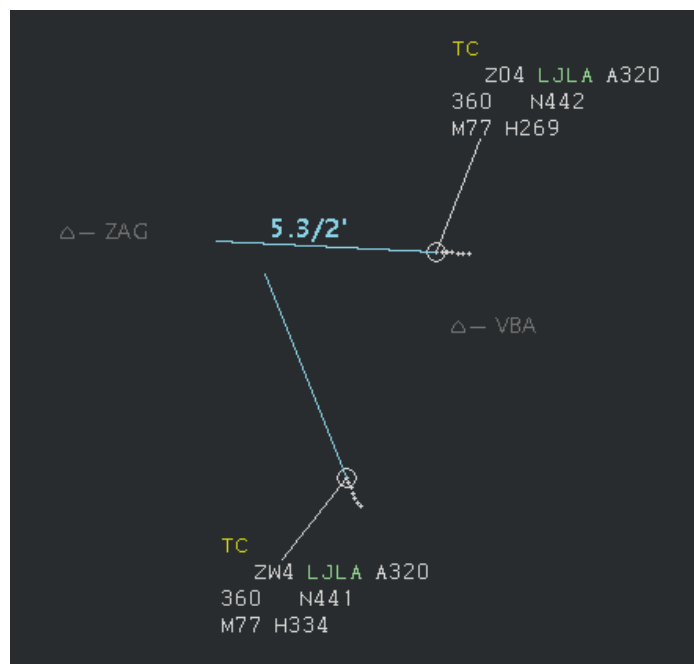
Za potrebe simulacije ove metode razdvajanja (slika 17), reakcija kontrolora je postavljena na 5 minuta (slika 18). To je ranije spomenuta određena komponenta temeljena na minimalnoj vremenskoj udaljenosti konfliktnih zrakoplova do koje student kontrolor zračnog prometa mora izdati instrukciju zrakoplovima koji nemaju zadovoljenu niti jednu normu razdvajanja. Programirano je da zrakoplovi „ZWx“ 5 minuta prije navigacijske točke ZAG skrenu u određeni smjer. Kada se norma razdvajanja zadovoljila (slika 19), tj. kad se alat SEP sam ugasio (slika 20) zrakoplov je vraćen na točku ZAG te je preko nje napustio određeni zamišljeni zračni prostor (slika 21).



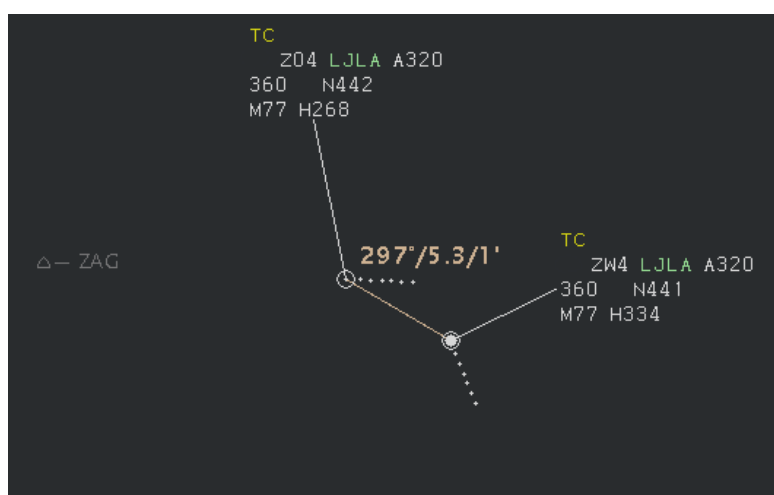
Slika 17: Početni položaj para zrakoplova



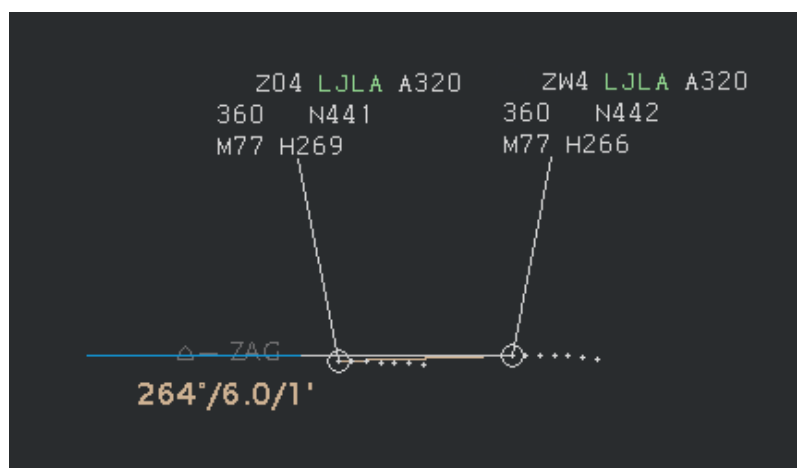
Slika 18: Trenutak davanja novog smjera leta 5 minuta prije susreta zrakoplova



Slika 19: Prikaz zadovoljene norme razdvajanja



Slika 20: Trenutak nakon gašenja alata SEP te vraćanja zrakoplova na točku ZAG



Slika 21: Povratak drugog zrakoplova u paru na početnu rutu prema točki ZAG s potrebnom udaljenosti od prvog zrakoplova

U tablici 5 su prikazani stupnjevi smjera kretanja zrakoplova te za koliko je svaki otklonjen kako bi se zadovoljila norma razdvajanja na točki. U zadnjem stupcu su prikazane udaljenosti koje su smatrane zadovoljenom normom razdvajanja, a koje su dobivene nakon otklona drugog u paru zrakoplova.

Tablica 5: Prikaz vrijednosti kod metode razdvajanja vektorima

ZRAKOPLOV	SMJER KRETANJA ZRAKOPLOVA	RAZLIKA STUPNJEVA IZMEĐU ZRAKOPLOVA	OTKLON I SMJER KRETANJA ZRAKOPLOVA NAKON OTKLONA	UDALJENOST PARA ZRAKOPLOVA NAKON OTKLONA
Z01	270°	10°	0° - 270°	x
ZW1	280°		x	
Z02	270°	20°	0° - 270°	5.1 NM
ZW2	290°		55° - 345°	
Z03	270°	30°	0° - 270°	5.5 NM
ZW3	300°		35° - 335°	
Z04	270°	40°	0° - 270°	5.2 NM
ZW4	310°		25° - 335°	
Z05	270°	50°	0° - 270°	5.1 NM
ZW5	320°		20° - 340°	
Z06	270°	60°	0° - 270°	6.2 NM
ZW6	330°		20° - 350°	
Z07	270°	70°	0° - 270°	5.2 NM
ZW7	340°		15° - 355°	
Z08	270°	80°	0° - 270°	5.8 NM
ZW8	350°		15° - 005°	
Z09	270°	90°	0° - 270°	6.6 NM
ZW9	360°		15° - 015°	

6.6. Razdvajanje razinom leta

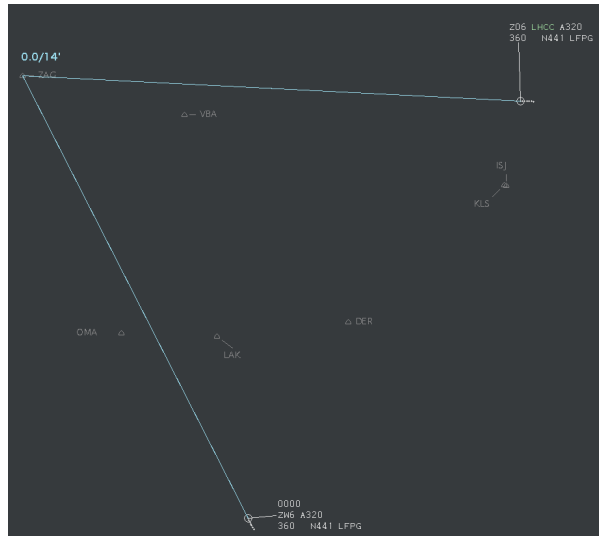
Kod razdvajanja visinom leta, mjereno je samo vrijeme koje zrakoplov provede mijenjajući razinu leta, odnosno u snižavanju. Također, obraćena je pozornost na to hoće li niži zrakoplov kasniti ili stići ranije do točke od zrakoplova koji ostaje na razini leta FL360 te kolika je prosječna potrošnja na pojedinoj razini leta.

Odabrano je snižavanje drugog u paru zrakoplova s obzirom da je sigurno da zrakoplov može na nižu razinu leta, dok je upitno može li u svim uvjetima popeti na višu razinu leta. Također, penjanje zrakoplova često zahtjeva dodatnu komunikaciju koja se pokušava izbjeći ako je moguće u trenucima vršnog opterećenja. Uslijed toga su zrakoplovi „ZWx“ snižavani na razinu leta FL350. U slučaju da zrakoplov spušten na nižu razinu leta ne planiramo vraćati na početnu visinu nakon prolaska konfliktnog zrakoplova (možda uslijed još niže izlazne razine leta ili zahtjeva sljedećeg sektora), zrakoplov bismo snižavali na razinu leta FL340 zbog poštivanja praktičnog rada na stvarnom prometu gdje se zrakoplovi koji lete u jednom smjeru, u ovom slučaju na zapad ili od 180° do 359° kompasne ruže, nalaze na parnim razinama leta.

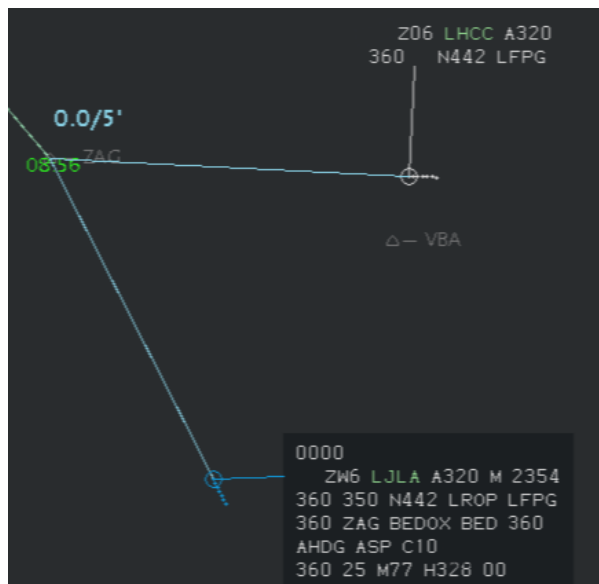
Za potrebe rada je također uračunata tzv. školska standardna brzina snižavanja zrakoplova od 1000 ft/min te je proračunato da zrakoplovu tom brzinom snižavanja treba jedna minuta da dostigne visinu od dvije razine leta niže.

$$t = \frac{\text{razlika razine leta [ft]}}{\text{brzina spuštavanja}} = \frac{1000 \text{ ft}}{1000 \text{ ft/min}} = 1 \text{ min}$$

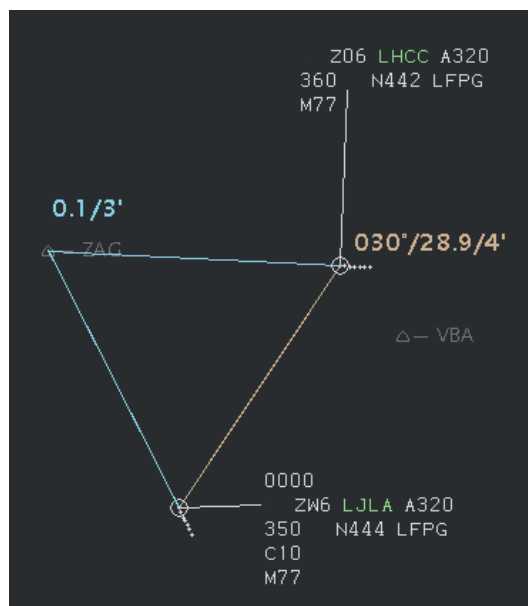
S obzirom da je ranije, od metode razdvajanja vektorima, definirano da je krajnje vrijeme izdavanja instrukcije 5 minuta prije susreta, i kod ove metode je praćen isti model. Do tog trenutka, oba zrakoplova lete na FL360, brzinom 0.77 Ma kao i u početnom slučaju. Cijela simulacija ove metode prikazana je na slikama 22, 23, 24, 25 i 26 dalje u radu.



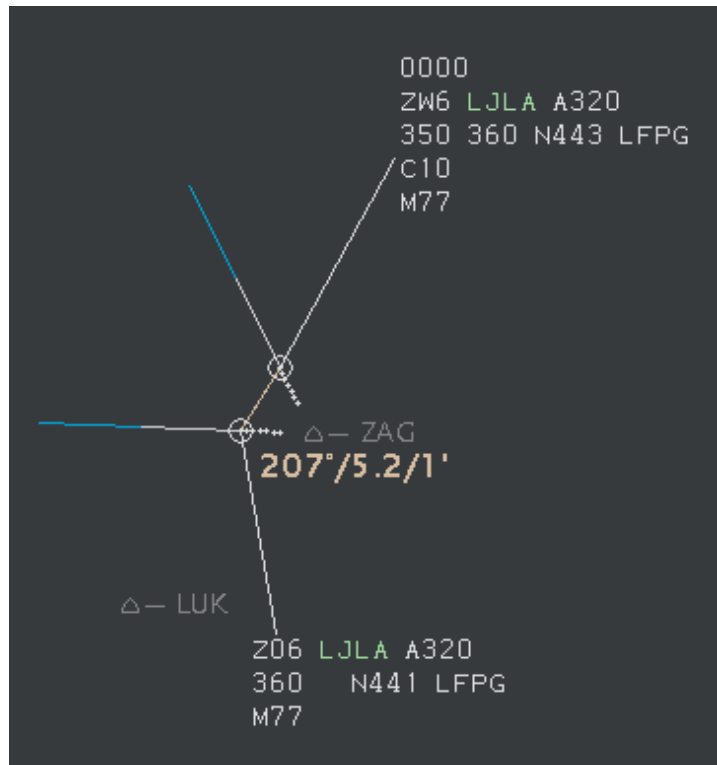
Slika 22: Početno stanje para zrakoplova



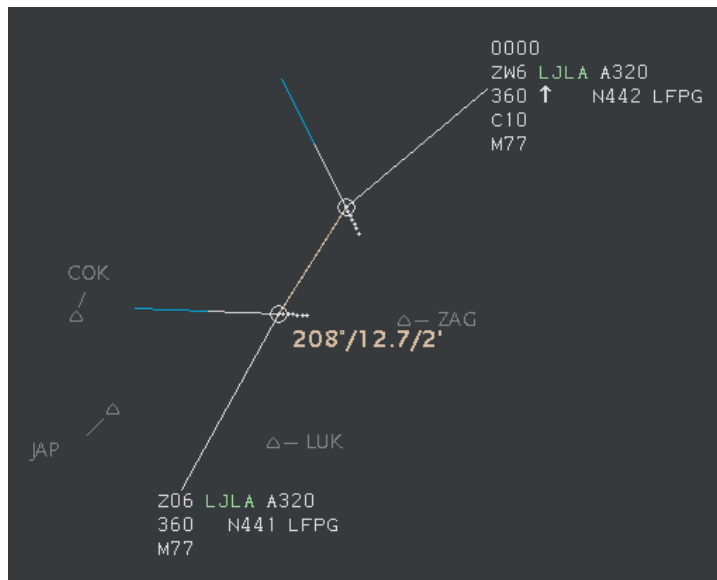
Slika 23: Trenutak davanja snižavanja drugom u paru zrakoplova



Slika 24: Trenutak postizanja FL350



Slika 25: Zadovoljenje horizontalne norme razdvajanja i trenutak penjanja zrakoplova

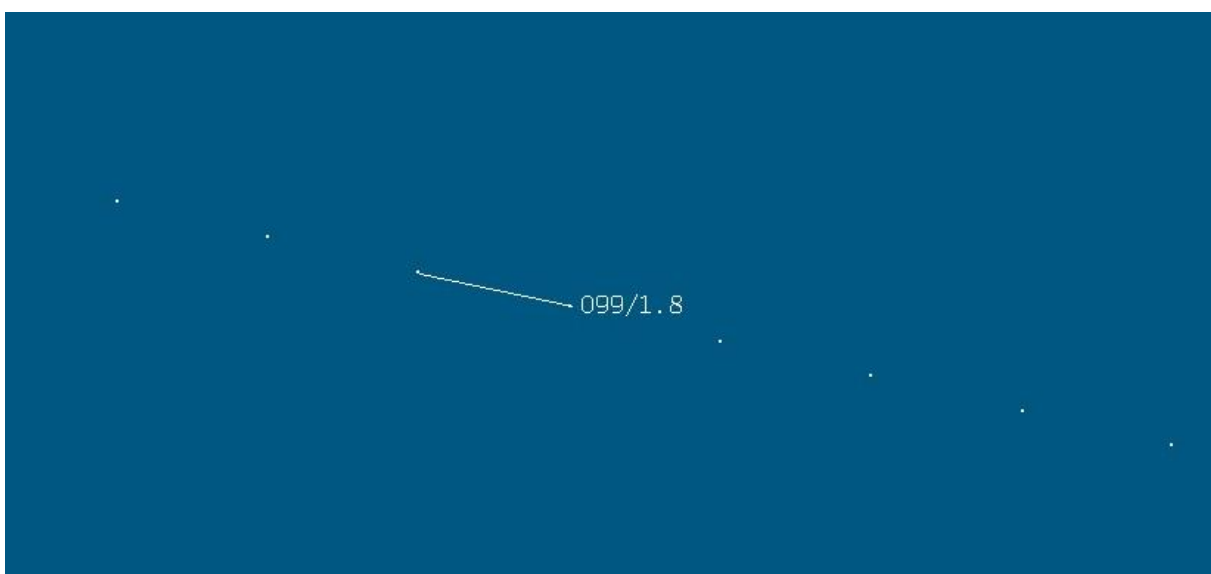


Slika 26: Postizanje FL360 i završetak simulacije

7. Rezultati i analiza simulacija

Ukupno je napravljeno 27 simulacija zračnog prometa kako bi se odredila optimalna metoda razdvajanja zrakoplova u određenim situacijama: 9 za metodu razdvajanja vektorima, 9 za metodu razdvajanja brzinama i 9 za metodu razdvajanja razinom leta.

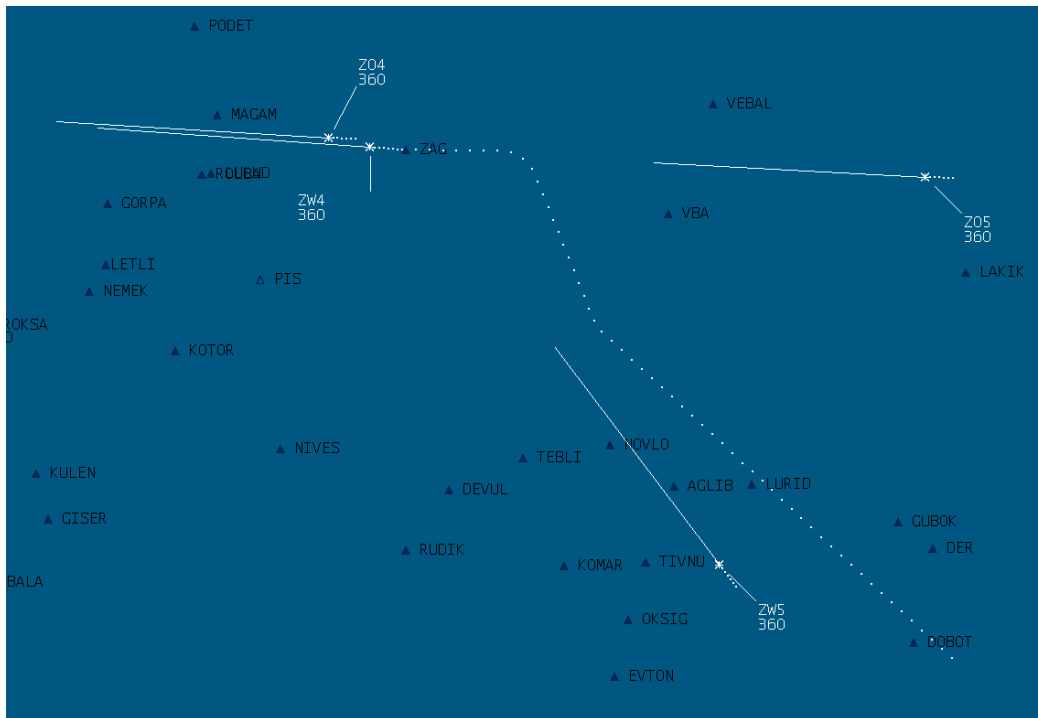
Prijeđena udaljenost se mjerila alatima u sustavu BEST znajući da je između svakog radarskog okreta, zrakoplov preleti 1.8 NM sa zadanom brzinom 0.77 Ma (slika 27). Duljina trajanja leta je mjerena od trenutka pojave zrakoplova do prelaska preko navigacijske točke ZAG.



Slika 27: Udaljenost između radarskih otkućaja

7.1. Rezultati razdvajanja metodom vektoriranja

S obzirom da je poznata udaljenost na kojoj se zrakoplovi pojavljuju u odnosu na navigacijsku točku ZAG, bilo je potrebno izračunati samo koju udaljenost je prešao zrakoplov „ZWx“. To je računato pomoću alata dostupnih u BEST simulatoru na pseudopilotskom i kontrolorskom sučelju (slika 28). Ranije je već ustanovljeno da je udaljenost između dva radarska otkućaja jednaka 1.8 NM. Poznat je broj radarskih otkućaja te je prema tome lako izračunata udaljenost.



Slika 28: Prikaz prijednog puta zrakoplova pri vektoriranju

Za slučajeve gdje radarski otkučaj nije savršeno poravnat sa centrom navigacijske točke, korišten je QDM, od zadnjeg radarskog otkucaja do samog središta navigacijske točke (slika 29).



Slika 29: Precizno mjerenje udaljenosti od radarskog otkucaja do navigacijske točke

Za potrebe računanja vremenske duljine leta je jednostavno korišten sat integriran u sami simulator koji vrlo precizno određuje vrijeme. Svaku put kad bi zrakoplov prešao preko točke ZAG, zabilježilo bi se vrijeme te je računata razlika između pojedinih zrakoplova u paru.

U tablici 6 su prikazane brojčane vrijednosti dobivene nakon izračuna prijeđene udaljenosti i proteklog vremena leta. Potrošnja goriva je izračunata prema formuli iz poglavlja 4.1. „Potrošnja goriva u horizontalnom letu“. Važno je napomenuti kako podatke koji će se u nastavku ovog poglavlja analizirati nisu realna usporedba među pojedinim parovima konfliktnih zrakoplova zbog toga što samo prva 4 para lete jednako minuta, a zatim se postepeno minute povećavaju kako bismo realno mogli usporediti pojedine metode razdvajanja po parovima konfliktnih zrakoplova.

Tablica 6: Rezultati razdvajanja metodom vektoriranja

PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA VEKTORIMA		
	ZBROJ PRIJEĐENE UDALJENOSTI (NM)	ZBROJ DULJINE TRAJANJA LETA (min)	ZBROJ POTROŠNJE GORIVA (kg)
1	x	x	X
2	206,4	28,5	1088,0254
3	206,3	28,4964	1087,3879
4	206	28,45	1086,1166
5	219,9	30,3333	1158,0141
6	237,2	32,7	1248,366
7	236,7	32,6	1244,5484
8	267,8	37,0833	1415,7043
9	282,5	39,15	1494,6033

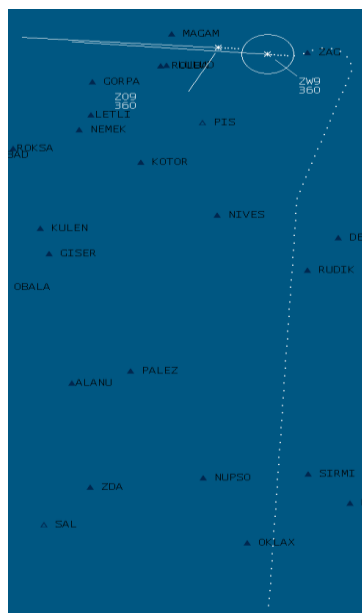
Uz mnoge pokušaje i razne smjerove leta, za prvi slučaj u metodi razdvajanja vektorima nije moguće odrediti povoljan smjer leta koji bi razdvojio promet. Naime, zrakoplovi su međusobno, na udaljenosti 5 minuta od navigacijske točke ZAG horizontalno preblizu te nijedan smjer leta pri tom kutu kretanja ne može zadovoljiti separacijsku normu od 5 NM zbog radijusa zaokreta prema potrebnom smjeru leta. Stoga je ovaj prvi slučaj označen oznakom „x“.

Kod ostalih slučajeva, računao se zbroj traženih vrijednosti za referentni zrakoplov koji ne mijenja svoj smjer kretanja te zrakoplova koji dobiva određeni vektor skretanja za izbjegavanje prometa. Referentni zrakoplovi (oni kojima ne mijenjamo smjer leta) prelaze

udaljenosti i minute leta prikazane u tablici 3, a vektorirani zrakoplovi iste te udaljenosti nadodane za višak NM prouzročen samim vektoriranjem. Te dvije vrijednosti su zbrojene kako bismo mogli usporediti dobivene rezultate sa onima dobivenima metodama razdvajanja brzinom i razinom leta. Dobiveni su rezultati prikazani u tablici iznad.

Generalno je vidljivo kako sve vrijednosti rastu, što je i očekivano s obzirom da se povećava udaljenost koju parovi zrakoplova prelaze, a time i potrošnja goriva. Nadalje, kod promjene kuta se povećava put i razlika u stupnjevima koje vektorirani zrakoplov mora proći dok ne dođe ponovno do točke ZAG. Kod parova zrakoplova 2 do 4 može se vidjeti blagi pad vrijednosti zbog toga što se uz jednaku početnu udaljenost od ZAG, smanjuje potrebni kut za dobivanje horizontalne norme. Parovi 6 i 7 imaju jednaku početnu udaljenost, ali je uočen blagi pad prijeđene udaljenosti zbog manjeg kuta zaokreta vektoriranog zrakoplova 7 te je vektoriranjem zrakoplova 6 dobivena veća horizontalna norma razdvajanja od slučaja 7.

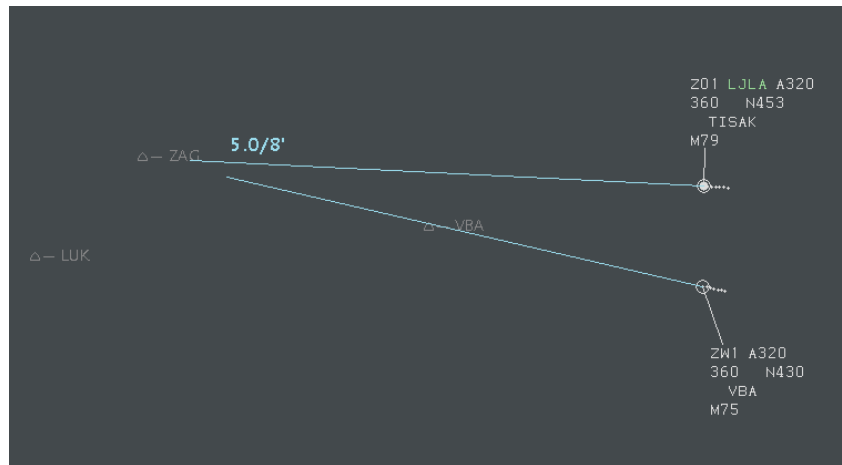
Također, bitno je napomenuti da je traženi promet vraćan na točku ZAG (slika 30) što u praksi ne bi bio slučaj kod velikih kutova već bi se tražila neka iduća točka na ruti koja bi odgovarala tom smjeru leta. Za potrebe ovog rada, ta praksa je zanemarena jer bi postojao preveliki broj mogućnosti te se ne bi moglo točno odrediti do koje točke ili udaljenosti bi bili mjereni konfliktni slučajevi. Manji kutovi prezentiraju realnije prometne situacije.



Slika 30: Putanja zrakoplova razdvajanjom metodom vektoriranja i prikaz povratka na točku ZAG nakon vektoriranja

7.2. Rezultati razdvajanja brzinama

Kod metode razdvajanja brzinama je odmah vidljivo da nema razlike u prijeđenoj udaljenosti. Zrakoplovi su letjeli po programiranim putanjama bez odstupanja. No, postoji razlika u vremenu trajanja leta (slika 31), a samim time što su promijenjene performanse zrakoplova, dolazi i do razlike u potrošnji goriva. Brojčane vrijednosti su prikazane u tablici 7.



Slika 31: Prikaz (vremenske) udaljenosti zrakoplova na točki ZAG prilikom razdvajanja brzinama

Tablica 7: Rezultati razdvajanja metodom zadavanja brzina

PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA BRZINAMA		
	ZBROJ PRIJEĐENE UDALJENOSTI (NM)	ZBROJ DULJINE TRAJANJA LETA (min)	ZBROJ POTROŠNJE GORIVA (kg)
1	204	27,9867	1058,5689
2	204	27,9867	1058,5689
3	204	27,9867	1058,5689
4	204	27,9867	1058,5689
5	218	29,9667	1135,0035
6	234	31,95	1214,8133
7	234	31,95	1214,8133
8	264	35,9467	1370,36
9	278	37,9666	1443,0623

Kod metode razdvajanja brzinama odmah je vidljivo da je prijeđena udaljenost jednaka duploj udaljenosti stvaranja zrakoplova od točke ZAG. To je logično jer se promjenom brzine ne mijenja udaljenost nego samo vrijeme koje je potrebno da se ista udaljenost prijeđe.

Duljina trajanja leta zrakoplova u prvom slučaju bi bila 14 minuta za brzinu Ma 0.77. Ta vrijednost bi se trebala udvostručiti te bismo tako dobili vrijednost od 28 minuta. Iz tablice je vidljivo da je brzina kod metode razdvajanja brzinama minimalno različita od referentne. To je također očekivano jer se brzinama zrakoplova „simetrično“ upravlja – jedan je za Ma 0.02 brži, a drugi je za Ma 0.02 sporiji. Aritmetičkom sredinom bi se trebao dobiti isti rezultat. Odstupanja u decimalama u ovom slučaju mogu biti i greška samog izračuna mjerenja vremena, trenutku radarskog okreta, zaokruživanja decimala, procesa pojave zrakoplova na radarskom zaslonu, blage fluktuacije u čvorovima brzina zrakoplova te povremenog blagog odstupanja od putanje zrakoplova prema ZAG. Te fluktuacije su implementirane u sam sustav simulatora u HKZP-u kako bi se ipak postigla određena doza realnosti pri školovanju kontrolora leta.

Naravno, kada bi se gledala brzina samo jednog od zrakoplova, bržem bi trebalo manje vremena, a sporijem dulje, pa bi zrakoplovi tako i imali različitu potrošnju goriva, no u ovom radu to nije bio cilj istraživanja pa se nije koncentriralo na svaki zrakoplov zasebno.

Iz tablice je vrlo jednostavno zaključiti kako potrošnja goriva prati trend povećanja minuta, a time i milja koje zrakoplovi lete do ZAG.

7.3. Rezultati razdvajanja razinom leta

Kao i kod metode razdvajanja brzinama, zbroj prijeđene udaljenosti je zbroj oba zrakoplova. Promatrana je potrošnja goriva zrakoplova prilikom snižavanja i penjanja te s obzirom na razinu leta (tablica 8). Razinu leta FL350 smatramo u ovome slučaju kao privremenu visinu korištenu isključivo za separaciju konfliktnog para zrakoplova. Ova metoda je specifična od ostalih po tome što konflikt ne završava na točki ZAG nego tek kada se zrakoplovi prođu, postignu horizontalnu normu od 5 NM i kada niži zrakoplov ponovno postigne razinu leta FL360. Kao referentni podaci su uzeti oni iz BADA priručnika.

S obzirom da su radi usporedbe, metode razdvajanja brzinama i vektorima usklađene minutama leta do ZAG, za računanje ove metode su korištene vrijednosti zbroja duljine leta kao u slučaju brzina. Od polovice te vrijednosti je oduzeto vrijeme od trenutka kada zrakoplov postigne razinu leta FL350 do trenutka kada ponovno postigne razinu leta FL360. Razdoblje promjena razine leta je računato na način da se za minutu snižavanja upotrijebila potrošnja s razine leta FL360, a za minutu penjanja s razine leta FL350. Tako je odlučeno zbog toga što zrakoplovi u stvarnom prometu ionako mijenjaju svoju brzinu promjenu visine pri napuštanju i postizanju razine leta te se time dobila aritmetička sredina u tom razdoblju promjene.

Tablica 8: Rezultati razdvajanja metodom razinom leta

PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA RAZINOM LETA		
	ZBROJ PRIJEĐENE UDALJENOSTI (NM)	ZBROJ DULJINE TRAJANJA LETA (min)	ZBROJ POTROŠNJE GORIVA (kg)
1	204	27,9867	1031.4048
2	204	27,9867	991.6566
3	204	27,9867	991.2637
4	204	27,9867	991.0018
5	218	29.9667	1063.9778
6	234	31.95	1143.445
7	234	31.95	1143.3795
8	264	35,9467	1302.3179
9	278	37,9666	1378.6706

Rezultati ukupne potrošnje goriva očekivano rastu s povećanjem ukupnog vremena leta zrakoplova uz iznimku 1. para. U prvom slučaju može se primijetiti veća potrošnja u odnosu na parove zrakoplova 2 do 4 gdje svi prelaze jednaku udaljenost ali se pod malim kutom zrakoplovi puno duže razilaze nakon ZAG. Posljedično tome, zrakoplov duže provede na razini leta FL350, a time troši više goriva.

7.4. Mišljenje pilota na zrakoplovu A320

Za subjektivno mišljenje o preferencijama, provedene su konzultacije s pilotom, kapetanom zrakoplova A320 zračnog prijevoznika Wizz Air. Dao je mišljenje o metodama razdvajanja, uz napomenu da je iz njegove perspektive najbolja metoda vektoriranje i to po mogućnosti što ranije zadavanje otklona 5 ili 10 stupnjeva kako bi bilo što manje odstupanje od originalne rute zrakoplova. Druga metoda po preferencijama bi bila metoda zadavanja brzina koja ima svoje nedostatke. Tu se problem može pojaviti u slučaju da mu kontrolor leta zada malu brzinu koja je blizu brzine sloma uzgona ili pak veliku brzinu koja je blizu maksimalne strukturalne brzine. U tom slučaju prilikom pojave turbulencija piloti moraju pažljivo monitorirati svoju brzinu kako ne bi prešla navedene granice performansa zrakoplova. Kao zadnju opciju bi odabrao promjenu razine leta zbog toga što potrošnja goriva osjetno raste pri dugim periodima na visinama različitim od optimalne, a isto tako navodi kako kratke promjene visina nemaju toliki utjecaj na potrošnju goriva, ali mogu predstavljati dodatne izazove za kabinsko osoblje koje u tom trenutku možda poslužuju ljude. Dalje navodi kako je još jedan potencijalni nedostatak u tome što su obično zračne mase razdvojene po razinama leta te u slučaju promjena više razina leta može doći do pojave turbulencija koje u kombinaciji sa promjenom napadnog kuta mogu znatno otežati posao kabinskog osoblja te narušiti udobnost samog leta.

7.5. Analiza dobivenih rezultata

U nastavku su tablice 9, 10 i 11 koje prikazuju usporedbu dobivenih rezultata za različite metode razdvajanja prometa.

Tablica 9: Usporedba prijeđene udaljenosti različitim metodama

PRIJEĐENA UDALJENOST (NM)			
PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA VEKTORIMA	METODA RAZDVAJANJA BRZINAMA	METODA RAZDVAJANJA RAZINOM LETA
1	x	204	204
2	206,4	204	204
3	206,3	204	204
4	206	204	204
5	219,9	218	218
6	237,2	234	234
7	236,7	234	234
8	267,8	264	264
9	282,5	278	278
UKUPNO	1862,8	2044	2044

Kod proračunavanja prijeđene udaljenosti, bilo je očekivano da će metoda razdvajanja vektorima imati najlošije rezultate. Ta metoda jedina mijenja rutu zrakoplova. Kao što je ranije spomenuto, treba uzeti u obzir da ovo nije realan slučaj kod velikih kutova u praktičnom izvođenju ove metode u stvarnom prometu, a manji kutovi realnije prikazuju omjer u odnosu na ostale metode razdvajanja. Zrakoplov bi se u većini slučajeva usmjerio na neku točku koja je bliža trenutnom smjeru leta. Time bi se znatno smanjila prijeđena udaljenost.

Bez obzira na to, može se pretpostaviti da bi u svakom slučaju metoda vektoriranja imala najgore rezultate u slučaju prijeđene udaljenosti jer svako odstupanje od rute povećava tu vrijednost, a niti jedna druga metoda nema tu otegotnu okolnost.

Metode razdvajanja brzinama i razinom leta nemaju promjene u ruti te su njihove vrijednosti jednake.

Tablica 10: Usporedba duljine trajanja leta različitim metodama

DULJINA TRAJANJA LETA (min)			
PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA VEKTORIMA	METODA RAZDVAJANJA BRZINAMA	METODA RAZDVAJANJA RAZINOM LETA
1	x	27,9867	27.9867
2	28.5	27,9867	27.9867
3	28,4964	27,9867	27.9867
4	28,45	27,9867	27.9867
5	30,3333	29,9667	29.9667
6	32,7	31,95	31.95
7	32,6	31,95	31.95
8	37,0833	35,9467	35.9467
9	39,15	37,9666	37.9666
UKUPNO	257,313	279.7268	279.7268

Ponovno, s obzirom da se metodom razdvajanja vektorima mijenja sama ruta leta zrakoplova, bilo je očekivano da će let najdulje trajati. Ponovno treba naglasiti da bi razlika bila manja da se uzimao realan slučaj slanja zrakoplova na neku smisleniju točku u pravcu kretanja.

Metoda razdvajanja brzinama ima minimalne promjene od referentnih vrijednosti te s to može kao što je ranije napisano, pripisati pogrešci očitavanja podataka i računanja, trenutku radarskog okreta, zaokruživanja decimala, procesa pojave zrakoplova na radarskom zaslonu, blage fluktuacije u čvorovima brzina zrakoplova te povremenog blagog odstupanja od putanje zrakoplova prema ZAG.

Prije analize dobivenih podataka o potrošnji goriva, radi usporedbe važno je kazati kako je tijekom školovanja kontrolora leta u HKZP-u preporuka kutove manje od 30

stupnjeva razdvajati brzinama, a veće od toga vektoriranjem dok se na promjenu razine leta gleda kao jednu od zadnjih opcija što će biti objašnjeno kasnije.

Tablica 11: Usporedba potrošnje goriva različitim metodama

POTROŠNJA GORIVA (kg)			
PAR ZRAKOPLOVA	METODA RAZDVAJANJA VEKTORIMA	METODA RAZDVAJANJA BRZINAMA	METODA RAZDVAJANJA RAZINOM LETA
1	x	1058,5689	1031.4048
2	1088,0254	1058,5689	991.6566
3	1087,3879	1058,5689	991.6566
4	1086,1166	1058,5689	991.6566
5	1158,0141	1135,0035	1063.9778
6	1248,366	1214,8133	1143.445
7	1244,5484	1214,8133	1143.3795
8	1415,7043	1370,36	1302.3179
9	1494,6033	1443,0623	1378.6706
UKUPNO	9822.766	10612,328	10038.1654

Potrošnja goriva je direktno vezana na prijeđenu udaljenost i vrijeme leta. Povećanjem spomenutih vrijednosti se povećava i potrošnja goriva. S obzirom da je metoda razdvajanja vektorima najgora u gotovo svim slučajevima, i potrošnja goriva je najveća kod te metode. Slučaj 5 je zanimljiv zbog toga što je vektoriranje efikasnije od razdvajanja razinom leta.

Dobiveni rezultati lako mogu stvoriti iluziju da je razdvajanje razinom leta najbolji način rješavanja konfliktnih prometnih situacija, ali to u praksi nije u potpunosti točno. Jedan od ciljeva u kontroli leta, prema mišljenju autora rada, je smanjiti potrebnu koordinaciju u ljetnim mjesecima kada su zračni prostori preopterećeni brojem zrakoplova kako bi se svatko mogao što bolje posvetiti svojem djelu zračnog prostora. Vrlo su česti sektori koji sadržavaju samo dvije razine leta, a to znači da bi svaki zrakoplov na najnižoj visini sektora trebao ići u niži sektor što pokreće potrebu za koordinaciju te može dovesti do potencijalnog

preopterećenja tog sektora. Drugi problem ove metode je također u toj vrsti sektora gdje je jako puno zrakoplova raspoređeno na dvije razine leta te bi svako to razdvajanje dovelo do ponovne analize prometne situacije i dodatnog opterećenja možda već preopterećenog kontrolora leta. Nadalje, u vršnim opterećenjima je rizično zrakoplove voditi po suprotnim razinama leta od onih na kojima većina zrakoplova leti njemu „u čelo“ zbog toga što može vrlo lako doći do previda uslijed velikog obujma posla. S obzirom da je sigurnost primarna zadaća u kontroli leta, sada dolazimo do efikasnosti. Svakom zrakoplovu odgovara letjeti na razini leta optimalnoj za njemu najnižu potrošnju, a s obzirom da većina letova kroz zračni prostor Republike Hrvatske dolazi na njihovoj razini krstarenja, nije efikasno zrakoplove snižavati i na to će često piloti negodovati. Također se može spomenuti i kako se promjenama razine leta smanjuje komfor putnicima u zrakoplovu. Prednost ove metode razdvajanja je što se niti jednom od zrakoplova neće produljiti niti skratiti vrijeme leta što olakšava planiranje prometa na razini cjelokupne mreže, što je ključno u današnje vrijeme preopterećenosti mreže i aerodroma destinacije. Nadalje, putnici će u teoriji doći na vrijeme na destinaciju. Na temelju ipak prevladavajućih negativnih efekata ove metode razdvajanja, u analizi će ona biti uzeta zaista kao jedna od rezervnih metoda rješavanja konflikata te će se fokusirati na prve dvije.

Prometna situacija 1 pokazuje kako je razina leta najefikasnija metoda, ali ne značajno. Na temelju gore navedenih nedostataka ove metode može se čak i zaključiti kako je bolje upotrijebiti brzine.

Prometne situacije 2, 3 i 4 pokazuju kako je nakon razine leta najefikasnija metoda razdvajanja brzinama, kao što je i preporuka u školovanju kontrolora leta pri rješavanju prometnih situacija malih kutova prilaza iako ne do preporučenih 30 stupnjeva, već i do 40 pa čak i 50 stupnjeva razlike.

Kod prometne situacije 5 se može uočiti da su sve 3 metode podjednako efikasne. Od kutova 50 stupnjeva i više, razina leta više nije toliko dominantno efikasnija od brzina i vektora. Brzina je u ovome slučaju najefikasnija metoda, ali još je bitniji pokazatelj u tome da je posljedica vektoriranja manja potrošnja goriva u odnosu na razinu leta. Prema iskustvu autora ovog rada to može indicirati na sve efektivnije djelovanje vektoriranja. Od ovog pa prema većim kutovima prilaza, potrebni su vektori u odstupanju 20 stupnjeva ili manje od početne putanje zrakoplova, što ulazi u realne okrete zrakoplova u praksi ali zrakoplovi ne

moгу prilikom lošeg vremena uvijek okrenuti u zadani smjer leta. Veći okreti od tih se obično upotrebljavaju u situacija hitnosti, previda ili na puno manji vremenski period od analiziranog.

Prometne situacije 6 i 7 pokazuju već spomenutu efikasnost promjene razine leta i ne preveliku razliku između brzina i vektoriranja, ali važno je za zaključak napomenuti par stvari. U prilog vektoriranju ide činjenica da 6. par zrakoplova ima minimalnu udaljenost 6.2NM, dok se brzinama postigla minimalna udaljenost od 5.0NM. Nadalje, kontrolor leta mora manipulirati s dva zrakoplova umjesto sa samo jednim što povećava radno opterećenje i zagušuje frekvenciju. Zrakoplovi su sada pod regulacijama brzina 16 minuta, i više, što u praksi može izazvati negodovanje pilota te može dovesti do većih promjena i stvaranja novih konflikata s drugim zrakoplovima unutar sektora u odnosu na primjerice okret jednog zrakoplova 15 ili 10 stupnjeva na 5 minuta. Od kutova 60 i više, vektoriranje postaje nerealno, kao što je i ranije spomenuto. Uzevši sve navedeno u obzir, prema iskustvu autora i s obzirom da je situacija 5 pokazivala smanjenje razlike između vektoriranja i brzina, može se naslutiti kako je ipak u ovim slučajevima najbolja metoda vektoriranje ili pak promjena razine leta.

Za prometne situacije 8 i 9 bi se moglo navesti sve kao i za situacije 6 i 7, ali je razlika vektoriranja i brzina sada već prevelika te je teško nagađati da li bi vektoriranje zaista bilo efikasnije od promjena brzina dok je promjena razine leta i dalje najefikasnija metoda od navedenih 3.

8. Zaključak

Kontrola zračnog prometa je kompleksno zanimanje u kojemu niti jedan dan nije jednak. Dobiveni rezultati mogu davati okvirne smjernice za razdvajanje izoliranih slučajeva zrakoplova, ali je u praksi mnogo različitih faktora i mnogo više zrakoplova u pojedinom zračnom prostoru koji iz minute u minutu mijenjaju prometnu situaciju.

Nakon dovršene analize i usporedbe rezultata dobivenih za tri različite metode razdvajanja, može se zaključiti kako je metoda vektoriranja svakako i očekivano ostvarila najveće prijedene udaljenosti zato što jedina mijenja putanju zrakoplova.

Što se tiče vremena provedenog u zraku, promjena razine leta je najpovoljnija metoda za zračnog prijevoznika i putnike koji će stići na odredište teoretski bez kašnjenja dok je metoda zadavanja brzina povoljnija putnicima i zračnom prijevozniku za brži, a nepovoljnija za sporiji zrakoplov.

Gledajući potrošnju goriva i njen ekološki utjecaj, može se zaključiti kako je prema dobivenim rezultatima vektoriranje financijski najnepovoljnija metoda razdvajanja za zračnog prijevoznika, a samim time i na okoliš. Rezultati ove metode bi bili drugačiji da je vektorirani zrakoplov bio vraćan na neku od sljedećih logičnih točaka rute te da je instrukcija okreta bila davana na više od pet minuta prije konflikta što je na žalost bilo nemoguće simulirati zbog previše mogućih varijacija. Najmanju potrošnju goriva, prema dobivenim rezultatima, ostvarila je metoda promjene razine leta koja ima brojne nedostatke, a samim time je i jedna od posljednjih metoda razdvajanja zrakoplova u praksi.

LITERATURA

- [1] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. Preuzeto s: <http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=10> [Pristupljeno 21. 09. 2024]
- [2] Jurkovic, V., Metode razdvajanja zrakoplova u oblasnoj kontroli zračnog prometa Zagreb. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2019. Preuzeto s: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:1882> (Pristupljeno: 21.9.2024.)
- [3] https://code7700.com/images/regulations/icao_airspace_classification.jpg (Pristupljeno 9.9.2024.)
- [4] OPS GROUP, 01. 02. 2017., <https://ops.group/blog/2016-16th-edition-icao-doc-4444/> (Pristupljeno 9.9.2024.)
- [5] EASA – SERA – Commission Implementing Regulation (EU) No 923/2012 of 26 September 2012. Preuzeto s: <https://shorturl.at/MrlWJ> (Pristupljeno 10.9.2024.)
- [6] Uredba Komisije (EU) 2019/317. Preuzeto s: https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3717947/mod_resource/content/0/CELEX_32019R0317_HR_TXT_NOVA_Performance_regulativa.pdf (Pristupljeno 10.9.2024.)
- [7] EUROCONTROL, Nest modelling tool. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/services/nest-modelling-tool> (Pristupljeno 10.9.2024.)
- [8] SESAR Joint Undertaking – European ATM Master Plan 2020 (Pristupljeno 21.9.2024.)
- [9] Eurocontrol, User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.15. Preuzeto s: <https://www.eurocontrol.int/publication/user-manual-base-aircraft-data-bada> (Pristupljeno 10.9.2024.)
- [10] Valenčić L., *Usporedba učinkovitosti leta zrakoplova u simuliranim uvjetima vektoriranja i u uvjetima navigacije zasnovane na performansama u prostoru TMA Frankfurt*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2023. Preuzeto s: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:2938> (Pristupljeno 9.9.2024.)
- [11] Thales. Preuzeto s: <https://www.thalesgroup.com/en> (Pristupljeno 10.9.2024.)

POPIS TABLICA

Tablica 1: Prikaz podataka u label-u zrakoplova na radarskom ekranu -----	4
Tablica 2: Klase zračnog prostora i uvjeti klasa [3]-----	10
Tablica 3: Prikaz početne postavbe parova zrakoplova u simulacijama -----	22
Tablica 4: Prikaz vrijednosti kod metode razdvajanja brzinama -----	28
Tablica 5: Prikaz vrijednosti kod metode razdvajanja vektorima -----	31
Tablica 6: Rezultati razdvajanja metodom vektoriranja -----	37
Tablica 7: Rezultati razdvajanja metodom zadavanja brzina -----	39
Tablica 8: Rezultati razdvajanja metodom razinom leta -----	41
Tablica 9: Usporedba prijeđene udaljenosti različitim metodama -----	43
Tablica 10: Usporedba duljine trajanja leta različitim metodama -----	44
Tablica 11: Usporedba potrošnje goriva različitim metodama -----	45

POPIS SLIKA

Slika 1: Label zrakoplova na radarskom zaslonu-----	4
Slika 2: Prikaz obavijesti STCA na radarskom ekranu-----	5
Slika 3: Prikaz upozorenja TCT na radarskom ekranu -----	7
Slika 4: Prikaz alata QDM na radarskom ekranu-----	7
Slika 5: Prikaz alata velocity vector na radarskom ekranu -----	8
Slika 6: Prikaz alata SEP na radarskom ekranu -----	9
Slika 7: Horizontalno razdvajanje zrakoplova pomoću alata SEP -----	12
Slika 8: Prikaz istih putanja zrakoplova [4] -----	14
Slika 9: Prikaz suprotnih putanja zrakoplova [4]-----	14
Slika 10: Prikaz konvergirajućih putanja zrakoplova [4] -----	15
Slika 11: Prikaz početno postavljenih putanja zrakoplova -----	23
Slika 12: Početno stanje prvog para zrakoplova (Z03 i ZW3)-----	24
Slika 13: Prikaz vremenskog odmaka parova zrakoplova -----	24
Slika 14: Izgled prikaza prijedene putanje zrakoplova u programu Best-----	26
Slika 15: Početno stanje zrakoplova kod metode razdvajanja brzinama-----	27
Slika 16: Postavljanje minimalne sigurne udaljenosti za par zrakoplova metodom razdvajanja brzinama -----	27
Slika 17: Početni položaj para zrakoplova -----	29
Slika 18: Trenutak davanja novog smjera leta 5 minuta prije susreta zrakoplova-----	29
Slika 19:Prikaz zadovoljene norme razdvajanja-----	30
Slika 20: Trenutak nakon gašenja alata SEP te vraćanja zrakoplova na točku ZAG-----	30
Slika 21: Povratak drugog zrakoplova u paru na početnu rutu prema točki ZAG s potrebnom udaljenosti od prvog zrakoplova-----	30
Slika 22: Početno stanje para zrakoplova -----	33
Slika 23: Trenutak davanja snižavanja drugom u paru zrakoplova -----	33
Slika 24: Trenutak postizanja FL350 -----	33
Slika 25: Zadovoljenje horizontalne norme razdvajanja i trenutak penjanja zrakoplova -----	34
Slika 26: Postizanje FL360 i završetak simulacije -----	34
Slika 27: Udaljenost između radarskih otkucaja -----	35
Slika 28: Prikaz prijedene putanje zrakoplova pri vektoriranju -----	36

Slika 29: Precizno mjerenje udaljenosti od radarskog otkucaja do navigacijske točke-----	36
Slika 30: Putanja zrakoplova razdvajanog metodom vektoriranja i prikaz povratka na točku ZAG nakon vektoriranja -----	38
Slika 31: Prikaz (vremenske) udaljenosti zrakoplova na točki ZAG prilikom razdvajanja brzinama -----	39

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ diplomski rad _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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/diplomskog rada pod naslovom Utjecaj različitih metoda razdvajanja zrakoplova na efikasnost letenja , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 23.09.2024.

Viktor Jurkovac 
(ime i prezime, potpis)