

# Optimizacija plana leta prema prognoziranim podacima o vjetru

---

Žabić, Dijana

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*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:119:882083>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-29**



*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

### **OPTIMIZACIJA PLANA LETA PREMA PROGNOZIRANIM PODACIMA O VJETRU**

### **FLIGHT PLAN OPTIMISATION ACCORDING TO FORECASTED WIND DATA**

Mentor: dr. sc. Petar Andrašić

Studentica: Dijana Žabić

JMBAG: 0135256689

**Zagreb, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH**  
**ZNANOSTI ODBOR ZA ZAVRŠNI**  
**RAD**

Zagreb, 4. travnja 2022.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Planiranje leta i performanse 2**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 6855

Pristupnik: Dijana Žabić  
Studij: Aeronautika  
Smjer: Vojni pilot

Zadatak: **Optimizacija plana leta prema prognoziranim podacima o vjetru**

Opis zadatka:  
Opisati performanse jednomotornog klipnog zrakoplova. Opisati izvor i način prikupljanja prognoziranih podataka o vjetru. Odrediti postupak izračuna horizontalnog plana leta. Kreirati algoritam za optimizaciju plana leta. Prikazati i objasniti rezultate algoritma za optimizaciju plana leta.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

dr. sc. Petar Andrašić

## **Sažetak**

Planiranje leta zahtjeva brojne analize kako bi uz zadovoljavanja svih sigurnosnih zahtjeva let bio ekonomski isplativ. Jedna od mogućnosti provedbe optimizacije kako bi se smanjili operativni troškovi je korištenje povoljnih vjetrova što je i zadatak ovog rada.

Završni rad obuhvaća opis performansi zrakoplova Zlin 242L, meteorološke utjecaje na performanse zrakoplova te kako se mogu iskoristiti predviđeni meteorološki podaci pri planiranju i optimiziranju rute s ciljem smanjenja operativnih troškova. Predstavljene su načini mjerenja utjecaja vjetra te izračuni utjecaja bočne i uzdužne komponente na željenu putanju leta. Naveden je i opisan algoritam korišten u radu koji omogućuje optimizaciju plana leta prema prognoziranim podacima o vjetru.

## **Ključne riječi**

Planiranje leta, performanse zrakoplova, optimizacija plana leta, utjecaj vjetra.

## **Summary**

Flight planning requires the analysis of many variables in order to be economically viable while meeting all safety requirements. One type of optimization in order to reduce operating costs is the use of favorable winds, which is the task of this thesis.

This thesis describes the performance of the Zlin 242L, meteorological influences on aircraft performance and how forecasted meteorological data can be used in planning to optimize the route with the aim of reducing operating cost. Different ways of measuring the influence of wind and calculations of the influence of the lateral and longitudinal components on the desired flight path are presented. The algorithm used in this thesis, which enables the optimisation of the flight plan based on forecasted wind data, is listed and also described.

## **Key words**

Flight planning, aircraft performance, flight plan optimisation, wind influence.

# Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Opis i karakteristike zrakoplova Zlin 242L .....	2
2.1	Pogonska skupina zrakoplova .....	3
2.2	Pojam i definicija performanse zrakoplova.....	5
2.3	Performanse zrakoplova Zlin 242L .....	5
2.4	Režim horizontalnog leta .....	6
2.4.1	Dolet.....	7
2.4.2	Istrajnost.....	8
2.5	Režim penjanja.....	9
3	Opis prognoziranih podataka o vjetru .....	12
3.1	Atmosferski utjecaji na performanse zrakoplova .....	12
3.2	Vjetar .....	14
3.2.1	Mjerenje jačine i smjera vjetra .....	14
3.2.2	Načini prikaza podataka o vjetru .....	18
4	Postupak izračuna horizontalnog plana leta.....	20
4.1	Utjecaj meteoroloških uvjeta na planiranje leta .....	20
4.2	Brzina leta zrakoplova .....	21
4.3	Utjecaj vjetra na brzinu i putanju leta.....	21
4.4	Metoda izračuna utjecaja vjetra napamet.....	22
4.5	Izračun vremena i potrošnje goriva u režimu horizontalnog leta .....	22
5	Algoritam optimizacije plana leta .....	24
5.1	Meteorološki podaci .....	24
5.2	A* algoritam .....	26
6	Rezultati optimizacije plana leta .....	29
6.1	Zagreb-Napulj visina 1500 ft .....	29
6.2	Napulj-Zagreb 1500 ft .....	29
6.3	Zagreb- Napulj 6500 ft .....	30
6.4	Napulj-Zagreb 6500 ft .....	31
6.5	Analiza.....	32
7	Zaključak.....	33
	Reference .....	34
	Popis slika .....	35
	Popis tablica .....	35

# 1 Uvod

Planiranje leta je proces izrade željene putanje leta zrakoplova najčešće s ciljem smanjivanja operativnih troškova. Planiranje uključuje proučavanje performansi zrakoplova, zračnog prostora planirane rute, proučavanje meteoroloških informacija te izračune vremena i potrošnju goriva na željenoj ruti. Korisnici zračnog prostora tijekom planiranja i izrade plana moraju poznavati performanse zrakoplova koje im omogućuju upravljanje zrakoplovom pri najpovoljnijim parametrima za potrebni režim leta. Ovaj rad opisuje na koji način se plan leta može optimizirati pomoću predviđenih podataka o vjetru na primjeru performansi jednomotornog klipnog zrakoplova Zlin 242L.

U drugom poglavlju su opisani termini performansa zrakoplova te karakteristike i performanse zrakoplova Zlin 242 L u režimima penjanja i horizontalnog leta, opis pogonske skupine te dokumentacija i izvori gdje korisnici zrakoplova imaju dostupne vrijednosti parametara za određene uvjete tijekom leta.

U Trećem poglavlju je objašnjeno kako i zašto se tijekom planiranja leta uzimaju u obzir meteorološki podaci. Opisani su i načini prikaza vjetrova na meteorološkim kartama i način kako se iščitava smjer i brzina vjetra.

Četvrto poglavlje opisuje kako održavati i korigirati letne parametre kao što su pravac leta i brzina s obzirom na meteorološku situaciju na području planirane rute. Opisan je ručni izračun korekcije vjetra te kako optimizirati plan leta kako bi se smanjila potrošnja goriva i skratilo vrijeme trajanja leta.

Peto poglavlje sadrži opis algoritma koji nakon unosa početne i krajnje točke rute automatski određuje najoptimalniju rutu s obzirom na vjetar ovisno o traženju putanje najbolji domet ili putanju leta zrakoplova za najbolju istrajnost.

Šesto poglavlje opisuje rezultat algoritma.

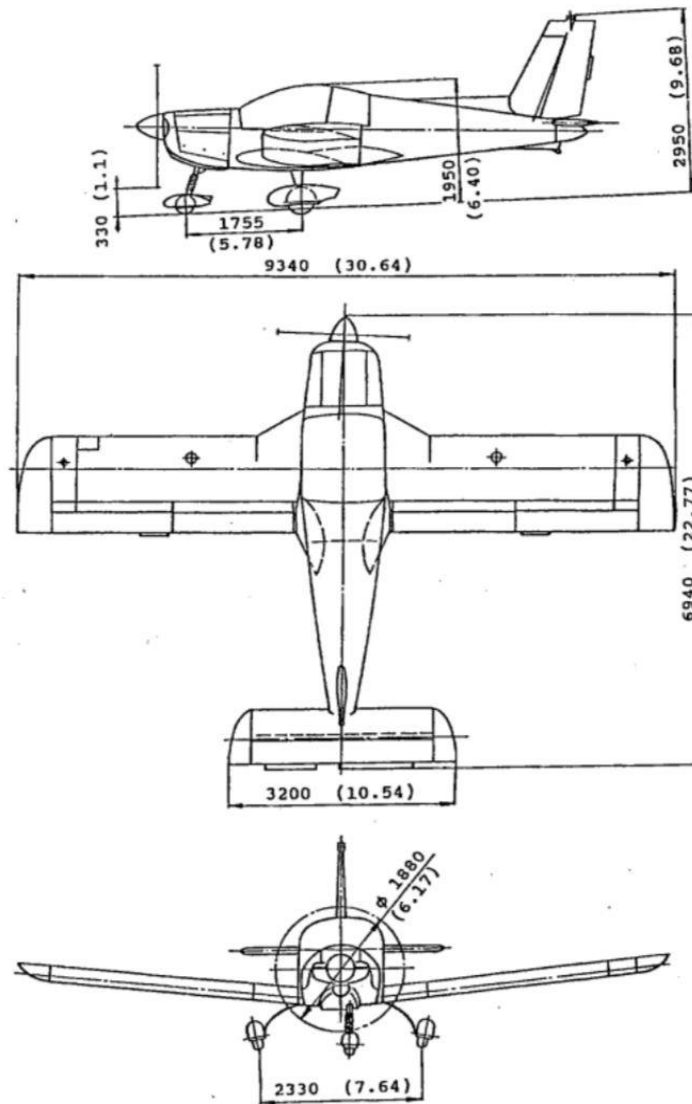
## 2 Opis i karakteristike zrakoplova Zlin 242L

Zrakoplov Zlin 242L je jednomotorni klipni zrakoplov koji je dizajniran za temeljnu i naprednu letačku obuku, akrobatsko letenje i vuču jedrilica. Sadrži opremu koja mu omogućuje korištenje za obuku u uvjetima noćnog i instrumentalnog leta te radionavigacijsku obuku.

Zlin 242L je jednokrilač te ima nisku ugradnju krila, neuvlačivi stajni trap tipa tricikl te je namijenjen za dvočlanu posadu. Pogonska skupina zrakoplova se sastoji od Textron Lycoming AEIO-360-A1-B6 motora koji pogoni trokraku elisu Hartzell HC-C3R4BF/FC 6890 [1].

Dimenzije zrakoplova prikazane pomoću slike 1 su:

- Duljina zrakoplova 6,94m
- Visina zrakoplova 2,95m
- Raspon krila 9,34m
- Diedar krila 6°
- Duljina glavne tetive krila 1,54m
- Razmak između glavnih nogu stajnog trapa 2,33m
- Razmak između prednje i glavnih nogu stajnog trapa 1,755m
- Promjer propelera 1,78m
- Udaljenost propelera od zemlje 0,38m



Slika 1 Dimenzije zrakoplova [1]

Postoje tri kategorije zrakoplova koje mu omogućuju različite performanse ovisno o namjeni za željeni let, a to su:

- *Normal,*
- *Acrobatic,*
- *Utility.*

Za potrebe ovoga rada opisivat će se performanse zrakoplova u *Normal* kategoriji.

## 2.1 Pogonska skupina zrakoplova

Pogonska skupina mu se sastoji od klipnog boxer motora tipa „Lycoming“ oznake AEIO-360-A1B6 koji direktnim pogonom pokreće propeler oznake „Hartzell“ HC-C3YR-4BF/C 6890. Propeler se sastoji od tri kraka hidraulički kontroliranog promjenjivog koraka.



Motor je četverotaktni četverocilindrični sa zračnim hlađenjem, a zrak se usisava kroz prednje otvore na poklopcima motora.

Zrakoplov je opremljen sa niskotlačnim sustavom za ubrizgavanje goriva. Sadrži glavne i pomoćne spremnike zapremnine 230 litara. Maksimalna postavka snage iznosi 149kW (200 KS) te se ona postiže pri 2700o/min. U tim uvjetima zrakoplov ima potrošnju od 61 l/h. Minimalnu potrošnju motor ostvaruje pri 65% snage, odnosno pri postavci snage od 86 kW (115 KS) tijekom kojega je brzina vrtnje propelera 2350 o/min. U tim uvjetima potrošnja goriva se smanjuje na 32 l/h što je i ujedno postavka snage za najbolji dolet i istrajnost. U tablici 1 su prikazane postavke snage s određenom potrošnjom goriva.

Zrakoplov sadrži sustave koji mu omogućuju rad motora tijekom leđnog i akrobatskog leta. U manevru leđnog leta zrakoplov može biti 60 sekundi te gorivne pumpe tada crpe gorivo iz akrobatskog spremnika kapaciteta 2 litre [2].

Podaci o motoru:

- Snaga motora: 200 KS
- Zapremnina motora: 5.92 l
- Stupanj kompresije: 8.7:1
- Redoslijed paljenja: 1-3-2-4
- Kut pretpaljenja: 20°
- Brzina vrtnje propelera: 2700 o/min
- Smjer okretanja propelera: U smjeru kazaljke na satu gledano u pravcu leta

Promjenjivi korak elise mu omogućava da pri istoj brzini vrtnje može razviti različitu vrijednost snage u ovisnosti o trenutnom geometrijskom koraku elise. Režim rada za određenu visinu leta je određen tlakom punjenja, brojem okretaja elise te bogatstvom smjese.

*Tablica 1 Postavke snage te potrošnja goriva [2]*

POSTAVLJENA SNAGA	SNAGA		BRZINA	POTROŠNJA GORIVA
	kW	KS	RPM	l/h
MAKSIMALNA SNAGA	149	200	2700	61,0
KRSTAREĆA (75% MC)	112	150	2450	46,5
KRSTAREĆA (65% MC)	97	130	2350	36,0
KRSTAREĆA (65% MC- najveća ušteda)	86	115	2350	32,0

## 2.2 Pojam i definicija performanse zrakoplova

Performanse zrakoplova se odnose na karakteristike zrakoplova i njegovoj sposobnosti u specifičnim režimima leta, odnosno u režimu polijetanja, penjanja, horizontalnog leta, zaokreta, spuštanja i slijetanja [3]. Tijekom planiranja rute potrebno je poznavati performanse zrakoplova kako bi se moglo letjeti određenim brzinama za pojedini režim na željenoj visini koje bi omogućile povećani domet i istrajnost leta.

Brzine i druge vrijednosti kao što su protok goriva, postavka snage motora u različitim režimima leta su posebno izračunate pri samom dizajniranju zrakoplova te su dostupne u pilotskom operativnom priručniku. Svi podaci koji su navedeni u priručniku se temelje na stvarno izmjerenim podacima te su korigirani po ICAO standardu [3].

U ovom radu će biti razrađene performanse zrakoplova Z 242 L u režimu horizontalnog leta i u režimu penjanja.

## 2.3 Performanse zrakoplova Zlin 242L

Za potrebe ovog rada koriste se parametri iz Pilotskog operativnog priručnika za zrakoplov Zlin 242L. U Tablici 2 prikazane su performanse zrakoplova u režimima polijetanja, penjanja, horizontalnog leta, spuštanja i slijetanja. Performanse su predstavljene za kategoriju *Normal* u kojoj je masa zrakoplova pri polijetanju 1090 kg.

Tablica 2 Eksploatacijske karakteristike zrakoplova Zlin 242-L [1]

<b>EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE</b>	
Duljina zaleta	266 m
Duljina polijetanja	565 m
Brzina rotacije	57-65 kn
Sigurnosna brzina uzleta	70-73 kn
Najveća brzina penjanja	81 kn
Najveća brzina uzdizanja	850 ft/min
Brzina krstarenja (na visini 1500ft)	114 kn
Najveća brzina u režimu horizontalnog leta( na visini 1500 ft)	124 kn
Najveća dozvoljena brzina	172 kn
Brzina sloma uzgona u uvjetima s uvučenim zakrilcima	60 kn
Duljina slijetanja	700m
Duljina zaustavljanja	425m
Brzina u prilazu za slijetanje	73-76 kn

## 2.4 Režim horizontalnog leta

Horizontalni let zrakoplova je gdje se zrakoplov kreće samo u horizontalnoj ravnini. Pri tom režimu svaka kombinacija brzine i mogućeg napadnog kuta ispunjava uvjet dan jednadžbom 1 u kojoj je:

- V - brzina leta zrakoplova,
- Cl - koeficijent uzgona,
- W - težina zrakoplova,
- $\rho$  – gustoća zraka.

$$V^2 \times Cl = \frac{2W}{\rho S_{ref}} \quad [1]$$

Za potrebe ovog rada koristit će se brzine krstarenja ovisno o visini iz tablice 2 gdje su prikazane vrijednosti postavke snage motora za željeni performans zrakoplova.

Tablica 3 Brzine krstarenja u ovisnosti o brzini [2]

Snaga	Broj okretaja	Tlak punjenja	visina	TAS
	RPM	In.Hg	ft	kn
Maksimalna kontinuirana (MC)	2700	Maksimalan	0	125
Krstarenje (75% MC)	2450	24.3		112
Krstarenje (65% MC)	2350	22.9		95
Maksimalna kontinuirana (MC)	2700	Maksimalan	1500	124
Krstarenje (75% MC)	2450	24.3		114
Krstarenje (65% MC)	2350	22.9		97
Maksimalna kontinuirana (MC)	2700	Maksimalan	6500	122
Krstarenje (72% MC)	2450	22.4		120
Krstarenje (68% MC)	2350	22.4		105

Proučavajući vrijednosti brzina u tablici 3, možemo primijetiti utjecaj visine na brzinu. Pri postavci maksimalne snage na većoj visini klipni motor će imati manju brzinu zbog toga što s porastom visine zrak postaje rjeđi, a rjeđi zrak rezultira smanjenoj količini kisika potrebno za izgaranje u motoru zrakoplova te dovodi do manje snage. Zbog toga je potrebno smanjivati postavku snage kako bi se omjer zraka i goriva u gorivnoj smjesi vratio na optimalnu što će rezultirati boljim performansama rada klipnog motora.

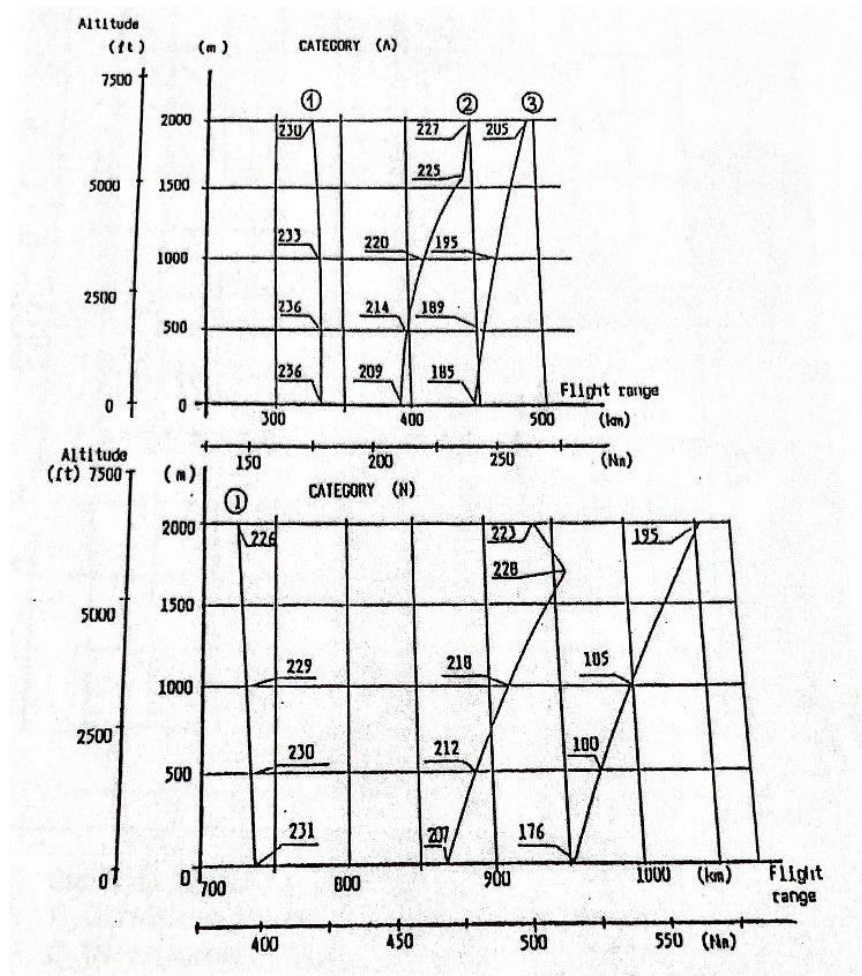
#### 2.4.1 Dolet

Ukupni put koji zrakoplov može prijeći sa količinom goriva koju sadrži se naziva dolet, a definiran je kao ukupni prijeđeni put za vrijednost potrošenog goriva [3]. Kako bi zrakoplov preletio najveću horizontalnu udaljenost potrebno je minimalizirati potrošnju goriva po prijeđenom putu u jedinici vremena. Najveći omjer prijeđenog puta u promjeni vremena zrakoplov ostvari u uvjetima gdje je omjer sile uzgona i sile otpora maksimalan [3].

Kako s porastom visine raspoloživa snaga klipnog motora opada, paralelno s tim opada i vrijednost njegova doleta. Dolet u ovisnosti o visini razmatranog zrakoplova u ovom radu je prikazan na slici broj 2 te su na njemu prikazane vrijednosti s različitom postavkom snage:

- 1) Maksimalna kontinuirana snaga, 2700 RPM
- 2) Krstarenje – 75% MC, 2450 RPM
- 3) Krstarenje – 65% MC, 2350 RPM

Sa postavkom snage na maksimalnu kontinuiranu, zrakoplov će imati najmanji dolet, a povećanje visine će negativno utjecati na vrijednosti doleta. Za razliku od maksimalne kontinuirane, pri postavci snage na 65% MC zrakoplov će imati najveći dolet te će veća visina pozitivno utjecati na njegovu vrijednost.



Slika 2 Ovisnost doleta o visini [1]

## 2.4.2 Istrajnost

Ako se potrošnja goriva svede na najmanju moguću, to će rezultirati povećanjem vremena koje zrakoplov može provesti u zraku što se naziva istrajnost zrakoplova. Odnosno istrajnost je ukupno vrijeme koje zrakoplov može provesti u zraku s količinom goriva koju sadrži [3]. Kako bi se maksimizirala istrajnost, potrebno je potrošnju goriva po satu svesti na minimalnu vrijednost, a ta vrijednost je ostvarena pri minimalnoj potrebnoj snazi zrakoplova [2].

Vrijednost doleta i istrajnosti za klipne motore računaju se pomoću Breguetovih jednažbi koje su prikazane jednažbom 2 i 3:

$$R = \frac{\eta}{c} \times \frac{cl}{cd} \times \ln \frac{W_0}{W_1} \quad [2]$$

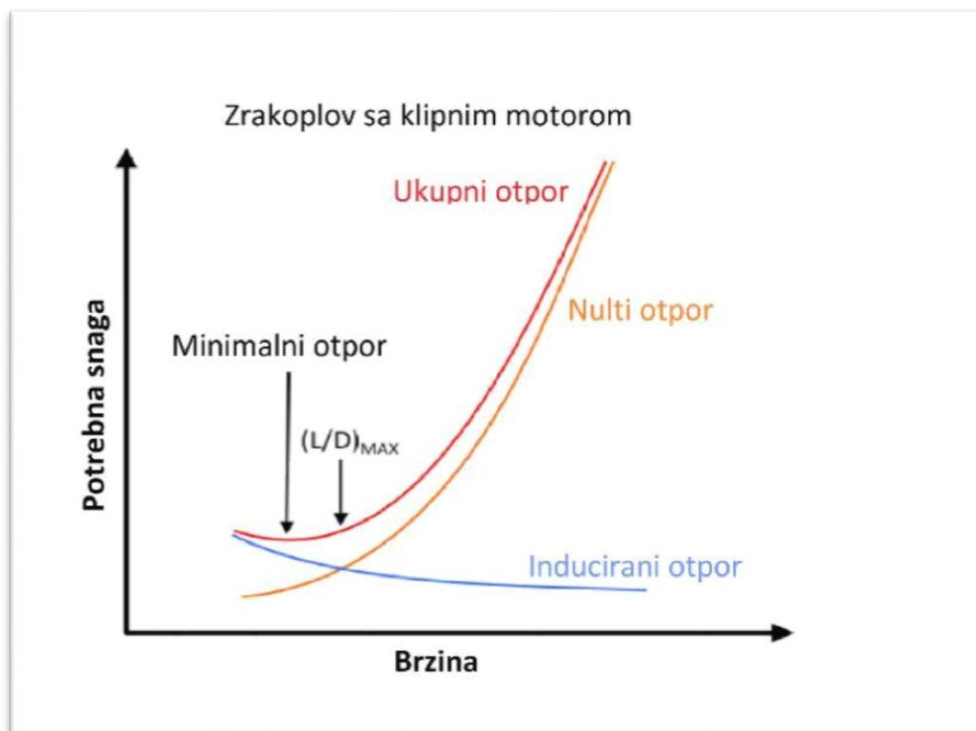
$$E = \frac{\eta}{c} \times \frac{cl^2}{cd} \times (2\rho_\infty S)^{\frac{1}{2}} \times (W_1^{-\frac{1}{2}} - W_0^{-\frac{1}{2}}) \quad [3]$$

Gdje su :

- R – dolet zrakoplova

- $E$  – istrajnost zrakoplova
- $\eta$  – stupanj iskoristivosti propelera
- $C_l$  – koeficijent uzgona
- $C_d$  – koeficijent otpora
- $W_0$  – početna težina zrakoplova
- $W_1$  – težina zrakoplova u promatranom trenutku [3]

Položaj vrijednosti doleta i istrajnosti na krivulji potrebne snage u ovisnosti o brzini je prikazan na slici 3. Tu se može primijetiti kako koeficijent uzgona za najveći dolet nije jednak koeficijentu uzgona za najveću istrajnost što je rezultat toga što pri minimalnoj potrebnoj snazi klipni motor ostvaruje najveću istrajnost, dok za najveći dolet zrakoplov ostvaruje sa onom potrebnom snagom koja omogućuje najveći omjer uzgona i otpora [3].

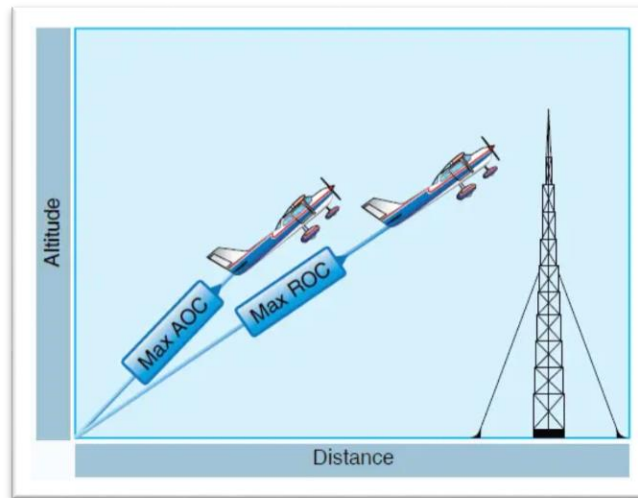


Slika 3 Graf potrebne snage u ovisnosti o brzini [4]

## 2.5 Režim penjanja

U režimu penjanja zrakoplov koristi višak snage koji mu omogućuje pozitivnu promjenu visine. Željenu visinu se može dostići penjući se najvećim kutom penjanja (*Best angle of climb-BAC*), što će rezultirati penjanjem na visinu pri najkraćoj horizontalnoj prijeđenoj udaljenosti, i najvećom brzinom uzdizanja (*Best rate of climb-BRC*) koja

omogućuje dostizanje željene visine u najkraćem vremenu što je grafički prikazano na slici 4 [3].

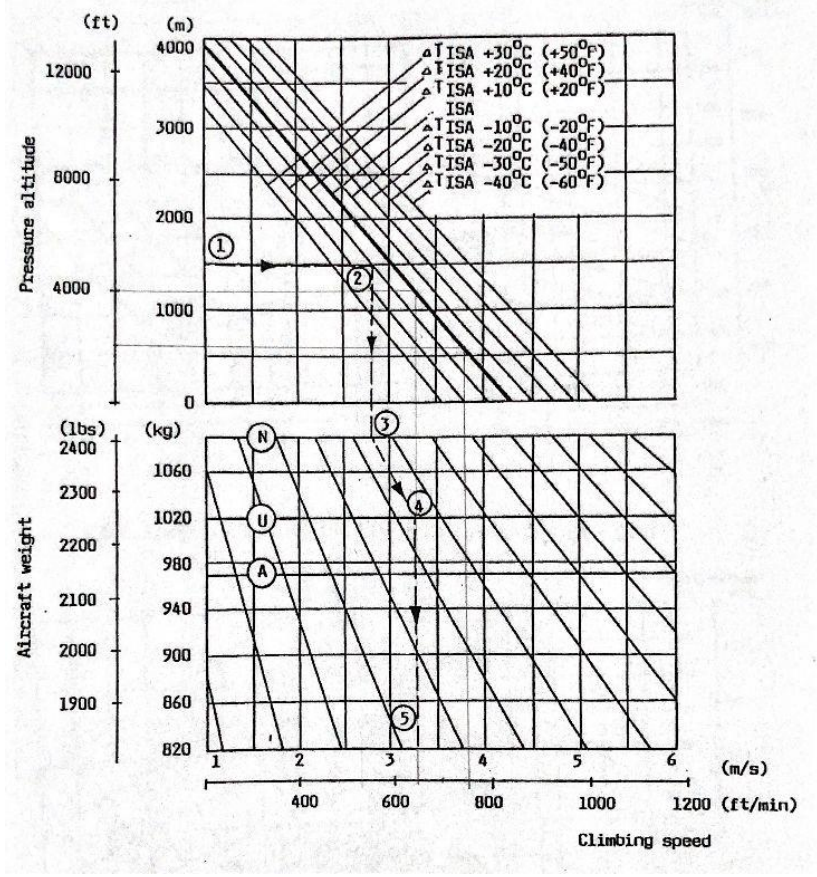


Slika 4 Prikaz  $BRC$  i  $BAC$  pri prijeđenoj udaljenosti [5]

Pri penjanju u uvjetu najvećeg kuta penjanja cilj je postići potrebnu visinu prelazeći minimalnu horizontalnu udaljenost. Koristi se u uvjetima kada je potrebno izbjeći prepreku na željenom pravcu leta kako bi se osiguralo sigurnosno nadvisivanje prepreka, a nadvisivanje prepreka pomoću maksimalnog kuta vidimo na slici 4. Potrebno je poznavati koja je vrijednost toga kuta kako povećavanje kuta ne bi rezultiralo slomom uzgona [3].

Pri penjanju u uvjetu najveće brzine uzdizanja cilj je što prije dostići željenu visinu.  $BRC$  je zapravo vertikalna komponenta vektora brzine, a razlika između  $BRC$  i  $BAC$  je u kombinaciji brzine i kuta penjanja te su te vrijednosti navedene u zrakoplovnom priručniku.

Promjena visine utječe i na performanse zrakoplova u režimu penjanja. Najveću brzinu uzdizanja će imati na visini razine mora, a s porastom će se smanjivati kako se smanjuje i raspoloživa snaga motora. Na slici 5 je prikaz grafa koji prikazuje smanjenje brzine uzdizanja s povećanjem visine za razmatrani zrakoplov.



Slika 5 Ovisnost brzine uzdizanja o promjeni visine [1]



### 3 Opis prognoziranih podataka o vjetru

Osim što se izračun performansi temelji na karakteristikama samog zrakoplova, on se također temelji na karakteristikama vanjskih čimbenika. Promjena atmosferskih uvjeta tijekom leta može doprinijeti performansama zrakoplova ili umanjiti njegove vrijednosti.

U zrakoplovstvu je izrazito bitno poznavati informacije o vjetru prije planiranog leta kako bi se osiguralo što sigurnije upravljanje zrakoplovom. Utjecaj vjetra rezultira povećavanjem ili smanjenjem putne brzine zrakoplova te bočnim odstupanjem od željene putanje leta. Utjecaj vjetra je potrebno uzeti u obzir u svim fazama leta, osobito tijekom polijetanja i slijetanja gdje se najčešće događaju sigurnosne ugroze [6].

U Hrvatskoj, meteorološka služba Crocontrol prikuplja podatke koje dalje prosljeđuje korisnicima zračnog prostora kako bi im se osigurali podaci o vremenskim uvjetima na koje će utjecati na njihov let. Mjerenja podataka se vrši na meteorološkim postajama u zračnim lukama u Osijeku, Zagrebu, Puli, Rijeci, Lošinj, Zadru, Splitu, Braču i Dubrovniku. Ti podaci su dostupni u sljedećim oblicima:

- METAR – izvještaj o trenutačnom meteorološkom stanju na zračnoj luci
- TAF – izvještaj koji sadrži meteorološku prognozu na zračnoj luci
- AIRMET I SIGMET – upozorenja za opasne meteorološke pojave
- GAFOR – prognoza meteoroloških uvjeta za vizualno letenje na ruti za manje zrakoplove pri manjim visinama
- SWL karta – grafički izvještaj o opasnim meteorološkim pojavama
- SWC i WIND karta – grafički izvještaj o prognoziranim vjetrovima na različitim visinama [7]

Pri izradi optimizacije ovog rada korišteni su podaci o vjetru dobivenih od odjela za meteorološkog istraživanje, razvoj i trening, Croatia Control. O tim podacima će biti više rečeno u petom poglavlju.

#### 3.1 Atmosferski utjecaji na performanse zrakoplova

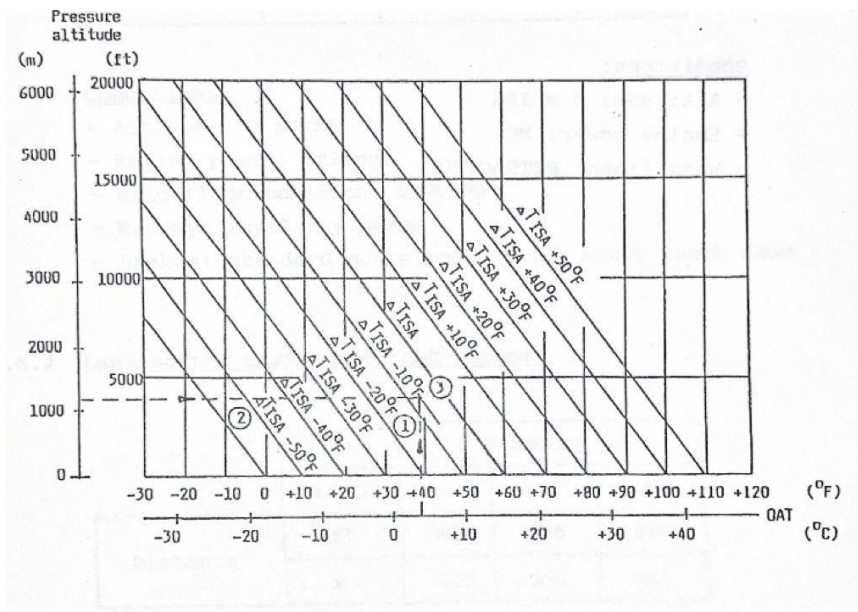
Kako bi se mogla odrediti visina i stvarna brzina leta zrakoplova potrebno je poznavati odnos između atmosferskih vrijednosti, odnosno odnos između tlaka, temperature i gustoće zraka. Budući da je atmosfera dinamički sustav čije se osobine konstantno mijenjaju te nije ju moguće matematički odrediti za svaku točku u svakom vremenu, definirana je međunarodna standardna atmosfera (ISA). Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO je standardom ISO 2533 definirala promjene osobina tlaka, gustoće, brzine zvuka, koeficijenta kinematičke viskoznosti i koeficijenta provođenja topline u ovisnosti o geometrijskoj ili geopotencijalnoj visini mjerenoj u odnosu na površinu mora [8]. Ona je uspostavljena da pruži zajedničku referencu za temperaturu i tlak, a sastoji se od tablica vrijednosti na različitim visinama te formula pomoću kojih se te vrijednosti izvedene. Tablica vrijednosti je prikazana na slici 6.

Te vrijednosti su određene s pretpostavkom da su vrijednosti tlaka, temperature i gustoće s promjenom visine konstantne te se temelje na utvrđenim meteorološkim promatranjima, teorijama i mjerenjima [6].

ALTITUDE (Feet)	TEMP. (°C)	PRESSURE			PRESSURE RATIO $\delta = P/P_0$	DENSITY $\sigma = \rho/\rho_0$	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	- 56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	- 56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	- 56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	- 56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	- 56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	- 54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	- 52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	- 50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	- 48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	- 46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	- 44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	- 42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	- 40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	- 38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	- 36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	- 34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	- 32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	- 30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	- 28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	- 26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	- 24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	- 22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	- 20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 486
17 000	- 18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	- 16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	- 14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	- 12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	- 10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	- 8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	- 6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	- 4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	- 2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	- 0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+ 1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+ 3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+ 5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+ 7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	305

Slika 6 ISA tablica vrijednosti [9]

Atmosferske vrijednosti tlaka, temperature i gustoće su usko povezane. S povećanjem visine opada tlak zraka, a time se smanjuje temperatura i gustoća zraka što se može vidjeti na slici broj 7. Smanjenje ovih vrijednosti dovodi i do smanjivanja performansi zrakoplova i obrnuto.



Slika 7 Promjena temperature o visini [1]

## 3.2 Vjetar

Vjetar nastaje kao posljedica nejednolikog zagrijavanja Zemljine površine što rezultira promjenom tlaka. Izjednačavanje tlakova rezultira kretanjem zračnih masa, odnosno pojavom vjetrova. Vjetrovi se razlikuju s obzirom na brzinu i smjer, vrijeme trajanja, veličinu područja iznad kojeg pušu [2].

Smjer vjetra se određuje u odnosu na geografski sjever te je prikazan kutnom vrijednošću od 001° do 360°, a određuje se za smjer otkuda dolazi. Smjer vjetra u odnosu na magnetski sjever se određuje i dostupan je samo za režime polijetanja i slijetanja zrakoplova.

### 3.2.1 Mjerenje jačine i smjera vjetra

Mjerenje vrijednosti vektorske veličine vjetra mora zadovoljavati propise Svjetske meteorološke organizacije (WMO). Za potrebe u zrakoplovstvu, mjerenje se vrši na visini od 6–10 metara u blizini točke dodira na uzletno-sletnoj stazi. Ukoliko na zračnoj luci postoje više uzletno-sletnih staza, mjerenja se vrše na svakoj od njih [7].

Jakost vjetra se može mjeriti bez potrebe korištenja instrumenata pomoću Beaufortove ljestvice. Jačina vjetra se ocjenjuje prema njegovim učincima na okolinu, a ovisno o djelovanju vjetra se određuje jačina vjetra prema vrijednostima prikazanih u tablici broj 4. Njegova jačina se mjeri po formuli 4:

$$V = 0,836 \times Bf^{\frac{3}{2}} \quad [4]$$

gdje je:

- V-brzina vjetra na 10 metara iznad površine zemlje
- Bf-broj iz Beaufortove ljestvice

Tablica 4 Jakost vjetra i pripadajuće vrijednosti [7]

Jakost vjetra	Beaufortova ljestvica	Vrijednost u čvorovima
Slab	2,3	$v \leq 10$
Umjeren	4,5	$11 \leq v \leq 17$
Jak	6,7	$18 \leq v \leq 32$
Olujan	8,9,10,11	$33 \leq v \leq 65$
Orkanski	12,13,14	$65 < v$

Mjerenje vjetra pomoću Beaufortove ljestvice se u meteorologiji gotovo i ne primjenjuje zbog subjektivnosti pri određivanju jačine vjetra.

Mjerenje jačine i smjera vjetra se vrši pomoću anemometra, anemografa i vjetrovne mjerne stacije.

a) Mjerenje vjetra pomoću anemometra

Anemometar je instrument koji određuje samo brzine ili brzine i smjer vjetra. Postoje više vrsta tog instrumenta kao što su:

1) Anemometar s polukuglama

- Sastoji se od 3 ili 4 šuplje polukugle koje su pričvršćene na zajedničku osovinu i vjetrovne prikazanih na slici 8
- Mjerenje brzine se vrši na temelju mjerenja broja okretaja osovine čija se vrijednost mehanički ili električnim putem prenosi na prikaznik



Slika 8 Anemometar sa polukuglama [10]

2) Anemometar sa propelerom

- Sastoji se od propelera usmjeren vjetrovnom okomito na smjer vjetra te je njegov izgled prikazan na slici 9
- Jačina vjetra određuje se vrtnjom propelera kojeg pokreće generator električne struje čija je vrijednost proporcionalna vrijednosti brzine vjetra



*Slika 9 Anemometar sa propelerom [11]*

### 3) Termoanemometar

- Mjeri promjenu temperature koja je proporcionalna promjeni vjetra
- Koristi se za trenutne promjene brzine strujanja
- Prikazan je na slici 10



*Slika 10 Termoamenometar [11]*

### 4) Ultrazvučni anemometar

- Mjerenja vrši na principu mjerenja promjene vremena pri odašiljanju i prijama ultrazvučnih valova te je prikazan na slici 11
- Brzina vjetra smanjuje, odnosno povećava ultrazvučni impuls ovisno iz smjera kojeg vjetar puše



Slika 11 Ultrazvučni anemometar [12]

5) Ručni anemometar

- Služi za mjerenje brzine vjetra do 2 metra iznad zemlje

6) Anemometar na tlak

- Sastoji se od Pitot cijevi koja se koristi za utvrđivanje relativne brzine vjetra iz dinamičkog tlaka koja je proporcionalna kvadratu brzine
- Koristi se za mjerenja veliki brzina

b) Mjerenja vjetra pomoću anemografa

Anemograf je instrument koji osim mjerenja brzine i smjera vjetra također bilježi navedene vrijednosti. Sastoji se od prijemnog i registrirajućeg dijela. Prijemni dio čini manemogram pomoću kojeg prima podatke o vjetru, a registrirajući dio se sastoji od sklopa koji omogućuje zapisivanje izmjerenih vrijednosti.

c) Mjerenje vjetra pomoću vjetrulje

Vjetrulje su konusne tekstilne cijevi koje se napuhuju ovisno o jačini vjetra prikazane na slici 12. Ona rotira oko vertikalne osi te tako prikazuje smjer vjetra. Ovisno koliko se vjetrulja napuhne se vizualno može odrediti smjer i jačina vjetra. Sastoji se od isprekidanih narančasto bijelih polja. Napuhnutost svakog polja prikazuje vrijednost od 3 čvora, a najveću vrijednost brzine koju može prikazati je 15 čvorova [7].

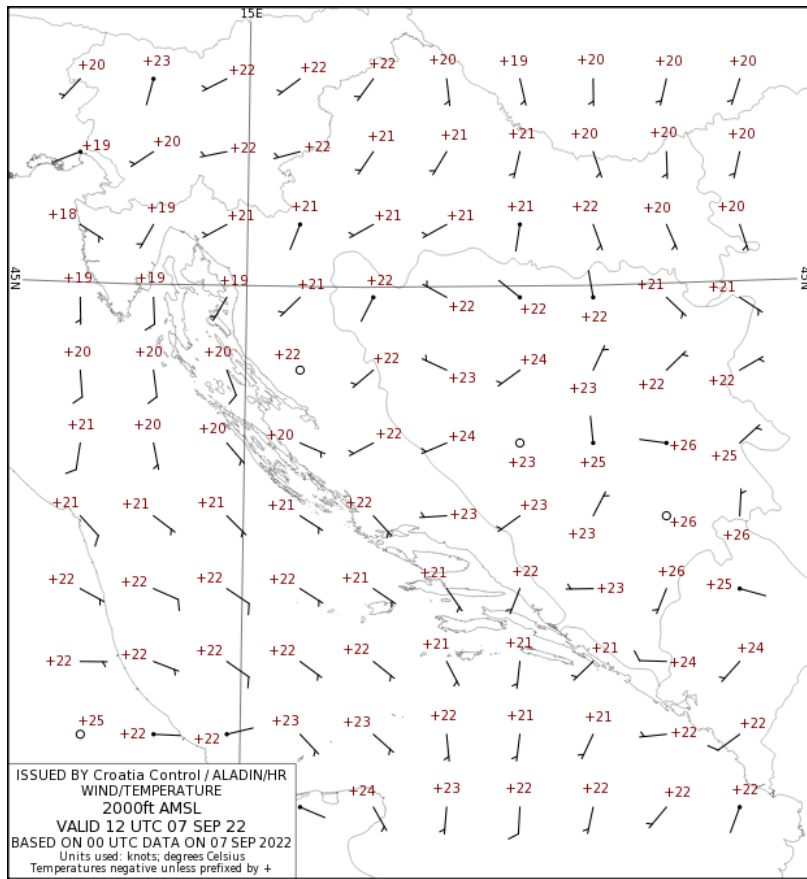


*Slika 12 Vjetrulja [13]*

### 3.2.2 Načini prikaza podataka o vjetru

Grafički prikaz prognoziranih podataka o vjetru korisnicima zračnog prostora je dostupan u obliku SWC karte koja predstavlja smjer i jačinu vjetra, a predstavljen je pomoću slike 13. Podaci na kartama mogu različito biti predstavljeni pomoću:

- Zastavice
  - Usmjerene tako da prikazuju smjer vjetra
  - Sadrže oznake koje daju vrijednost jačine vjetra (mala kosa crta označuje 5 kt, jedna okomita crta 10 kt, jedna dulja i jedna kraća okomita crta označava 15kt, dvije okomite duge crte 20 kt, a trokut označava 50 kt)
- Strelice
- Izotahe
  - Crte koje povezuju iste vrijednosti jačine vjetra
- Izogone
  - Crte koje povezuju vrijednosti vjetra istog smjera
- Strujnice
  - Prikazuje gibanje smjera vjetra pomoću tangente na putanju
- Putanje
  - Linije koje prikazuju gibanje zraka



Slika 13 SWC karta s predviđenim podacima o vjetru [14]



## 4 Postupak izračuna horizontalnog plana leta

Tijekom planiranja i izrade plana leta trebaju se uzeti u obzir brojni zahtjevi kako bi odabrana ruta leta osigurala najkraće trajanje leta uz što manju potrošnju. Uz smanjenje troškova odabir rute mora zadovoljiti sigurno vođenje vizualne navigacije pri letenju u vizualnim uvjetima te neometano korištenje radionavigacijskih sredstava pri letu u instrumentalnim uvjetima.

Nakon odabira rute, potrebno je odrediti visinu krstarenja. Visina se određuje s obzirom na reljef iznad kojeg se planira let, meteorološke pojave na tom području, najnižu potrošnju goriva te s obzirom na najkraće vrijeme trajanja leta. Pri određivanju visine ne mogu se zadovoljiti svi navedeni uvjeti te se prednost daje onima koji daju najpoželjnije rezultate ovisno o određenoj situaciji. Kako se ne bi narušila sigurnost letenja, propisane su minimalne visine koje su utvrđene od strane države ispod koje zrakoplov ne smije letjeti.

Kako bi se u režimu krstarenja troškovi leta sveli na minimum potrebno je postaviti snagu motora koja će na određenoj visini osigurati najbolje performanse za željene uvjete. Kod razmatranog zrakoplova Zlin 242 L postavka snage na 65% maksimalne kontinuirane osigurava taj uvjet.

### 4.1 Utjecaj meteoroloških uvjeta na planiranje leta

Zadaća svakog korisnika zračnog prostora je proučavanje meteorološkog stanja atmosfere na svakom području leta. Ukoliko meteorološka situacija narušava sigurnost letenja vrši se analiza te odlučuje o potencijalnoj izmjeni rute i profila leta. Analiza meteorološke situacije se mora vršiti prije leta te za vrijeme leta .

U prijetnoj analizi se prikupljaju informacije o trenutnim i prognoziranim vremenskim uvjetima na području planirane rute, aerodromima polijetanja i slijetanja te na području alternativnog aerodroma. Način na koji su te informacije dostupne je objašnjeno i prikazano u trećem poglavlju ovog rada. Cilj prijetne obrade tih informacija je uočavanje utjecaja meteoroloških uvjeta na let te planiranje alternativnih ruta i aerodroma za slijetanje ukoliko se uvjeti pogoršaju do te mjere da postoji mogućnost sigurnosne ugroze leta [15].

Osim prijetne analize, meteorološko stanje se može obraditi i tijekom samog leta ukoliko postoji potreba za tim zbog brze promjene vremena ili dužeg trajanja leta. Pilotima su dostupne informacije putem radio veze, a od njega se očekuje da zna prepoznati i usporediti stvarno meteorološko stanje sa onim predviđenim i dobivenim putem radioveze.

Nakon prikupljanja informacija potrebno je odrediti kakav utjecaj meteorološko stanje ima na provedbu samog leta te kako postupiti s obzirom na njih. Jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na provedbu leta je vjetar. Nakon što se prikupi informacija smjera i

jačine potrebno je odrediti kako će on utjecati na performanse zrakoplova, a na toj problematici se bazira ovaj rad. Kako bi odredili učinak vjetra na brzinu zrakoplova i putanju potrebno je još definirati brzine zrakoplova, što je objašnjeno u idućem poglavlju.

## 4.2 Brzina leta zrakoplova

Piloti pri upravljanju zrakoplovom koriste različite vrste brzina zbog varijacija koje nastaju pri određivanju brzine leta i pri mjerenju iste. U zrakoplovstvu su zbog toga definirane instrumentalna, indicirana, kalibrirana, ekvivalentna, stvarna i putna brzina [15].

Instrumentalna brzina se odnosi na brzinu koju prikazuje instrument. Ona nije korigirana za greške koje nastaju zbog položaja pitot-statičkog sustava i grešku instrumenta.

Indicirana brzina je brzina koju prikazuje instrument koja je korigirana za grešku koja nastaje u samom sklopu unutar instrumenta.

Kalibrirana brzina je brzina koja je korigirana za grešku položaja pitot-statičkog sustava. U standardnoj atmosferi na razini mora biti će jednaka stvarnoj brzini zrakoplova.

Ekvivalentna brzina je jednaka korigiranoj kalibriranoj brzini za utjecaj stlačivosti zraka zbog visine na kojoj zrakoplov leti.

Kada se na ekvivalentnoj brzini izvrši korekcija zbog promjene gustoće zraka tada se dobiva stvarna brzina leta zrakoplova. Ona se odnosi na kretanje zrakoplova u odnosu na zemlju u idealnim uvjetima bez vjetra.

Ako se doda utjecaj jačine vjetra na putanju zrakoplova na stvarnu brzinu, tada će vrijednost brzine biti definirana kao putna brzina. Ovisno o smjeru vjetra i putanje leta zrakoplova, putna brzina će biti uvećana ili umanjena za komponentu brzine vjetra [15].

## 4.3 Utjecaj vjetra na brzinu i putanju leta

Gibanje zrakoplova je rezultat njegove vučne sile te brzina njegovog kretanja kroz zrak je stvarna brzina leta. Pošto se stanje atmosfere konstantno mijenja, tako će se mijenjati i njegova brzina u odnosu na zemlju, odnosno njegova putna brzina. Kao što je i kretanje zrakoplova definirano smjerom i brzinom, tako je i definirano kretanje vjetra. Smjer kretanja zrakoplova i smjer kretanja vjetra je određen u odnosu na pravi sjever.

Postoji više načina kako da se odredi utjecaj na brzinu i putanju leta preko čega pilot u konačnici može primijeniti potrebnu korekciju, a to su grafička metoda, trigonometrijska metoda i izračun napamet. Grafička metoda podrazumijeva crtanje utjecaja vjetra u mjerilu na navigacijsku kartu, no zbog ograničavajućeg prostora pilotske kabine, nije prikladna pri određivanju korekcije. Trigonometrijska metoda se temelji na poznavanju odnosa stranica i kutova te takav način određivanja korekcije je najtočniji, ali zahtijeva rješavanje brojnih

sinusoidnih proračuna što povećava radno opterećenje na pilota [15]. Najlakši način određivanja utjecaja vjetra i korekcije je izračun napamet. Takav izračun ubrzava proračune zbog njegove jednostavnosti i unaprijed poznatih vrijednosti te se zbog toga najčešće koristi. U ovom radu optimizacija se temelji na metodi izračuna napamet.

#### 4.4 Metoda izračuna utjecaja vjetra napamet

Kako bi se odredio utjecaj na koji vjetar vrši na zrakoplov potrebno je rastaviti njegovu vrijednost na komponente koje će imati izravan utjecaj na putanju i na brzinu, a to su uzdužna ( $u_{uzd}$ ) i bočna komponenta vjetra ( $u_{pop}$ ). Rastavljanje vektora možemo opisati korištenjem trigonometrijskih funkcija te su prikazane formulama 4 i 5 gdje  $\beta$  označuje upadni kut vjetra.

$$u_{pop} = u \sin \beta \quad [2]$$

$$u_{uzd} = u \cos \beta \quad [3]$$

Uzdužna komponenta vjetra će utjecati na putnu brzinu leta zrakoplova. Ako je kretanje vjetra usmjereno u pravcu leta, putna brzina će biti veća za vrijednost te komponente, a ako je kretanje vjetra suprotno usmjereno letu zrakoplova, putna brzina će se smanjiti za vrijednost te komponente te putnu brzinu možemo prikazati formulom 6 [15].

$$GS = TAS \pm u_{uzd} \quad [4]$$

Bočna komponenta će uzrokovati odstupanje od željene putanje leta a to odstupanje je definirano kutom zanošenja. Kut zanošenja je kut između željene putanje leta i one stvarne u odnosu na zemlju, a izračun kuta ispravke za korekciju bočne komponente vjetra je predstavljen formulom (7):

$$\alpha_1 = \frac{u_{pop}}{v} \times 60 \quad [7]$$

#### 4.5 Izračun vremena i potrošnje goriva u režimu horizontalnog leta

Kao što je ranije navedeno, vjetar uvelike može pripomoći pri optimizaciji leta te je zato potrebno poznavati meteorološku situaciju kako bi mogli prilagoditi rutu koja bi omogućila smanjeno vrijeme trajanja leta te smanjenu potrošnju.

Kako bi odredili vrijeme trajanja i potrošnju goriva u režimu horizontalnog leta i u konačnici optimizirali isto, pri izračunima su korištene vrijednosti performansi razmatranog zrakoplova predstavljene u tablici 5 koje su dostupne u Priručniku letenja Zlin 242L. Za izračun vremena potrebno je podijeliti prijeđenu udaljenost u tom režimu sa stvarnom brzinom što je prikazano izrazom :

$$t = \frac{S[NM]}{TAS} \quad [5]$$

Pri određivanju količine potrošenog goriva pri optimizaciji je korišten izraz (9) gdje *SFC* označava specifičnu potrošnju motora.

$$Fuel\ used = \frac{SFC}{t} \quad [9]$$

Nakon što prognozirani podaci o vjetru postanu dostupni tada možemo optimizirati rutu ovisno o tome želimo li smanjiti vrijeme trajanja leta ili smanjiti potrošnju goriva na minimalnu vrijednost. Ovisno o smjeru i jačini vjetrova, možemo odabrati rutu na kojoj su povoljniji utjecaji vjetra što će u konačnici rezultirati optimizacijom željenog leta. Ukoliko postoji leđna komponenta vjetra, za istu stvarnu brzinu zrakoplova u istom vremenskom intervalu u odnosu bez vjetra, zrakoplov će prijeći veću udaljenost i time će potrošiti manje goriva te u konačnici vrijeme trajanja leta će biti manje. Isto vrijedi i za čeonu komponentu, odnosno ukoliko promjena rute omogućuje let iznad prostora sa slabijom jačinom vjetra, pri optimizaciji odabrat će se ona ruta koja će rezultirati najpovoljnijim uvjetima. U idućem poglavlju će detaljnije biti opisana optimizacija.

Tablica 5 Performanse zrakoplova Zlin 242L u režimu horizontalnog leta [1]

Broj okretaja	Potrošnja	Korisno gorivo	Istrajnost	Visina					
				0 ft		1500 ft		6500ft	
				TAS	Dolet	TAS	Dolet	TAS	Dolet
RPM	l/h	l	h	kn	NM	Kn	NM	kn	NM
2700	61	116	3:12	125	398	124	396	122	389
2450	46.5		4:11	112	468	114	479	120	504
2350	36		5:25	95	514	97	526	105	570

## 5 Algoritam optimizacije plana leta

### 5.1 Meteorološki podaci

U planu leta tijekom planiranja rute se utjecaji vjetra mogu uzeti u obzir kada prognozirani podaci budu dostupni. U ovom radu prognozirani podaci su dobiveni od odjela za meteorološkog istraživanje, razvoj i trening, Croatia Control. Dobiveni podaci su predstavljeni sa „u“ i „v“ komponentima vjetra sa pripadajućim koordinatnim točkama gdje je „u“ vektorska veličina vjetra s obzirom na os-x, a „v“ komponenta vektorska veličina s obzirom na os-y što je prikazano na slici 14. Vektorskim zbrojem komponenti vjetra dobivena je jačina vjetra opisano pomoću jednadžbe 10.

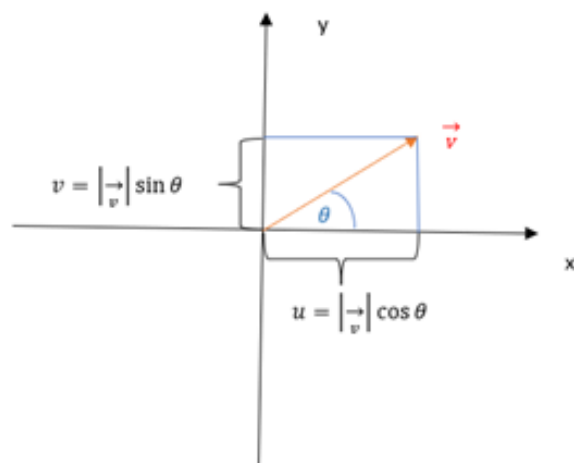
$$|V| = v^2 + u^2 \quad [10]$$

Iz razloga što su komponente vjetra dane u odnosu na matematički koordinatni sustav, potrebno je vrijednosti kuta preračunati za navigacijski koordinatni sustav iz razloga što se u matematičkom kut mjeri u smjeru suprotno od kazaljke na satu u odnosu na x-os, a navigacijski mjeri kut u smjeru kazaljke na satu u odnosu na y-os, odnosno na sjever. Kut koji predstavlja smjer vjetra u matematičkom koordinatnom sustavu se računa pomoću jednadžbe 11, zatim se preračunava za navigacijski pomoću jednadžbe 12.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v}{u} \quad [11]$$

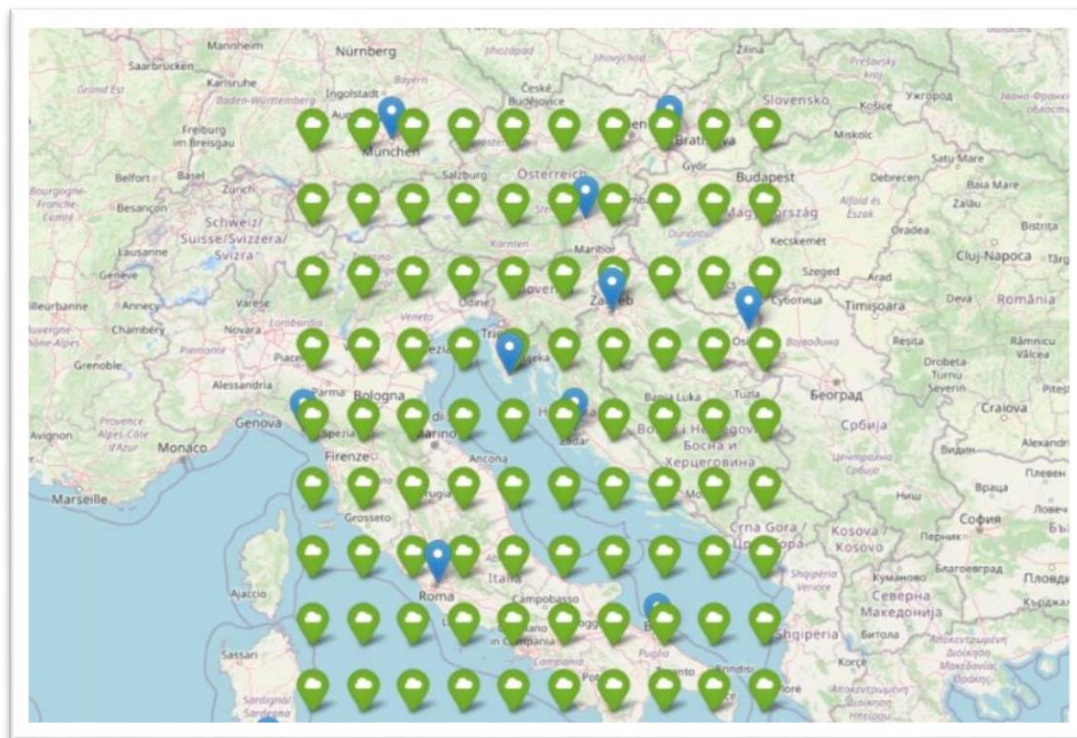
$$\theta_{nav} = -\left(\theta \times \frac{\pi}{180}\right) + 90 \quad [12]$$

Ukoliko je vrijednost  $\theta_{nav}$  veći od 360, tada se rezultat mora oduzeti za vrijednost 360, a ukoliko je vrijednost veća od 360, onda se vrijednost kuta mora umanjiti za tu vrijednost. Konačni rezultat predstavlja smjer vjetra



Slika 14 Vektor vjetra prikazan pomoću u i v komponente

Pomoću pripadajućih koordinata pozicije vjetrova su postavljene na geografsku kartu prikazanim sa zelenim ikonama na slici 15.



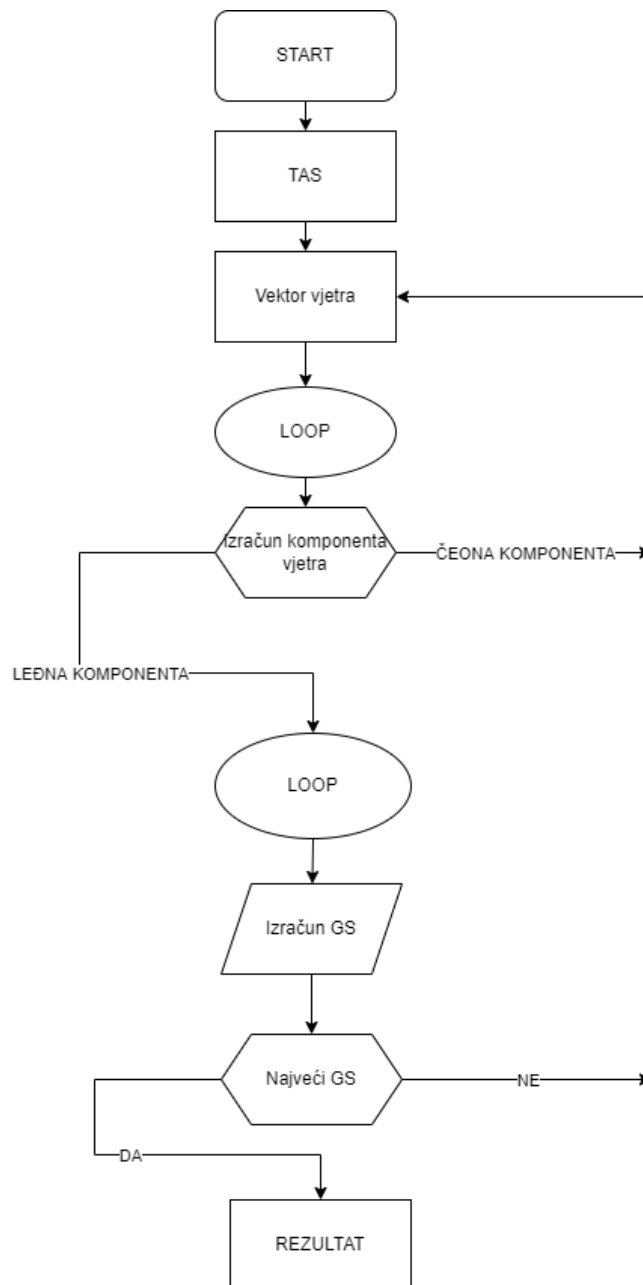
Slika 15 Prikaz prognoziranih podataka vjetra

## 5.2 A\* algoritam

A\* algoritam je jednostavan i učinkovit algoritam pretraživanja koji se koristi za pronalaženje najkraćeg puta između početne i krajnje točke. Nastao je u sklopu projekta Shakey koji je imao za cilj izraditi robota koji bi mogao planirati vlastite radnje [16]. Osim A\*, postoje i drugi algoritmi koji se temelje na potrazi najkraćeg puta kao što su Dijkstra, Bellman-Ford, Floyd-Warshall, Dantzig te druge. Dijkstra algoritam za razliku od ostalih navedenih daje bolje rezultate pri određivanju najkraćeg puta, a A\* algoritam je zapravo proširena verzija Dijkstra algoritma [17]. Osim što ima mogućnost pronalaska najkraćeg puta, A\* pomoću dodatnih unesenih vrijednosti može pronaći ishod s najmanjim troškovima. Odnosno algoritam određuje put koji osigurava najmanje troškove uzimajući u obzir prijedenu udaljenost te proteklo vrijeme [16]. Zbog rezultata koje algoritam pruža je algoritam korišten pri optimizaciji u ovome radu.

Ključni unos algoritma za optimizaciju plana leta je izračun putne brzine leta zrakoplova koja određuje optimalnu putanju na zadanoj ruti. Optimizirana ruta može rezultirati dužom prijedenom udaljenošću, no zbog povoljnijih vjetrova duža ruta je zbog manje potrošnje goriva isplativija u odnosu na prijedeni put.

Algoritam je napravljen pomoću A\* algoritma koji se temelji na traženju najboljeg puta u određenom prostoru. Načelo rada algoritma je pronalaženje optimalnog cilja od početnog čvora, što je u ovom radu unos početnog aerodroma, do krajnjeg, odnosno do ciljnog aerodroma. A\* algoritam koristeći koncept prioritetnog reda određuje preko zadane funkcije koja će od idućih dostupnih čvorišta imati najveću vrijednost te nakon uspoređivanja ostalih vrijednosti prelazi na onu s najvećom. U radu čvorište je prikazano s pripadajućom vrijednošću vjetra. Za pretraživanje optimalnog puta u prostoru algoritam koristi dvije liste za praćenje prijedениh čvorišta, a to su otvorena i zatvorena. Otvorena lista prati trenutne čvorove dostupne za obilazak, a zatvorena prati one koje nisu zadovoljile uvjet [17]. Vizualni prikaz izrađenog programa pomoću A\* algoritma je prikazan na slici 16 gdje je unos „start“ početni čvor (na početku predstavlja unos aerodroma), a „rezultat“ prikazuje idući optimalan čvor. Pretraga se vrši sve dok se ne dođe do krajnjeg čvora, odnosno do ciljnog aerodroma.



Slika 16 Dijagram toka

Algoritam je napravljen da traži u svakom čvorištu najveću vrijednost putne brzine kako bi pretražio optimalan put do odredišta. Prvi unos u algoritam je stvarna brzina leta zrakoplova, zatim su unesene vrijednosti prognoziranih podataka o vjetru. Nakon toga u program se unosi početna te zadnja točka pri čemu se određuje utjecaj upadnog kuta vjetra. Određivanje utjecaja se vrši po formulama 5 i 6 koje su navedene u petom poglavlju. Kada se odredi utjecaj i komponenta vjetra, algoritam komponentu čeonog vjetra na čvoru prepoznaje kao prepreku te traži čvor koji ima vrijednost leđnog vjetra. Ukoliko idući promatrani čvor ima vrijednost čeonog vjetra, pomoću loop operacije algoritam se vraća na zadnji odabrani te traži drugi čvor. Ukoliko nema dostupnog čvora s vrijednošću leđnog vjetra, algoritam će pretražiti onaj koji ima najmanju vrijednost čeonog. Idući uvjet je pretraživanje optimalnog čvora pretražujući onog koji ima najveću vrijednost putne brzine. Nakon što ga pronade



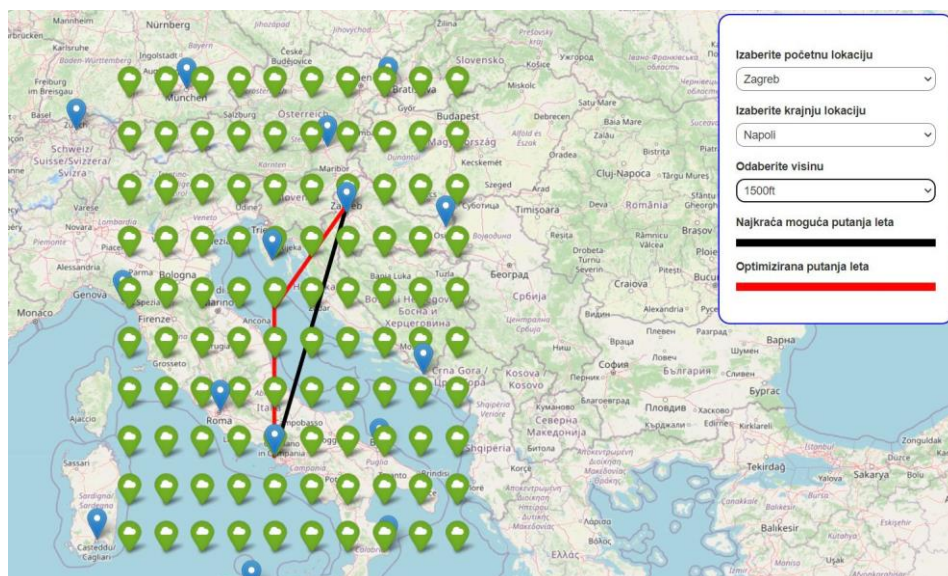
prelazi na taj čvor zatim ponovno vrši pretragu od ponovnog određivanja komponente vjetra sve dok ne dođe do krajnjeg cilja odnosno do odredišnog aerodroma.

## 6 Rezultati optimizacije plana leta

Za izradu ovog programa korištene su vrijednosti prikazane u tablici 5. Korištene su vrijednosti s postavkom snage motora od 65% maksimalno kontinuirane iz razloga što ta postavka snage osigurava performanse zrakoplova s najboljom ekonomskom isplativošću. Pri optimizaciji je obrađen horizontalni let na visinama od 1500 ft te 6500 ft od zračne luke Zagreb do zračne luke Napulj. Kako bi se mogao vidjeti kako bi vjetar utjecao da se okrene smjer leta, napravljene su dodatne optimizacije od zračne luke Napulj do zračne luke Zagreb.

### 6.1 Zagreb-Napulj visina 1500 ft

Pri izravnom letu od zračne luke Zagreb do Napulja na visini od 1500 ft, zrakoplov bi prešao udaljenost od 307 nautičkih milja u vremenu trajanja leta od 2 sata i 59 minuta. Tijekom tog leta bi potrošio 107.3 lb. Rezultat optimizacije je duža putanja duljine 319 nautičkih milja. Vrijeme trajanja leta na toj ruti bi iznosilo 2 sata i 56 minuta s potrošnjom goriva 106.3 lb što smanjuje potrošnju u odnosu na izravni let bez optimizacije za 1lb te skraćuje vrijeme trajanja etape za 3 minute. Prikaz najkraće i optimizirane putanje se nalazi na slici 17.

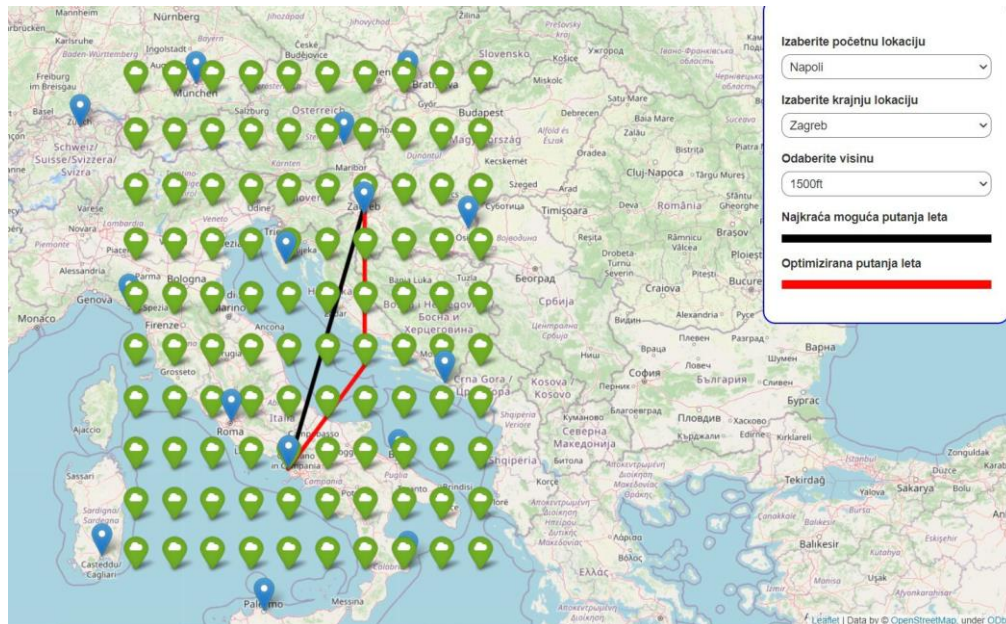


Slika 17 Zagreb-Napulj 1500 ft

### 6.2 Napulj-Zagreb 1500 ft

Pri izravnom letu od zračne luke Napulj do Zagreba na visini od 1500 ft, zrakoplov bi prešao udaljenost od 307 nautičkih milja u vremenu trajanja leta od 3 sata i 13 minuta. Tijekom tog leta bi potrošio 115.56 lb. Rezultat optimizacije je duža putanja duljine 318

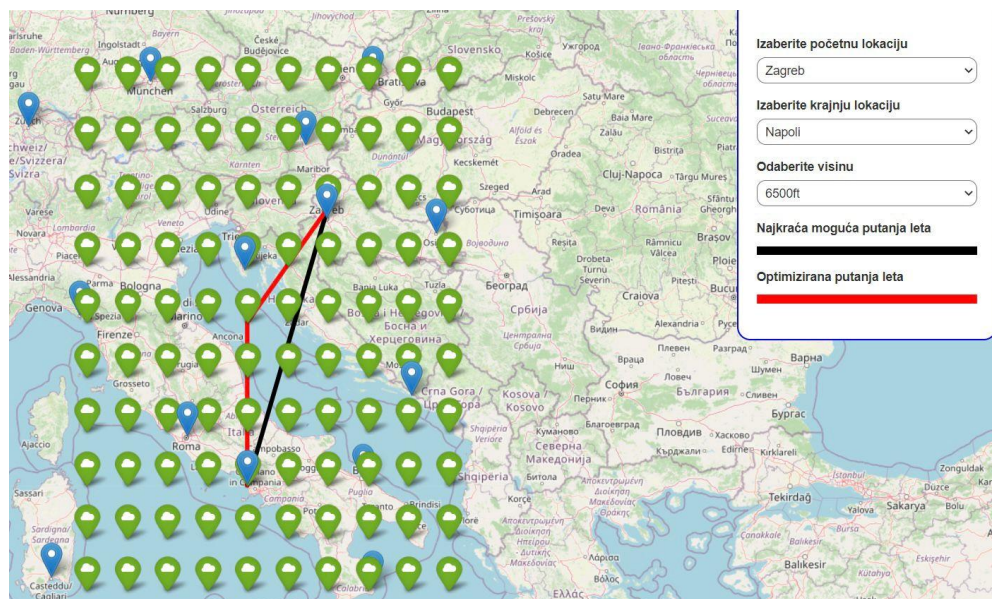
nautičkih milja. Vrijeme trajanja leta na toj ruti bi iznosilo 3 sata i 11 minuta s potrošnjom goriva 114.48 lb što smanjuje potrošnju u odnosu na izravni let bez optimizacije za 1.08 lb te skraćuje vrijeme trajanja etape za 2 minute, a putanje su prikazane na slici 18.



Slika 18 Napulj-Zagreb 1500 ft

### 6.3 Zagreb- Napulj 6500 ft

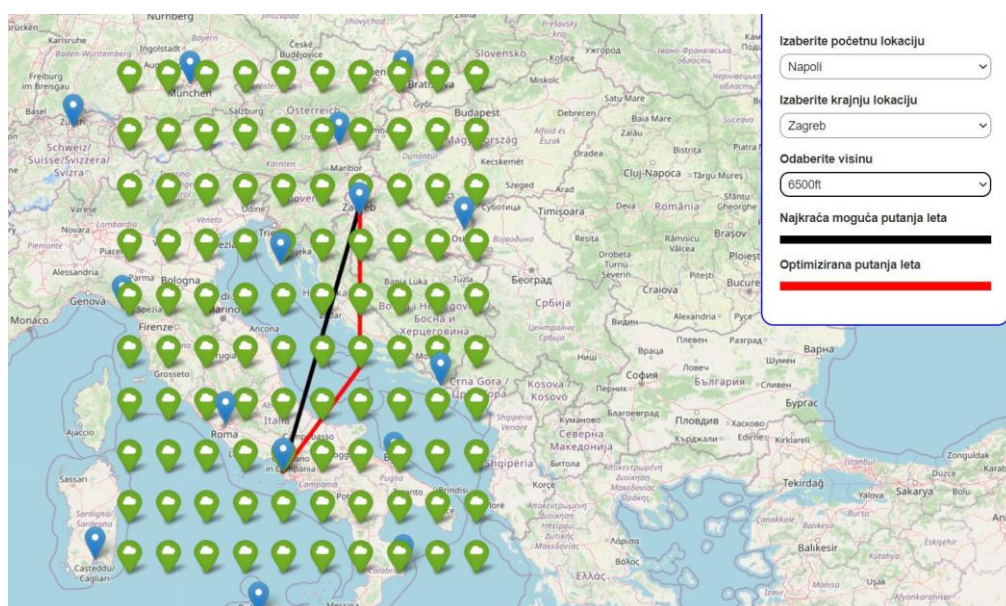
Pri izravnom letu od zračne luke Napulj do Zagreba na visini od 6500 ft, zrakoplov bi prešao udaljenost od 307 nautičkih milja u vremenu trajanja leta od 3 sata i 10 minuta. Tijekom tog leta bi potrošio 113.94 lb. Rezultat optimizacije je duža putanja duljine 319 nautičkih milja. Vrijeme trajanja leta na toj ruti bi iznosilo 3 sata i 7 minuta s potrošnjom goriva 112.59 lb što smanjuje potrošnju u odnosu na izravni let bez optimizacije za 1.53 lb te skraćuje vrijeme trajanja etape za 3 minute. Prikaz izravne putanje i optimizirane se nalazi na slici 19.



Slika 19 Zagreb-Napulj 6500ft

## 6.4 Napulj-Zagreb 6500 ft

Pri izravnom letu od zračne luke Napulj do Zagreba na visini od 6500 ft, zrakoplov bi prešao udaljenost od 307 nautičkih milja u vremenu trajanja leta od 2 sata i 46 minuta. Tijekom tog leta bi potrošio 99.72 lb. Rezultat optimizacije je duža putanja duljine 318 nautičkih milja. Vrijeme trajanja leta na toj ruti bi iznosilo 2 sata i 45 minuta s potrošnjom goriva 98.9 lb što smanjuje potrošnju u odnosu na izravni let bez optimizacije za 0.82 lb te skraćuje vrijeme trajanja etape za 1 minutu. Izravna i optimizirana ruta je prikazana na slici 20.



Slika 20 Napulj-Zagreb 6500 ft

## 6.5 Analiza

Tablica 6 Prikaz rezultata na visini 1500 ft

	1500 ft			
	ZAGREB-NAPULJ		NAPULJ-ZAGREB	
Ruta	Izravna	Optimizirana	Izravna	Optimizirana
Prijeđena udaljenost	307 NM	319 NM	307 NM	318 NM
Vrijeme trajanja leta	2 h i 59 min	2 h i 56 min	3 h i 13 min	3 h i 11 min
Potrošeno gorivo	107.3 lb	106.3 lb	115.56 lb	114.48 lb

Prema vrijednostima u tablici 6 rezultati optimiziranih ruta prikazuju uštedu potrošenog goriva te skraćeno trajanje leta iako zrakoplov na toj putanji prelazi veću udaljenost. Pri letu od Zagreba do Napulja vrijeme leta je skraćeno za 3 minute te vrijednost uštede goriva je 1 lb, dok u suprotnom smjeru, od Napulja do Zagreba trajanje leta je skraćeno za 2 minute, a vrijednost potrošenog goriva je smanjena za 1.08 lb.

Tablica 7 Prikaz rezultata na visini 6500 ft

	6500 ft			
	ZAGREB-NAPULJ		NAPULJ-ZAGREB	
Ruta	Izravna	Optimizirana	Izravna	Optimizirana
Prijeđena udaljenost	307NM	319 NM	307 NM	318 NM
Vrijeme trajanja leta	3 h i 10 min	3 h i 7 min	2 h i 46 min	2 h i 45 min
Potrošeno gorivo	113.94 lb	112.59 lb	99.72 lb	98.9 lb

Kao što je prikazano u tablici 7, optimalna putanja leta neće biti jednaka najkraćoj putanji. Unatoč većoj vrijednosti prijeđenog puta pri letu od Zagreba do Napulja na optimiziranoj putanji je vrijeme trajanja leta smanjeno za 3 minute, a vrijednost potrošenog goriva za 1.53 lb. Pri letu u suprotnom smjeru, odnosno od Napulja do Zagreba, vrijednost trajanje leta je skraćeno za 1 minutu, a vrijednost potrošenog goriva je za 0.82 lb manja od izravne putanje.

## 7 Zaključak

Optimizacija putanje leta zrakoplova predstavlja složen proces pri određivanju iste zbog brojnih zahtjeva koje ograničavaju let na željenoj putanji leta. Osim restrikcija, let može biti ograničen i performansama zrakoplova. Važan aspekt pri određivanju povoljnije rute je smanjenje troškova bez ugrožavanja sigurnosti. Postoje brojni načini smanjenja troškova, a ovaj rad se bazirao na iskorištavanju povoljnih vjetrova unutar troposfere.

Zbog utjecaja povoljnih vjetrova vrijeme trajanja leta se može smanjiti zajedno s potrošnjom goriva što uvelike doprinosi smanjenju operativnih troškova. Pomoću A\* algoritma dokazano je da najkraća putanja leta ne mora biti i ona najpovoljnija. Na primjeru rute od Zagreba do Napulja te od Napulja do Zagreba vidi se razlika u duljini između optimiziranih putanja i onih direktnih, no iako su optimizirane putanje duže, one daju bolje rezultate pri potrošnji goriva te u trajanju leta.

Pri letovima na većim visinama i dužim etapama leta optimizacija s prognoziranim podacima leta može zrakoplovnim kompanijama uštedjeti brojne količine goriva bez negativnih utjecaja na usluge te rasporede. Kako bi se olakšalo optimiziranje leta, zrakoplovne kompanije koriste razne programe pri potrazi najpovoljnije rute te korištenje takvih algoritama omogućuje smanjenje radnog opterećenja na zrakoplovno osoblje.

Naredni koraci za razvoj algoritma u svrhu povećanja uštede bili bi uvođenje pretraga vjetrova na različitim visinama. Ovime bi algoritam bio u mogućnosti odrediti penjanje ili spuštanje kako bi se let vršio pri boljim uvjetima vjetra.

## Reference

- [1] Moravan aviation, »Z 242 L Flight Manual,« Moravan Aviation Ltd, Otrokovice, 1994.
- [2] Textron Lyoming Aircraft Engines, Operators manual, Pennsylvania: Textron Lycoming, 1974.
- [3] J. D. Anderson, Introduction to Flight, New York: McGraw Hill, 2005.
- [4] Code 7700, *Code 7700*.
- [5] »Flightlitteracy,« [Mrežno]. Available: <https://www.flightlitteracy.com/aircraft-performance-climb-performance/>. [Pokušaj pristupa 22 8 2022].
- [6] Nordian, Meteorolgy, Nordian AS, 2006.
- [7] T. Vlasta, Zrakoplovna meteorologija, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 1997.
- [8] P. Kesić, Osnove aerodinamike, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.
- [9] Airbus, *Getting to Grips with Aircraft Performance*, Blagnac: Airbus Industrie, 2000.
- [10] »quora,« [Mrežno]. Available: <https://www.quora.com/What-is-the-importance-of-a-anemometer.>
- [11] »The University of British Columbia,« [Mrežno]. Available: <https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob204/images/lab1/Pages/5.html>.
- [12] »Puntomariner,« [Mrežno]. Available: <https://hr.puntomariner.com/instrument-for-measuring-wind-speed/>.
- [13] »Skybrary,« [Mrežno]. Available: <https://skybrary.aero/articles/windsock>.
- [14] »Hrvatska kontrola zračne plovidbe,« [Mrežno]. Available: <https://met.crocontrol.hr/eu/web/guest/44>.
- [15] N. Doris, Zrakoplovna računaska navigacija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2012.
- [16] GeeksforGeeks. [Mrežno]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/a-search-algorithm/>.
- [17] »Great learning,« [Mrežno]. Available: <https://www.mygreatlearning.com/blog/best-first-search-bfs/>.

## Popis slika

Slika 1 Dimenzije zrakoplova [1] .....	3
Slika 2 Ovisnost doleta o visini [1].....	8
Slika 3 Graf potrebne snage u ovisnosti o brzini [4].....	9
Slika 4 Prikaz BRC i BAC pri prijeđenoj udaljenosti [5] .....	10
Slika 5 Ovisnost brzine uzdizanja o promjeni visine [1].....	11
Slika 6 ISA tablica vrijednosti [9] .....	13
Slika 7 Promjena temperature o visini [1].....	14
Slika 8 Anemometar sa polukuglama [10] .....	15
Slika 9 Anemometar sa propelerom [11].....	16
Slika 10 Termoamenometar [11].....	16
Slika 11 Ultrazvučni anemometar [12] .....	17
Slika 12 Vjetrulja [13] .....	18
Slika 13 SWC karta s predviđenim podacima o vjetru [14].....	19
Slika 14 Vektor vjetra prikazan pomoću u i v komponente .....	25
Slika 15 Prikaz prognoziranih podataka vjetra.....	25
Slika 16 Dijagram toka .....	27
Slika 17 Zagreb-Napulj 1500 ft.....	29
Slika 18 Napulj-Zagreb 1500 ft.....	30
Slika 19 Zagreb-Napulj 6500ft.....	31
Slika 20 Napulj-Zagreb 6500 ft.....	31

## Popis tablica

Tablica 1 Postavke snage te potrošnja goriva [2] .....	4
Tablica 2 Eksploatacijske karakteristike zrakoplova Zlin 242-L [1].....	5
Tablica 3 Brzine krstarenja u ovisnosti o brzini [2].....	6
Tablica 4 Jakost vjetra i pripadajuće vrijednosti [7] .....	15
Tablica 5 Performanse zrakoplova Zlin 242L u režimu horizontalnog leta [1].....	23
Tablica 6 Prikaz rezultata na visini 1500 ft.....	32
Tablica 7 Prikaz rezultata na visini 6500 ft.....	32



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ završni rad  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega 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 Optimizacija plana leta s prognoziranim podacima o vjetru, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 7.9.2022.

Dijana Zolobić, D. Šabić  
(ime i prezime, potpis)