

# Analiza performansi zrakoplovnog modela jedrilice klase F3L

---

Vincek, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:556939>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Bruno Vincek**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Završni rad**

**Analiza performansi zrakoplovnog  
modela jedrilice klase F3L**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Bruno Vincek

Zagreb, veljača 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Luliću, na ukazanom vremenu, pomoći, savjetima, prenesenom znanju i podršci tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili potpora tijekom studija.

Bruno Vincek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



|                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                                                        | Prilog |
| Klasa: <b>602 – 04 / 25 – 06 / 01</b>                        |        |
| Ur.broj: <b>15 – 25 –</b>                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Vincek**

JMBAG: **0035223141**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza performansi zrakoplovnog modela jedrilice klase F3L**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Performance analysis of the F3L class glider model aircraft**

Opis zadatka:

Jedna od nišnih djelatnosti u zrakoplovstvu je zrakoplovno modelarstvo u okviru kojeg se izrađuju leteći modeli. Zrakoplovne modele dijeli se u dvije značajne skupine, prvu skupinu čine tzv. hobi odnosno modeli namijenjeni za rekreativno letenje, dok drugu skupinu čine natjecateljski modeli za natjecanja koja se organiziraju prema pravilima svjetske organizacije za sportsko zrakoplovstvo odnosno *Fédération Aéronautique Internationale / World Air Sports Federation – FAI*. FAI zrakoplovne sportske aktivnosti dijeli u 11 sportova. Unutar pojedinog sporta odnosno grane definirane su kategorije. Zrakoplovno modelarstvo dijeli se u osam glavnih kategorija, a svaka od kategorija se dijeli u klase. Za svaku klasu su propisna pravila koja se pobliže definiraju pravila natjecanja i specifikacije modela.

Za model kategorije F3 radio upravljanje jedrilice, klase F3L radio upravljanje jedrilice za termički let RES (engl. *Radio controled Thermal Gliders RES*) u okviru završnog rada potrebno je:

- Prikazati glavne odrednice pravilnika za klasu F3L;
- Prikazati geometrijska ograničenja sukladno FAI pravilniku;
- Za odabranu geometriju modela jedrilice i odabrani aeroprofil odnosno aeroprofile izračunati potrebne aerodinamičke koeficijente te napraviti odgovarajući proračun;
- Usporediti odabranu geometriju modela jedrilice s geometrijom sličnih modela jedrilica;
- Za pretpostavljenu masu izračunati očekivano trajanje leta;
- Odrediti odnosno odabrati odgovarajuću opremu za daljinsko upravljanje sukladno odredbama Pravilnika;
- Analizirati karakteristične faze starta modela i izraditi odgovarajući proračun.

Za konačni odabir geometrije i aeroprofila konzultirati se s mentorom.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

**1. rok:** 20. i 21. 2. 2025.  
**2. rok:** 10. i 11. 7. 2025.  
**3. rok:** 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 24. 2. – 28. 2. 2025.  
**2. rok:** 15. 7. – 18. 7. 2025.  
**3. rok:** 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

# SADRŽAJ

|                                                                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Sadržaj .....                                                                                                      | I    |
| Popis slika .....                                                                                                  | II   |
| Popis tablica .....                                                                                                | IV   |
| Popis oznaka.....                                                                                                  | V    |
| Popis kratica .....                                                                                                | VI   |
| Sažetak .....                                                                                                      | VII  |
| Summary .....                                                                                                      | VIII |
| 1. Uvod .....                                                                                                      | 1    |
| 2. Glavne odrednice pravilnika za klasu F3L .....                                                                  | 2    |
| 2.1. Opća pravila .....                                                                                            | 2    |
| 2.2. Pravilnik natjecanja .....                                                                                    | 2    |
| 2.3. Lokacija za letenje.....                                                                                      | 3    |
| 2.4. Prekid natjecanja .....                                                                                       | 3    |
| 2.5. Start modela (polijetanje).....                                                                               | 4    |
| 2.6. Bodovanje .....                                                                                               | 5    |
| 2.7. Konačni poredak .....                                                                                         | 6    |
| 3. Geometrijska ograničenja sukladno FAI pravilniku.....                                                           | 8    |
| 3.1. Metode koje su dozvoljene za izradu modela .....                                                              | 8    |
| 3.2. Nedožvoljene metode za izradu modela .....                                                                    | 10   |
| 4. Odabir geometrije modela jedrilice i pripadnih aeroprofila krila.....                                           | 11   |
| 4.1. XFLR5.....                                                                                                    | 15   |
| 5. Analiza performansi modela jedrilice u programu XFLR5.....                                                      | 17   |
| 5.1. Određivanje Reynoldsovog broja.....                                                                           | 17   |
| 5.2. Analiza aeroprofila.....                                                                                      | 18   |
| 5.3. Analiza krila .....                                                                                           | 21   |
| 5.4. Dolet i očekivano trajanje leta.....                                                                          | 28   |
| 6. Usporedba odabrane geometrije jedrilice s geometrijom sličnog modela jedrilice.....                             | 32   |
| 6.1. Analiza aeroprofila sličnog modela jedrilice .....                                                            | 32   |
| 6.2. Analiza krila sličnog modela jedrilice.....                                                                   | 33   |
| 6.3. Usporedba doleta i očekivanog trajanja leta modela Prime RES i Wiki F3L .....                                 | 38   |
| 6.4. Usporedba doleta i očekivanog trajanja leta modela jedrilica Prime RES i Wiki F3L<br>s dodanim balastom ..... | 41   |
| 7. Zaključak .....                                                                                                 | 45   |
| 8. Literatura .....                                                                                                | 46   |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1. F3L jedrilica za termički let (model Eli) [2] .....                                                                                            | 2  |
| Slika 2.2. Shematski prikaz lokacije za letenje .....                                                                                                     | 3  |
| Slika 2.3. Shematski prikaz starta modela jedrilice klase F3L [3] .....                                                                                   | 4  |
| Slika 2.4. Oprema za visoki start (engl. hi-start) modela jedrilice klase F3L [4].....                                                                    | 4  |
| Slika 2.5. Dijagram dodatnih bodova u odnosu na udaljenost slijetanja od cilja.....                                                                       | 5  |
| Slika 2.6. Prikaz mogućih trajanja službenog leta .....                                                                                                   | 7  |
| Slika 3.1. Rebrasta konstrukcija krila.....                                                                                                               | 9  |
| Slika 3.2. Zračne kočnice sa servo motorima na F3L jedrilici za termički let [5].....                                                                     | 9  |
| Slika 4.1. Model jedrilice PRIME RES III-KIT-X-TAIL [6] .....                                                                                             | 11 |
| Slika 4.2. Izgled aeroprofila AG24.....                                                                                                                   | 12 |
| Slika 4.3. Izgled aeroprofila AG25.....                                                                                                                   | 12 |
| Slika 4.4. Izgled aeroprofila AG26.....                                                                                                                   | 13 |
| Slika 4.5. Prikaz aeroprofila AG24, AG25 i AG26 na istom grafu.....                                                                                       | 13 |
| Slika 4.6. Geometrijske značajke krila u nacrtu i tlocrtu - mjere krila korištene za proračunski model (mjere su preuzete s crteža za model PRIME I)..... | 14 |
| Slika 4.7. Princip rada metode vrtložne rešetke koja se koristi u programu XFLR5 [11] .....                                                               | 16 |
| Slika 5.1. Odabir parametara za analizu aeroprofila u programu XFLR5 .....                                                                                | 19 |
| Slika 5.2. Rezultati analize aeroprofila AG24, AG25 i AG26.....                                                                                           | 20 |
| Slika 5.3. Najveće vrijednosti koeficijenta uzgona $C_L$ u ovisnosti o brzini leta za pripadne aeroprofile .....                                          | 21 |
| Slika 5.4. Projektiranje krila u programu XFLR5 .....                                                                                                     | 22 |
| Slika 5.5. Model krila jedrilice Prime RES s pripadnim aeroprofilima u programu XFLR5 ..                                                                  | 22 |
| Slika 5.6. Definiranje analize krila u programu XFLR5 .....                                                                                               | 23 |
| Slika 5.7. Definiranje napadnog kuta i koraka za analizu krila u programu XFLR5.....                                                                      | 23 |
| Slika 5.8. Rezultati analize modela krila jedrilice klase F3L .....                                                                                       | 24 |
| Slika 5.9. Odnos brzine spuštanja i brzine leta jedrilice Prime RES.....                                                                                  | 25 |
| Slika 5.10. Omjer klizanja i brzine leta jedrilice Prime RES .....                                                                                        | 26 |
| Slika 5.11. Omjer momenta propinjanja i brzine leta jedrilice Prime RES.....                                                                              | 26 |
| Slika 5.12. Prikaz koeficijenta uzgona po rasponu krila za različite napadne kutove jedrilice Prime RES .....                                             | 27 |
| Slika 5.13. Model Prime RES krila u ravnotežnom letu .....                                                                                                | 28 |
| Slika 5.14. Sile na zrakoplov tijekom spuštanja [12] .....                                                                                                | 29 |
| Slika 5.15. Podatci za proračun u ravnotežnom letu očitani u programu XFLR5 .....                                                                         | 29 |
| Slika 6.1. Aeroprofil modela jedrilice Wiki F3L .....                                                                                                     | 32 |
| Slika 6.2. Usporedba aeroprofila odabranog i sličnog modela jedrilice .....                                                                               | 32 |
| Slika 6.3. Rezultati analize aeroprofila S3016, S3021 i S3025.....                                                                                        | 33 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6.4. Geometrijske značajke krila u nacrtu i tlocrtu - mjere krila korištene za proračunski model Wiki F3L .....                              | 34 |
| Slika 6.5. Projektiranje krila modela jedrilice Wiki F3L u programu XFLR5 .....                                                                    | 35 |
| Slika 6.6. Model krila jedrilice Wiki F3L s pripadnim aeroprofilima u programu XFLR5.....                                                          | 35 |
| Slika 6.7. Usporedba rezultata analize modela krila originalnog i sličnog modela krila .....                                                       | 36 |
| Slika 6.8. Usporedba odnosa brzine spuštanja i brzine leta jedrilice Prime RES i Wiki F3L .                                                        | 37 |
| Slika 6.9. Omjer momenta propinjanja i brzine leta jedrilice Prime RES i Wiki F3L.....                                                             | 37 |
| Slika 6.10. Model krila jedrilice Wiki F3L u ravnotežnom letu .....                                                                                | 38 |
| Slika 6.11. Usporedba doleta u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L .....                                     | 40 |
| Slika 6.12. Usporedba istrajnosti u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L .....                                | 41 |
| Slika 6.13. Usporedba rezultata analize modela krila originalnog Prime RES i sličnog modela krila Wiki F3L, bez balasta i s dodanim balastom ..... | 42 |
| Slika 6.14. Model krila Prime RES s balastom u ravnotežnom letu .....                                                                              | 42 |
| Slika 6.15. Model krila Wiki F3L s balastom u ravnotežnom letu .....                                                                               | 43 |
| Slika 6.16. Usporedba doleta u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L, s i bez balasta .....                    | 43 |
| Slika 6.17. Usporedba istrajnosti u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L, s i bez balasta .....               | 44 |
| Slika 7.1. Shematski prikaz postupka analize performansi modela zrakoplova .....                                                                   | 45 |



## POPIS TABLICA

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 2.1. Dodatni bodovi za slijetanje .....                                                                                | 6  |
| Tablica 4.1. Prikaz glavnih karakteristika aeroprofila .....                                                                   | 13 |
| Tablica 4.2. Prikaz glavnih geometrijskih značajki krila potrebnih za definiranje krila u programu XFLR5 .....                 | 14 |
| Tablica 5.1. Pregled izračunatih vrijednosti Reynoldsovog broja .....                                                          | 17 |
| Tablica 5.2. Prikaz doleta i trajanja leta za različite početne visine leta.....                                               | 31 |
| Tablica 6.1. Prikaz glavnih geometrijskih značajki krila modela Wiki F3L potrebnih za definiranje krila u programu XFLR5 ..... | 34 |
| Tablica 6.2. Usporedba doleta i trajanja leta modela jedrilica Prime RES i Wiki F3L(*) za različite početne visine leta .....  | 40 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka   | Jedinica          | Opis                             |
|----------|-------------------|----------------------------------|
| $Re$     | -                 | Reynoldsov broj                  |
| $V$      | m/s               | brzina strujanja oko aeroprofila |
| $V_v$    | m/s               | brzina spuštanja                 |
| $C$      | m                 | duljina tetive                   |
| $\nu$    | m <sup>2</sup> /s | kinematička viskoznost           |
| $b$      | m                 | raspon krila                     |
| $L$      | N                 | uzgon                            |
| $m$      | kg                | masa odnosno masa krila          |
| $g$      | m/s <sup>2</sup>  | gravitacijska konstanta          |
| $C_L$    | -                 | koeficijent uzgona               |
| $\rho$   | kg/m <sup>3</sup> | gustoća zraka                    |
| $t$      | s                 | vrijeme spuštanja                |
| $S$      | m <sup>2</sup>    | površina krila                   |
| $C_D$    | -                 | koeficijent otpora               |
| $C_M$    | -                 | koeficijent momenta propinjanja  |
| $X$      | m                 | dolet                            |
| $\gamma$ | °                 | kut spuštanja                    |

## POPIS KRATICA

|     |                                                                                          |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|
| FAI | The Federation Aeronautique Internationale FAI (hrv. Međunarodna zrakoplovna federacija) |
| RES | Rudder, Elevator, Spoiler                                                                |

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je definiranje metode za analizu performansi modela zrakoplova koji lete pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja. Za analizu će se koristiti dva modela jedrilica, Prime RES i Wiki F3L, koji se upravljaju putem daljinskog upravljača i nemaju vlastiti izvor pogona. Performanse koje se određuju su dolet i trajanje leta, a glavni podatci za njihov izračun su koeficijenti uzgona i otpora, koji se određuju u programskom paketu XFLR5. U prvom dijelu rada opisano je natjecanje u kojem se koriste modeli jedrilica klase F3L. Prikazane su glavne odrednice pravilnika za klasu F3L, kao i geometrijska ograničenja sukladno FAI pravilniku. Zatim je opisan postupak analize aeroprofila, projektiranja i analize krila u programu XFLR5. Iz rezultata su očitane vrijednosti koeficijenta uzgona ( $C_L$ ) i koeficijenta otpora ( $C_D$ ) za ravnotežan let, kada je moment propinjanja ( $C_M$ ) jednak nuli, te su pomoću njih određeni kut spuštanja ( $\gamma$ ), dolet ( $X$ ) i vrijeme trajanja leta ( $t$ ).

Ključne riječi: model zrakoplova, Reynoldsov broj, XFLR5, koeficijent uzgona, koeficijent otpora, dolet, istrajnost

## SUMMARY

The aim of this final thesis is to define a method for analysing the performances of aircraft models flying at low Reynolds number values. For the analysis will be used two glider models, Prime RES and Wiki F3L, which are controlled via remote control and do not have their own power source. The performances being determined are range and flight duration, and the main data for their calculation are the lift and drag coefficients, which are determined using the XFLR5 software package. The first part of the paper describes the competition in which F3L class glider models are used. The main provisions of the regulations for the F3L class are presented, as well as the geometric limitations in accordance with the FAI regulations. Then, the process of airfoil analysis, wing design, and analysis in the XFLR5 program is described. From the results, the values of the lift coefficient ( $C_L$ ) and drag coefficient ( $C_D$ ) were obtained for steady flight, when the pitching moment ( $C_M$ ) is zero. Using these values, the glide angle ( $\gamma$ ), range ( $X$ ), and flight duration ( $t$ ) were determined.

Keywords: aircraft model, Reynolds number, XFLR5, lift coefficient, drag coefficient, range, endurance

## 1. UVOD

Zrakoplovni model jedrilice klase F3L je vrsta zrakoplova bez vlastitog pogona kojim se upravlja putem daljinskog upravljača. F3L je službena klasa Međunarodne zrakoplovne federacije (engl. *The Federation Aeronautique Internationale (FAI)*), te je nastala iz neformalne klase RES. FAI je nevladina i neprofitna međunarodna organizacija čiji je osnovni cilj promicanje zrakoplovnih i astronautičkih aktivnosti u svijetu, ratificiranje svjetskih i kontinentalnih rekorda te koordinacija organizacije međunarodnih natjecanja. [1] FAI svoje aktivnosti dijeli u 13 kategorija, odnosno zračnih sportova: aviomodelarstvo, amaterski izrađeni i eksperimentalni zrakoplovi, letovi balonom, dronovi, generalna avijacija, jedriličarstvo, zmajarstvo, mikrosvjetla i paramotori, paragliding, akrobatika snage i jedrilice, helikopteri, padobranstvo i svemir.

Klasa F3L je poznata kao i F3 RES (engl. *Rudder, Elevator, Spoiler*) što znači da se upravljanje izvodi putem kormila pravca, kormila visine i zračnih kočnica. Cilj ove klase je da sa ograničenjima na konstrukciju i opremu bude prihvatljivije cijene što će omogućiti i onima sa prosječnim vještinama da mogu pristupiti natjecanju zrakoplovnih modela što se najviše odnosi na mlađe uzraste. Kod ovakvog tipa zrakoplova uzgon se ostvaruje pomoću aerodinamičkih sila koje se ostvaruju na nepomičnim površinama.

Ostale klase unutar kategorije F3 su F3B, klasa u kojoj se modelom jedrilice leti više zadataka koji su trajanje, udaljenost i brzina leta. Iduća klasa je F3F za padinsko letenje, iskorištavajući ulazne struje koje stvara vjetar gdje je zadatak preletjeti stazu od 1000 metara u što kraćem vremenu. Klasa F3G je proizašla iz klase F3B s bitnom razlikom da se ovdje koristi električni motor sa propelerom za postizanje startne visine umjesto vitla. Startna visina nije ograničena, ali električni motor ne smije raditi duže od 30,1 sekundu, te ne smije koristiti više energije od 351 Watt minuta. Zatim klasa F3H je "Cross Country" utrka za modele jedrilica čiji je jedini zadatak preletjeti od točke A do točke B ili neke druge točke što je brže moguće. Klasa F3J za termičko trajanje leta u kojoj natjecatelji nastoje letjeti s modelom jedrilice točno 10 minuta te zatim sletjeti što je moguće bliže određenom mjestu slijetanja. Start modela se postiže ručnom vučom, pri čemu model vuku dvije osobe monofilamentnim (jednonitnim) užetom duljine 150 metara. U klasi F3K su modeli jedrilice koji startaju iz ruku pilota, te je iz tog razloga moguće brzo izvođenje ponovnog pokušaja leta. Maksimalan raspon krila iznosi 1,5 metara. Posljednja klasa je F3Q kod koje se za start modela jedrilice koristi model tegljača koji vuče jedrilicu do 200 metara visine nakon čega se jedrilica oslobađa. Ova klasa definira natjecanje s više zadataka (udaljenost i brzina) i privremena je.

Analiza performansi modela jedrilice klase F3L provoditi će se u programu XFLR5. XFLR5 je alat za analizu aeroprofila, krila i aviona koji rade na niskim vrijednostima Reynoldsovog broja.

## 2. GLAVNE ODREDNICE PRAVILNIKA ZA KLASU F3L

### 2.1. Opća pravila

Modelom zrakoplova koji nema vlastiti izvor pogonske sile upravlja se radio vezom putem daljinskog upravljača. Modelom zrakoplova se upravlja pomoću kormila pravca, kormila visine, te pomoću zračnih kočnica. Model se sastoji od krila, trupa i repnog dijela. Također su moguće verzije koje se nazivaju leteća krila koja nemaju trup ni vertikalni stabilizator, nego samo dvije kontrolne površine od kojih svaka smije biti upravljana samo jednim servo motorom. Maksimalan raspon krila modela iznosi 2 metra, te je najvećim dijelom izrađen od drva.



Slika 2.1. F3L jedrilica za termički let (model Eli) [2]

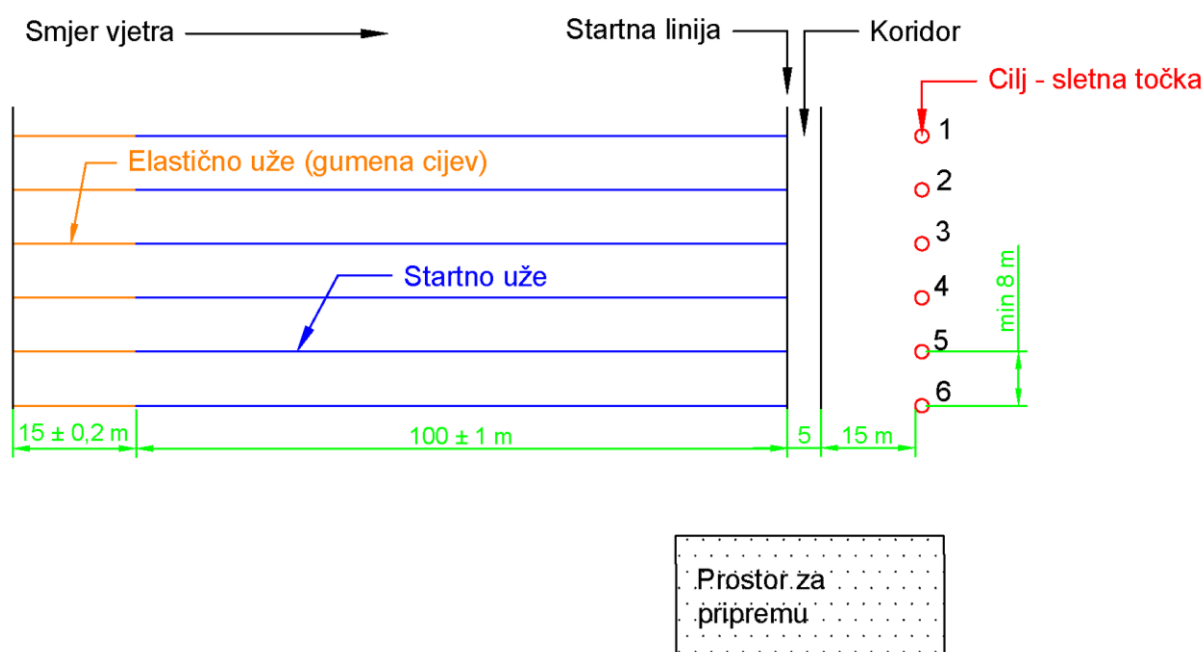
### 2.2. Pravilnik natjecanja

Tijekom natjecanja sudionici se dijele u letačke grupe. Smisao podjele u grupe je da se osigura da svaki pojedinac "leti" (natječe se) protiv što je moguće većeg broja ostalih natjecatelja. Da bi natjecanje bilo punopravno potrebno je da se "odlete" najmanje četiri kvalifikacijske runde. Rezultati iz pojedinih grupa se normaliziraju na način da najbolji u grupi osvoji 1000 bodova, a ostali bodovi se dodjeljuju proporcionalno prema ostvarenom rezultatu pojedinog sudionika u grupi. Ako se leti više od četiri kvalifikacijske runde onda se najlošiji rezultat ne uzima u obzir pri određivanju zbirnog rezultata. Natjecatelji s najvišim ukupnim rezultatom iz kvalifikacijskih krugova natjecat će se u *fly-off*-u za određivanje konačnog plasmana.

Natjecatelji mogu koristiti tri (3) modela koja mogu izmjenjivati kada žele tijekom natjecanja, dok se tijekom jedne runde model može zamijeniti jedino ako je početni model sletio unutar radijusa od 15 metara od zadane točke. Također natjecatelji mogu imati tri (3) pomagača koji će asistirati pri startu modela i vraćanju startnog užeta, kao i o vremenskim uvjetima i mjerenju vremena trajanja leta. Organizatori bi trebali osigurati zapisničare i mjeritelje vremena. Ako nema službenih osoba koje prate rezultat, asistent pilota će mjeriti vrijeme kojeg će nadgledati službeni nadzorni mjeritelj vremena te ako se vremena razlikuju više od 3 sekunde u korist natjecatelja dobit će se nula bodova za taj let.

### 2.3. Lokacija za letenje

Natjecanje se mora održati na što ravnijem terenu kako bi se minimalizirala mogućnost padinskog letenja. Lokacija za letenje mora imati startnu liniju okomitu na smjer vjeta koja ima označena startna mjesta za svakog natjecatelja koja su udaljena najmanje osam metara. Na udaljenosti od 150 metara uz vjetar nalazi se linija gdje je startna užad učvršćena te je također međusobno razmaknuta najmanje 8 metara. Mjesta za slijetanje su smještena najmanje 15 metara niz vjetar od svakog startnog mjesta. Slika 2.2. shematski prikazuje lokaciju za letenje.



Slika 2.2. Shematski prikaz lokacije za letenje

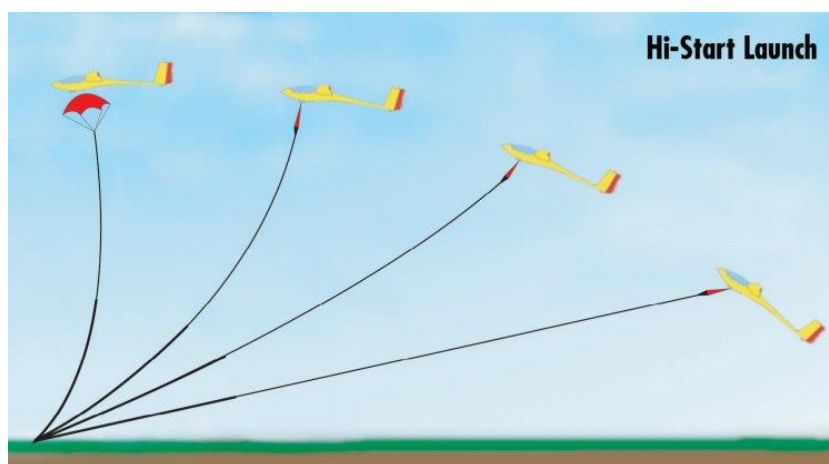
### 2.4. Prekid natjecanja

Ako vjetar počinje iznenada mijenjati smjer ili postane leđni vjetar tada direktor natjecanja prekida natjecanje, te mijenja startnu liniju. Natjecanje se također prekida ako je vjetar kod startne linije na visini od 2 metra najmanje jednu minutu konstantno brži od osam (8) metara u sekundi.



## 2.5. Start modela (polijetanje)

Za start modela koristi se takozvani visoki-start koji se sastoji od gumene cijevi duljine  $15 \pm 0,2$  metara, najlonskog užeta za vuču duljine  $100 \pm 1$  metra s minimalnim promjerom od 0,7 milimetara i pričvršćene zastavice. Organizator mora osigurati identičnu startnu užad za sve natjecatelje. Sila potezanja gumene cijevi ne smije premašiti 40 Newtona ako se produlji na duljinu od 45 metara. Kako gumene cijevi nisu idealne, mora se osigurati da razlika između sile potezanja pojedinih cijevi ne smije biti veća od 4 Newtona. Minimalna sila potezanja kada gumena cijev razvučena na duljinu od 45 metara ne smije biti manja od 27,5 Newtona. Ako se na lokaciji za letenje ne može ostvariti potrebna duljina od 150 metara, organizator može smanjiti duljinu užeta za vuču uz smanjenje radnog vremena te vremena letenja.



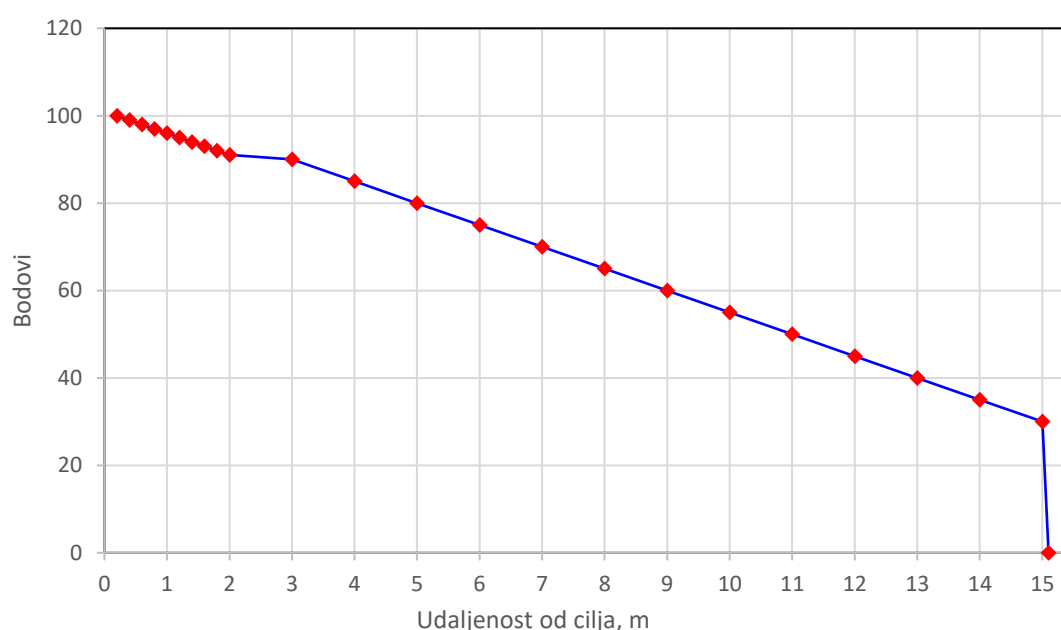
Slika 2.3. Shematski prikaz starta modela jedrilice klase F3L [3]



Slika 2.4. Oprema za visoki start (engl. hi-start) modela jedrilice klase F3L [4]

## 2.6. Bodovanje

Neobrađeni rezultati svake runde sastoje se od bodova za vrijeme trajanja leta, te dodatnih bodova za slijetanje. Vrijeme pokušaja leta mjeri se od trenutka oslobađanja od uređaja za start do trenutka kada model zrakoplova prvi puta dodirne tlo ili kada je isteklo radno vrijeme grupe. Maksimalno trajanje leta je 6 minuta, odnosno 360 sekundi koje mora biti unutar radnog vremena koje traje 9 minuta, odnosno 540 sekundi. Ako se vrijeme leta prekorači i iznosi više od 6 minuta, prekoračeno vrijeme će se oduzeti od 6 minuta. Bodovanje za vrijeme leta vrši se tako da se za svaku sekundu leta dodijele 2 boda. Bodovanje za slijetanje se vrši na temelju udaljenosti nosa modela nakon slijetanja u odnosu na dodijeljeno mjesto slijetanja kao što je prikazano na slici 2.5., u dijagramu dodatnih bodova za slijetanje u odnosu na udaljenost od cilja, odnosno prema tablici 1.



Slika 2.5. Dijagram dodatnih bodova u odnosu na udaljenost slijetanja od cilja

Tablica 2.1. Dodatni bodovi za slijetanje

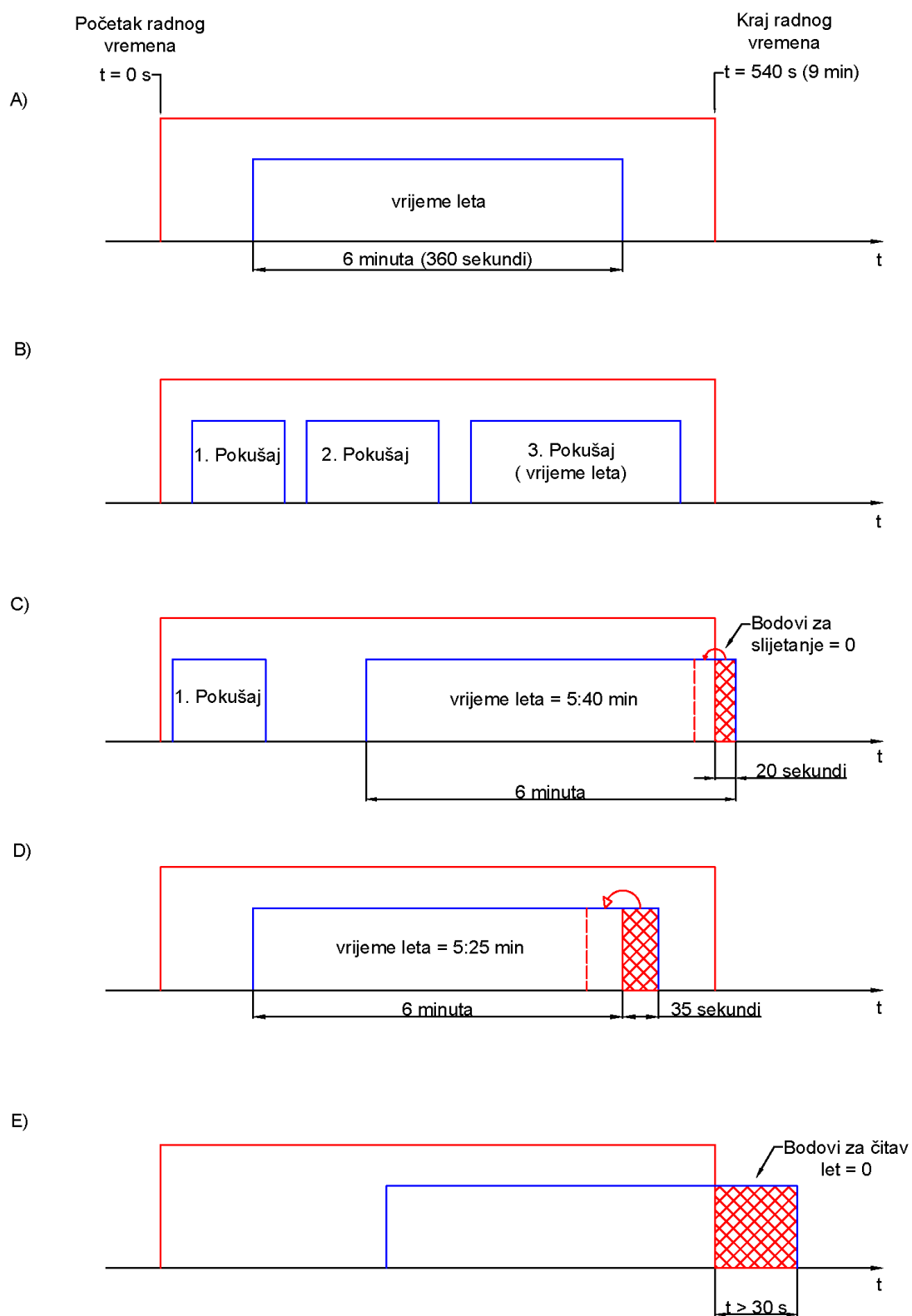
| UDALJENOST OD CILJA U METRIMA | BODOVI | UDALJENOST OD CILJA U METRIMA | BODOVI |
|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| 0,2                           | 100    | 5                             | 80     |
| 0,4                           | 99     | 6                             | 75     |
| 0,6                           | 98     | 7                             | 70     |
| 0,8                           | 97     | 8                             | 65     |
| 1,0                           | 96     | 9                             | 60     |
| 1,2                           | 95     | 10                            | 55     |
| 1,4                           | 94     | 11                            | 50     |
| 1,6                           | 93     | 12                            | 45     |
| 1,8                           | 92     | 13                            | 40     |
| 2,0                           | 91     | 14                            | 35     |
| 3,0                           | 90     | 15                            | 30     |
| 4,0                           | 85     | više od 15                    | 0      |

Natjecatelj dobiva nula bodova ako se nos modela zabije u tlo te se repni dio ne spusti na tlo, ako model izgubi dijelove prilikom slijetanja, te ako nakon slijetanja model više nije sposoban za let. Ostali slučajevi u kojima se ostvaruje nula bodova su ako se prekorači vrijeme rada grupe, ako natjecatelj ili pomoćnik dodirne model prilikom slijetanja ili nakon slijetanja prije nego li je službeni zapisničar izmjerio udaljenost. Nula bodova za cijelu rundu, let i slijetanje će se dobiti ako model sleti izvan prostora predviđenog za slijetanje koje je predvidio organizator ili ako je prekoračio radno vrijeme grupe za više od 30 sekundi.

Natjecatelju s najvećim neobrađenim rezultatom unutar grupe će se dodijeliti 1000 bodova kao normaliziran rezultat. Normaliziran rezultat ostalih natjecatelja unutar te grupe će biti proporcionalan u odnosu na najveći neobrađeni rezultat grupe. Na slici 2.6. se može vidjeti 5 različitih izvedbi leta sa pripadnim rezultatima trajanja vremena leta, osim u slučaju E) u kojem se dobiva 0 bodova za čitav let jer je prekoračeno vrijeme rada grupe za više od 30 sekundi.

## 2.7. Konačni poredak

Konačni poredak za natjecatelje koji su se kvalificirali u fly-off (odnosno finale) određuje se prema rezultatima fly-offa, dok se za ostale natjecatelje određuje prema poretku nakon kvalifikacijskih runda.



Slika 2.6. Prikaz mogućih trajanja službenog leta

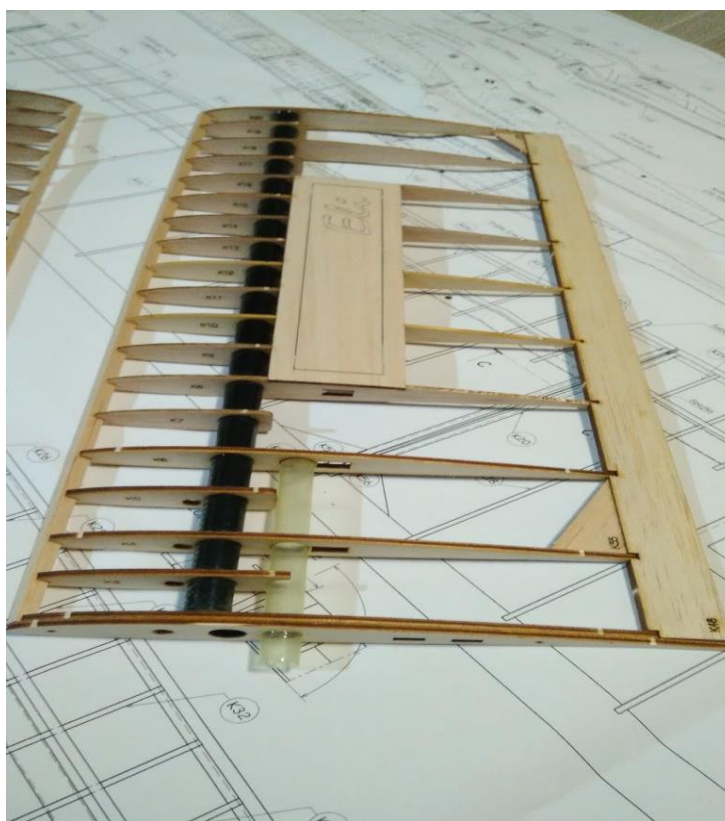
### 3. GEOMETRIJSKA OGRANIČENJA SUKLADNO FAI PRAVILNIKU

Glavno geometrijsko ograničenje na model je maksimalan raspon krila od 2 metra, te da je glavni materijal za izradu drvo.

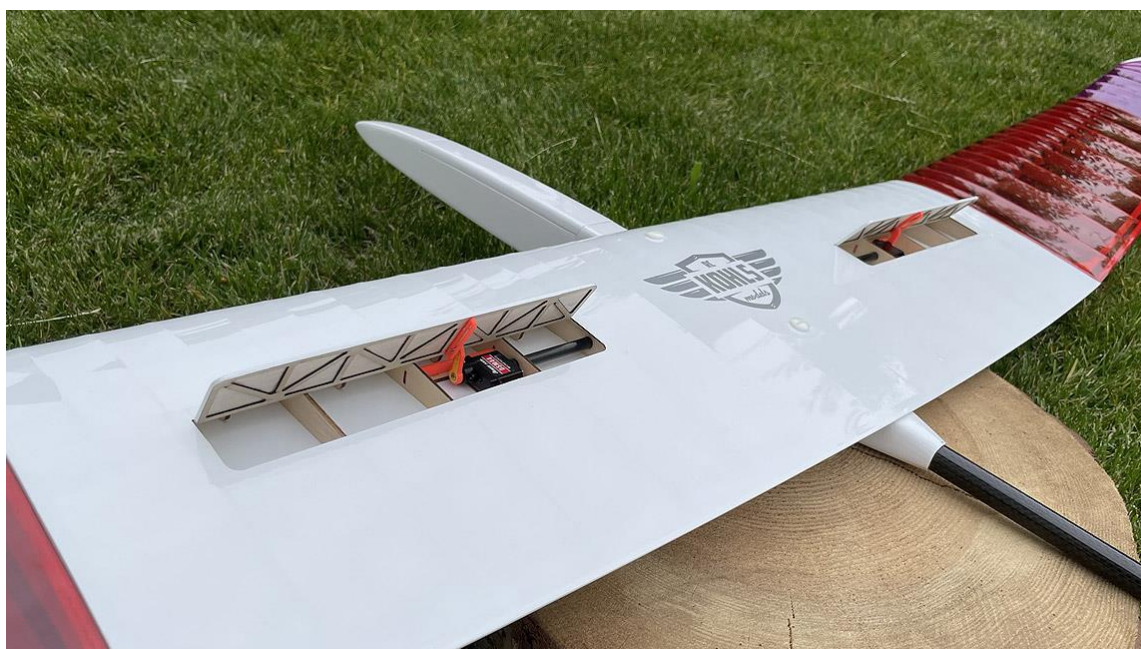
Za letne karakteristike najbitniji je profil krila koji može biti uniforman, a može se i mijenjati duž krila te geometrije krila. Sve ostalo ima znatno manji utjecaj na letne karakteristike. Naravno, pod uvjetom da se izradi na uobičajeni način. Stoga je bitno odabrati odgovarajući profil i što je moguće bolje odrediti geometriju krila.

#### 3.1. Metode koje su dozvoljene za izradu modela

- Krila mogu biti izrađena s rebrima, otvorena ili prekrivena drvetom, od punog drveta ili kombinacijom punog drveta i rebara.
- Glavni materijal za izradu modela je drvo od kojega mora biti načinjena većina dijelova osim napadnog brida, ramenjače i spojnice panela krila.
- Površina krila može biti presvučena tankom prevlakom, svilom, papirom ili poliesterskom tkaninom/folijom.
- Udaljenost između stražnjeg ruba zračnih kočnica i izlaznog brida mora iznositi najmanje 5 centimetara. Zračne kočnice mogu aktivirati jedan ili dva servo motora.
- Trup mora biti u cijelosti izrađen od drva, jedino se repni dio može izraditi od staklenih vlakana, karbonskih vlakana ili cijevi od kevlaru koji unutar trupa ne smije prijeći prednju polovicu područja krila.
- Drvena površina trupa može biti presvučena staklenim ili karbonskim vlaknima ili kevlarom, ali ne više od 1/3 ukupne površine trupa. Takva površina se može zaštititi lakom, tankom prevlakom, svilom, papirom ili poliesterskom tkaninom.
- Šarke i upravljačke šipke su izuzete iz pravilnika.
- Kuka za vuču modela ne smije biti šira od 5 milimetara i viša od 15 milimetara. Za namještanje kuke i otpuštanje užeta ne smije se upravljati daljinskim upravljačem.



*Slika 3.1. Rebrasta konstrukcija krila*



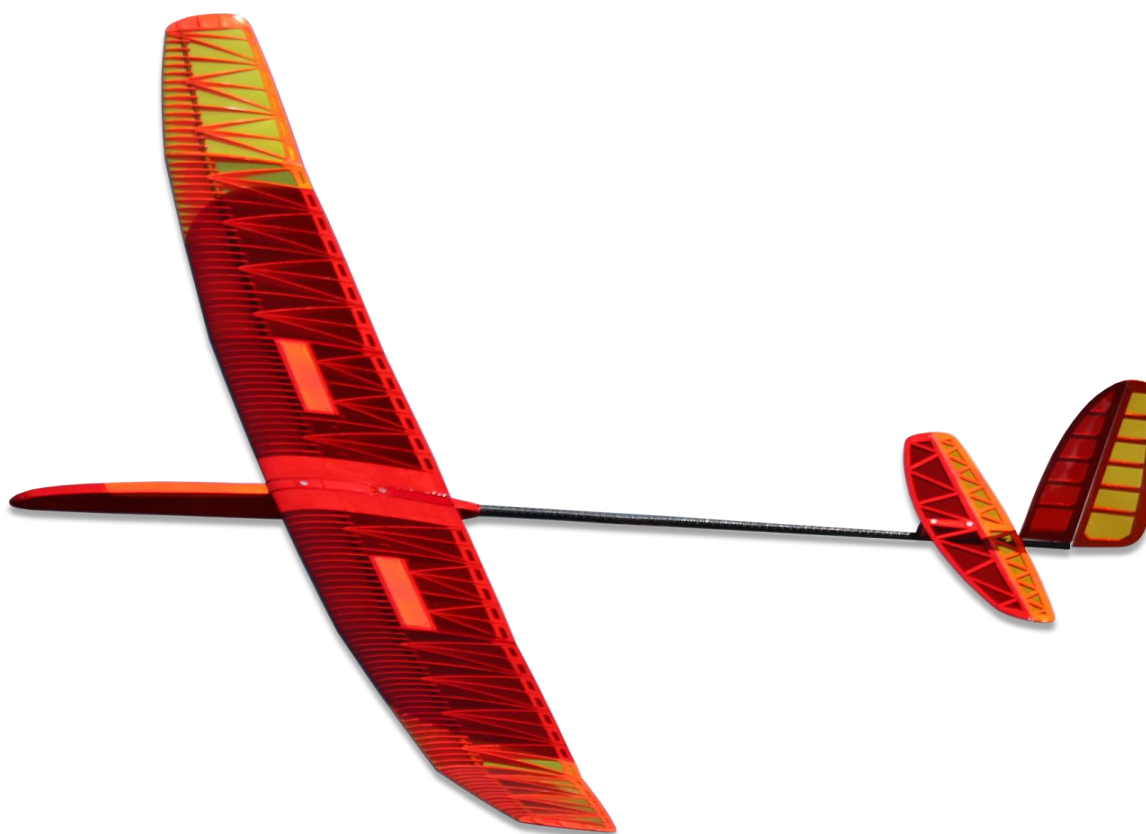
*Slika 3.2. Zračne kočnice sa servo motorima na F3L jedrilici za termički let [5]*

### 3.2. Nedoovoljene metode za izradu modela

- Pozitivni ili negativni kalupi za konstrukciju trupa ili krila ili za površinsku obradu.
- Fiksni ili uvlačivi uređaji za usporavanje modela na tlu tijekom slijetanja kao što su vijak ili izbočina nalik zubima pile. Donja strana modela ne smije imati nikakva izbočenja osim kuke za vuču i poluga za upravljanje kontrolnim površinama.
- Radijus nosa trupa ne smije biti manji od 5 milimetara.
- Balast koji se ne nalazi unutar trupa i koji nije čvrsto pričvršćen unutar konstrukcije zrakoplova.
- Bilo koja telemetrija s izuzetkom jačine radio signala, temperature prijemnika i napona baterije. Uporaba variometra za mjerenje promjene visine nije dozvoljena.
- Bilo kakva telekomunikacija između natjecatelja i pomagača je zabranjena, uključujući mobilne telefone ili voki-tokije.

#### 4. ODABIR GEOMETRIJE MODELA JEDRILICE I PRIPADNIH AEROPROFILA KRILA

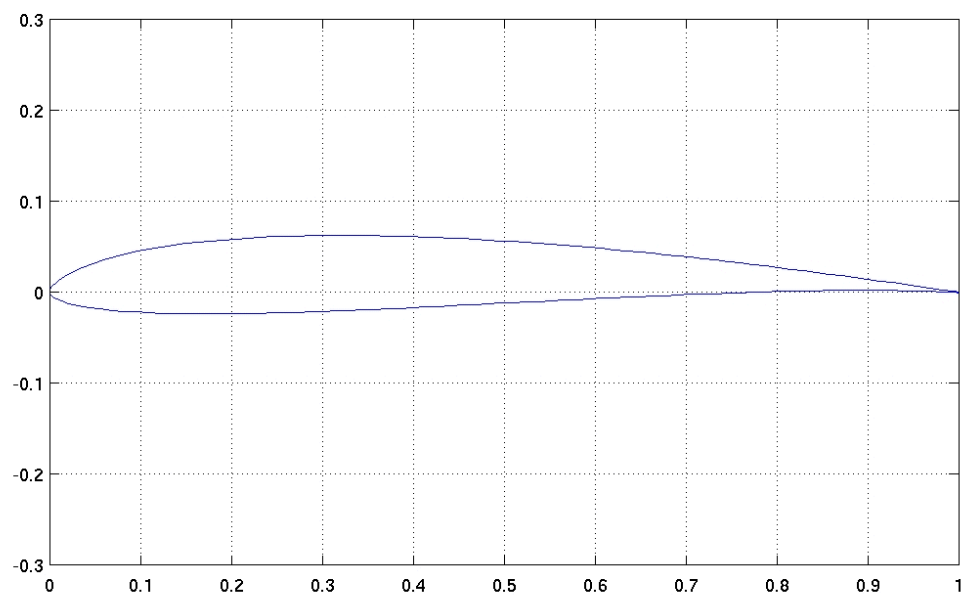
Za odabir geometrijskih značajki koristit će se model tvrtke CLM-pro, koja je specijalizirana za projektiranje i proizvodnju kompozitnih dijelova. Naziv modela je PRIME RES III-KIT-X-TAIL, prikazan na slici 4.1., a model sukladan FAI F3L RES pravilniku. Model se sastoji od trupa, krila, horizontalnog i vertikalnog stabilizatora, a za potrebe ove analize koristit će se samo model krila.



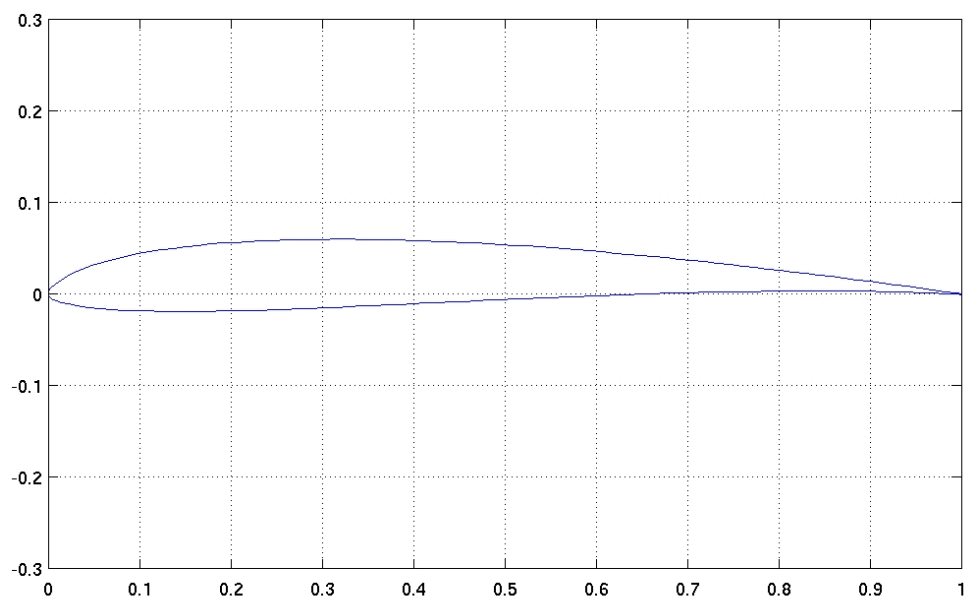
Slika 4.1. Model jedrilice PRIME RES III-KIT-X-TAIL [6]

Za aerodinamičku analizu krila koristit će se tri aeroprofila. Svako polukrilo sastoji se od tri dijela: središnje ploče, ploče srednjeg krila i ploče vrha krila. Odabrani aeroprofili idu redom od najdebljeg u korijenu krila prema najtanjem u vrhu krila, a to su AG24 za središnju ploču, AG25 za sredinu krila i AG26 za vrh krila, prikazani slikama 4.2., 4.3., 4.4. i 4.5. Podatci o aeroprofilima preuzeti su sa stranice UIUC Airfoil Coordinates Database [7].

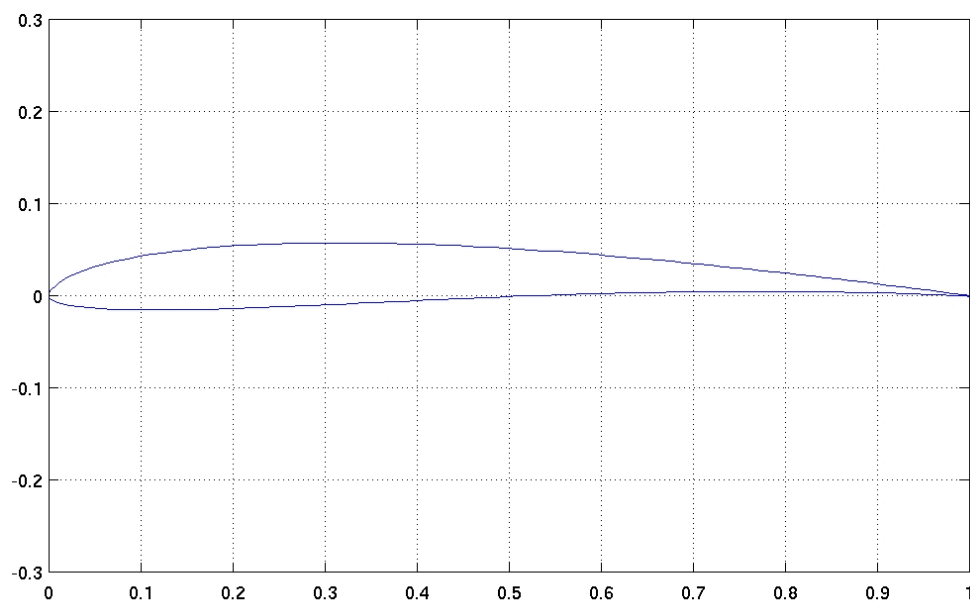




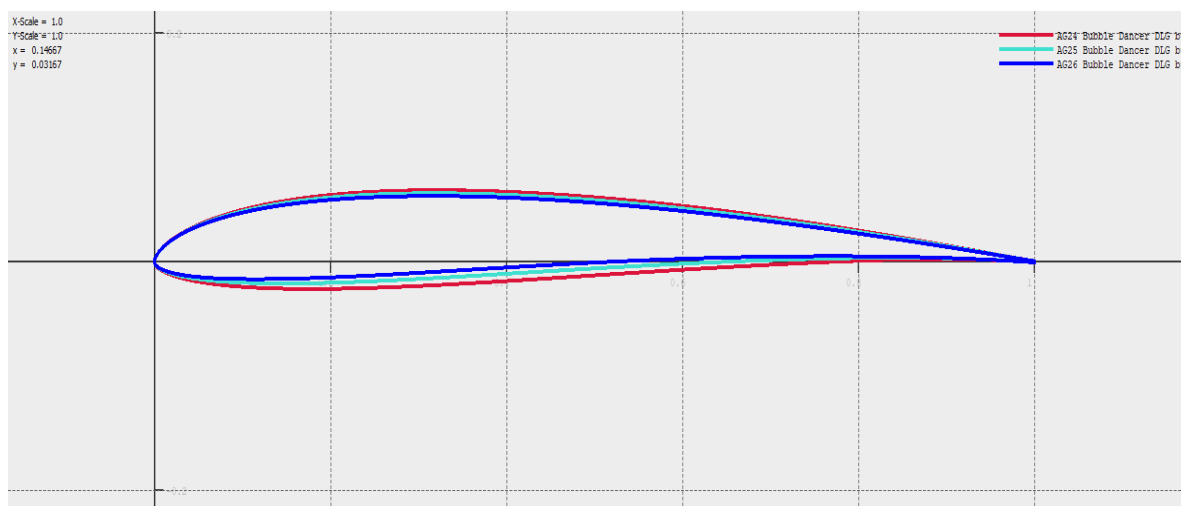
*Slika 4.2. Izgled aeroprofila AG24*



*Slika 4.3. Izgled aeroprofila AG25*



Slika 4.4. Izgled aeroprofila AG26

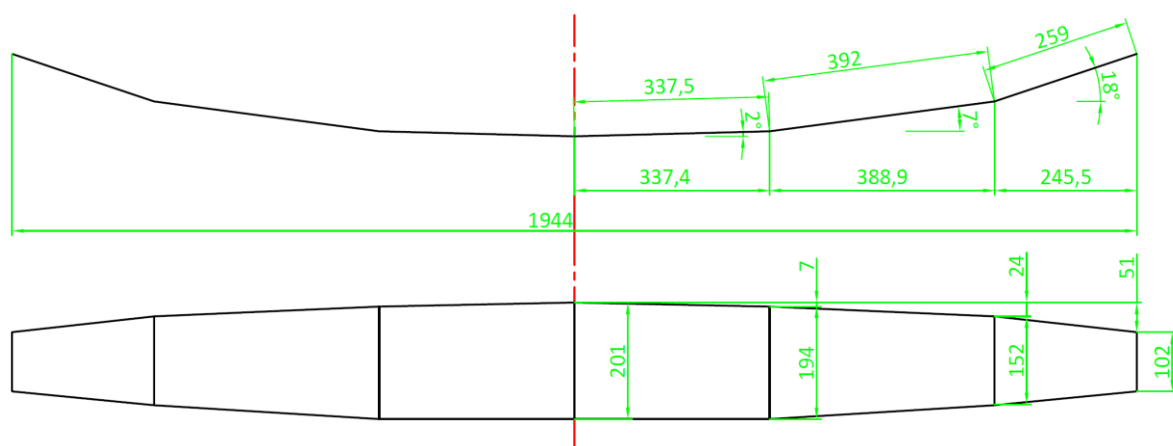


Slika 4.5. Prikaz aeroprofila AG24, AG25 i AG26 na istom grafu

Glavni podatci o aerofilima izračunati su u računalnom programu XFOIL i prikazani u tablici 4.1. XFOIL je interaktivni program za dizajn i analizu podzvučnih izoliranih aeroprofila. Isti podaci mogu se očitati i u programu XFLR5, koji koristi iste algoritme kao XFOIL.

Tablica 4.1. Prikaz glavnih karakteristika aeroprofila

| Aerofil | Maksimalna debljina   | Položaj maksimalne debljine |
|---------|-----------------------|-----------------------------|
| AG24    | $\bar{t}_1 = 0,0841$  | $\bar{x}_{t1} = 0,26$       |
| AG25    | $\bar{t}_2 = 0,0758$  | $\bar{x}_{t2} = 0,2472$     |
| AG26    | $\bar{t}_3 = 0,06845$ | $\bar{x}_{t3} = 0,234$      |



Slika 4.6. Geometrijske značajke krila u nacrtu i tlocrtu - mjere krila korištene za proračunski model (mjere su preuzete s crteža za model PRIME I)

Tablica 4.2. Prikaz glavnih geometrijskih značajki krila potrebnih za definiranje krila u programu XFLR5

| Značajka                          | Oznaka i vrijednost       |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Raspon krila                      | $b = 1,9436 \text{ m}$    |
| Raspon jedne središnje ploče      | $b_1 = 0,3374 \text{ m}$  |
| Raspon jedne ploče srednjeg krila | $b_2 = 0,3887 \text{ m}$  |
| Raspon jedne ploče vrha krila     | $b_3 = 0,2457 \text{ m}$  |
| Korijenska tetiva                 | $c_r = 0,20114 \text{ m}$ |
| Tetiva kraja središnje ploče      | $c_1 = 0,19432 \text{ m}$ |
| Tetiva kraja ploče srednjeg krila | $c_2 = 0,15341 \text{ m}$ |
| Vršna tetiva                      | $c_t = 0,10227 \text{ m}$ |

Za određivanje performansi modela jedrilice u programima XFOIL i XFLR5 koristit će se samo potrebne geometrijske značajke krila prikazane, na slici 4.6. i u tablici 4.2. S obzirom na zanemarivu površinu trupa u odnosu na raspon krila, ali i zbog problema koji se javlja kod korijena krila, gdje postoji nesklad u mrežama krila i trupa, što zajedno s jedinstvenim karakteristikama mreže dovodi do jake numeričke interakcije i neadekvatnog modeliranja lokalnih strujanja u nastavku će biti analizirano samo krilo.

## 4.1. XFLR5

XFLR5 je softver za analizu aerodinamičkih svojstava zrakoplova, naročito u pogledu krila i drugih aerodinamičkih komponenti. Prije njega je nastao program XFOIL kojeg je prvotno razvio dr. Mark Drela na sveučilištu MIT u Cambridgeu, a bio je namijenjen kao alat za razvoj proračuna u okviru projekt Daedalus na MIT-u 1980-ih [8]. Program je dalje razvijen u suradnji s Haroldom Youngrenom. Trenutna verzija programa je 6.61, izdana u studenome 2023. godine [9] te se još uvijek široko koristi.

Program je pisan u programskom jeziku FORTRAN. Programski jezik FORTRAN bio je u uporabi od kasnih 1950-ih, njegov vrhunac popularnosti bio je tijekom 1960-ih i 1970-ih, kada je postao standardni alat za mnoge znanstvene i inženjerske zadatke. [10]

Program XFOIL mogao je analizirati samo protok zraka oko dvodimenzionalnog aeroprofila, bez pripadajućeg krila i zanemarujući inducirani otpor, što čini idealni slučaj koji se nikada neće pojaviti u stvarnosti, stoga se pojavila potreba za izradom boljeg softvera za analizu cijeloga zrakoplova. XFLR5 je razvijen za upotrebu u inženjerskim i edukativnim područjima, te u svrhe hobija, a posebno za konstrukciju i analizu aerodinamičkih zadataka/problema za koje su karakteristični Reynoldsovi brojevi malih vrijednosti. Razvoj programa XFLR5 započeo je kao projekt u okviru šireg interesa za analizu aerodinamike modela zrakoplova. U početku je služio kao aplikacija koja koristi metodu slabog električnog polja (panelna metoda) za simuliranje protoka zraka oko zrakoplova.

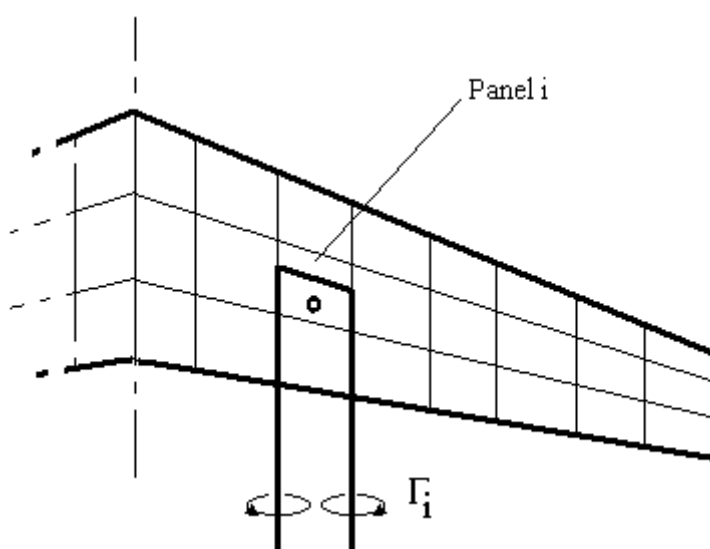
Naziv programa XFLR5 se sastoji od nekoliko dijelova:

- **X** označava eksperimentalni karakter programa.
- **FLR** je skraćenica za protok (engl. *flow*), što se odnosi na analizu protoka zraka oko zrakoplova.
- **5** označava verziju programa jer je inicijalni razvoj prolazio kroz nekoliko faza i unapređenja. Prva verzija naziva v0.1 postala je dostupna 4. studenog 2003. godine, a prvi službeni XFLR5 v1.00 2. veljače 2004. godine. U srpnju 2009. godine, program je privremeno preimenovan u QFLR5, zbog ponovnog pisanja programa korištenjem Qt4, a QFLR5 je objavljen kao v0.01 Beta. Dana 11. travnja 2010. godine, QFLR5 je preimenovan u XFLR5, a također je promijenjeno i numeriranje verzija: nakon QFLR5 v0.04, XFLR5 je objavljen kao v.5.00. Zadnja verzija programa XFLR5 naziva v6.61, dostupna od 13. studenoga 2023. godine, po prvi puta je kompilirana korištenjem Qt6 biblioteka.

Računalni program XFLR su razvili istraživači i inženjeri krajem 1990-ih i početkom 2000-ih godina, pod vodstvom André Deperroisa, a prva verzija je postala dostupna u studenom 2003. godine. Zbog jednostavnosti upotrebe i mogućnosti detaljne analize aerodinamičkih svojstava, postao je popularan među inženjerima i hobbistima. XFLR5 koristi numeričku metodu za analizu performansi zrakoplova, poznatu kao metoda vrtložne rešetke (engl. *Vortex lattice method*). Metoda vrtložne rešetke koristi se u računalnoj dinamici fluida, uglavnom u ranim fazama razvoja i konstrukcije zrakoplova kao i za potrebe aerodinamičkog obrazovanja na sveučilišnoj razini. Metoda modelira uzgonske površine, poput krila zrakoplova kao beskonačno tanku ploču diskretnih vrtloga za izračunavanje uzgona i inducirano otpora. Utjecaj debljine krila i

viskoznost su zanemareni. Metodom vrtložne rešetke može se izračunati protok oko krila s osnovnom, najjednostavnijom geometrijskom definicijom kao što je pravokutno krilo, te je dovoljno poznavati samo raspon i tetivu, dok s druge strane spektra može opisati strujanje oko prilično složene geometrije zrakoplova. Metoda vrtložne rešetke uključuje podjelu uzgonskih površina na finu mrežu panela, od kojih je svaki panel okružen vrtlogom u obliku potkove, te su raspoređeni duž površine krila. Vezani vrtlog nalazi se na poziciji tetive  $\frac{1}{4}$  ploče s dvije prateće vrtložne linije koje izlaze sa svakog kraja u beskonačnost prikazano slikom 4.7. Slično kao i kod drugih numeričkih metoda, postavljanjem sustava jednačbi s rubnim uvjetima koji vrijede za sve panele u modelu te rješavanjem odgovarajućeg sustava jednačbi može se izračunati doprinos uzgonu i otporu svakog od panela, te daljnjim zbrajanjem doprinosa svakoga od njih dobiti performanse cijele površine. Program se koristi za simulaciju aerodinamičkog ponašanja krila, uključujući analize pod različitim napadnim kutovima, brzinama i visinama. Softver omogućava i analizu stabilnosti i performansi zrakoplova u subsoničnom i transoničnom području.

U okviru programa XFLR5 pretpostavlja se da su viskozni i neviskozni doprinosi aerodinamičkim silama linearno neovisni, tako da se „neviskozni rezultat“ metode vrtložne rešetke može nadopuniti analizom viskoznog XFOIL-a tako da se na taj način ostvari realniji matematički model. Rezultati proračuna mogu se prikazati kao graf koji prikazuje promjene uzgona i otpora u ovisnosti o napadnom kutu, graf koji prikazuje promjenu momenta krila u ovisnosti o napadnom kutu, te se koristi kod analize stabilnosti i ponašanja krila pri različitim brzinama i napadnim kutovima. Također, moguće je prikazati i raspodjelu pritiska po površini krila. Bitno je naglasiti da rezultate izračunate u programu XFLR5 treba uzeti s dozom opreza zbog toga što je uzeta hipoteza neovisnosti između viskoznog i neviskoznog strujanja, što nije potkrijepljeno teorijskim modelom, pa je iz tog razloga poželjno rezultate usporediti s rezultatima eksperimentalnog rada, te tako provjeriti valjanost modela.



Slika 4.7. Princip rada metode vrtložne rešetke koja se koristi u programu XFLR5 [11]

## 5. ANALIZA PERFORMANSI MODELA JEDRILICE U PROGRAMU XFLR5

### 5.1. Određivanje Reynoldsovog broja

Za analizu performansi aeroprofila i krila modela jedrilice u programu XFLR5 potrebno je odrediti vrijednosti Reynoldsovog broja, koji predstavlja odnos inercijskih i viskoznih sila. Vrijednosti Reynoldsovog broja određuju se za raspon brzina u kojem će se model jedrilice kretati, te na različitim duljinama tetiva, jer se geometrija krila mijenja duž raspona krila. Reynoldsov broj se računa prema izrazu (5.1). Kinematička viskoznost je konstantna i iznosi  $\nu = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

$$Re = \frac{V \cdot c}{\nu} \quad (5.1)$$

Gdje je:

$V$  – brzina strujanja oko aeroprofila, m/s

$c$  – duljina tetive, m

$\nu$  – kinematička viskoznost (u ovom slučaju je konstantna i iznosi  $\nu = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )

Izračunate vrijednosti Reynoldsovog broja nalaze se u tablici 5.1

Tablica 5.1. Pregled izračunatih vrijednosti Reynoldsovog broja

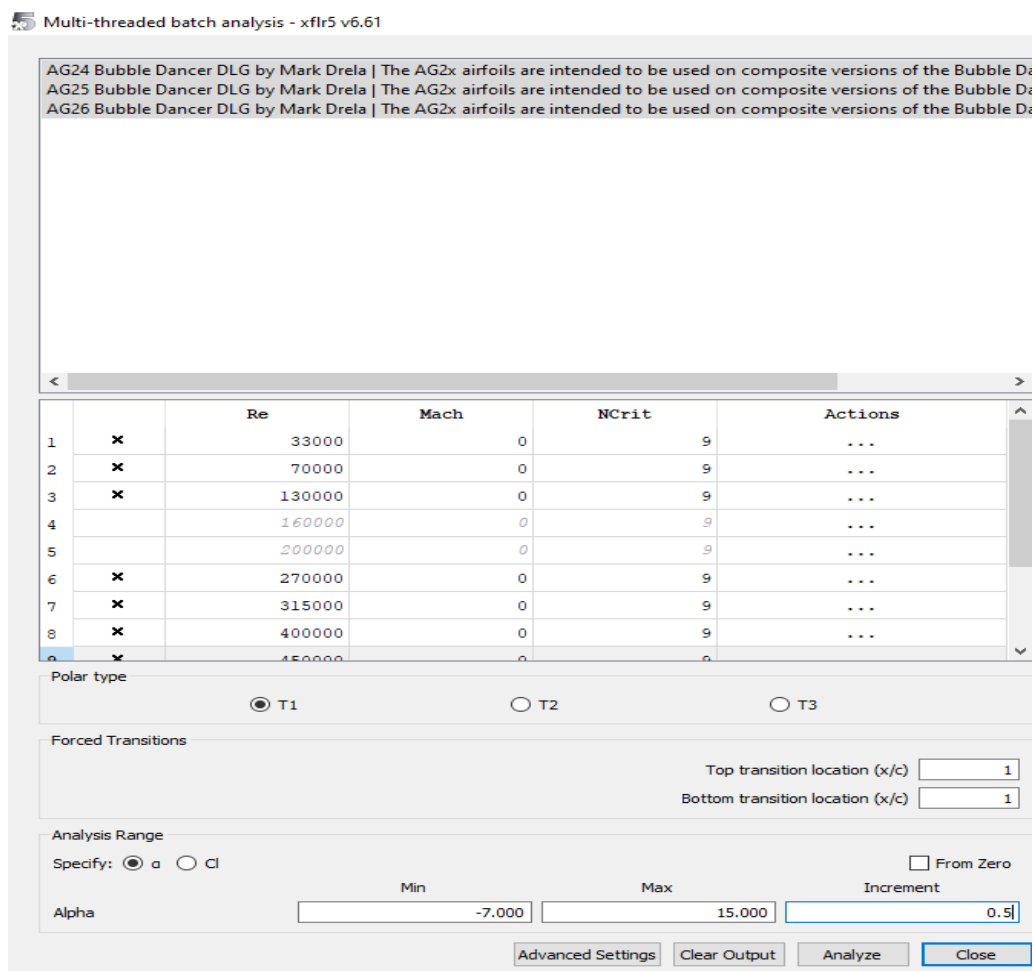
|                           | $V_1 = 5 \text{ m/s}$ | $V_2 = 10 \text{ m/s}$ | $V_3 = 20 \text{ m/s}$ | $V_4 = 30 \text{ m/s}$ |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $C_r = 0,20114 \text{ m}$ | $Re_{r1} = 68883,56$  | $Re_{r2} = 137767,12$  | $Re_{r3} = 275534,25$  | $Re_{r4} = 413301,37$  |
| $C_1 = 0,19432 \text{ m}$ | $Re_{11} = 66547,95$  | $Re_{12} = 133095,89$  | $Re_{13} = 266191,78$  | $Re_{14} = 399287,67$  |
| $C_2 = 0,15341 \text{ m}$ | $Re_{21} = 52537,67$  | $Re_{22} = 105075,34$  | $Re_{23} = 210150,68$  | $Re_{24} = 315226,03$  |
| $C_t = 0,10227 \text{ m}$ | $Re_{t1} = 35023,97$  | $Re_{t2} = 70047,95$   | $Re_{t3} = 140095,89$  | $Re_{t4} = 210143,84$  |

Te se iz njih zaključuje da se radi o laminarnom strujanju jer se vrijednosti Reynoldsovog broja kreću od 35024 za brzinu od 5 m/s na mjestu vršne tetive do 413301 za brzinu od 30 m/s na mjestu korijenske tetive, što upućuje na laminarno strujanje prema karakteristikama tog broja.

## 5.2. Analiza aeroprofila

Za početak rada potrebno je uvesti podatke o aeroprofilima u program XFLR5. U glavnom izborniku odabire se „File“, zatim „Open“ i tada se odabiru preuzeti aeroprofil koji će se koristiti za izradu odnosno definiranje krila. Nakon učitavanja odabranih aeroprofila, koristi se ugrađeni XFoil modul za izračun njihovih polara. Za svaki aeroprofil mora se izračunati skup polara koji pokriva raspon Reynoldsovog broja u realnim uvjetima letenja. Program XFLR5 automatski preuzima izračunate polare, a tim podacima dodaje viskozni doprinos analizi vrtložne rešetke tako što provede interpolacije podataka između različitih Reynoldsovih brojeva ako za time ima potrebe. Pri radu treba voditi računa da mreža pokrivenosti Reynoldsovih brojeva bude dovoljno gusta kako bi je XFLR5 mogao koristiti, pa se mogu uzeti već predložene vrijednosti Reynoldsovog broja, a ako će biti potrebno, na kraju analize krila se mogu dodati nove vrijednosti. Potreba za manjom razlikom između pojedinih Reynoldsovih brojeva javlja se ako se rezultati analize krila nalaze unutar manjeg raspona napadnog kuta nego što je bio zadani raspon. U tom slučaju, postojeće polare nije potrebno mijenjati, već samo ponoviti postupak analize za nove vrijednosti Reynoldsovog broja, dok se ne postigne željeni raspon napadnih kutova u polari tijekom analize krila. Za analizu aeroprofila iz izbornika „Analysis“, koristi se naredba „Batch Analysis“ u kojoj se zadaju vrijednosti Reynoldsovog broja i raspon napadnih kutova ( $\alpha$ ) za konstantnu brzinu leta koja se odabire kao T1 u izborniku „Polar type“. Ostale mogućnosti su T2 koja predstavlja konstantan uzgon, dok se opcija T3 odnosi na analizu polara koja se koristi za prikaz i evaluaciju performansi različitih geometrijski oblika krila ili sveukupnog aerodinamičkog profila.

Za predloženi model analiza je provedena na sva tri aeroprofila istovremeno. S obzirom na to da se aeroprofil AG24 nalazi na korijenskoj tetivi i tetivi kraja središnje ploče, a izračunata vrijednost Reynoldsovog broja ne razlikuje se značajno, analiza će se stoga provesti samo jednom za taj profil. Na slici 5.1. prikazan je prozor u kojem se odabiru aeroprofil, Reynoldsovi brojevi, tip polare i raspon napadnih kutova na kojima se provodi analiza.

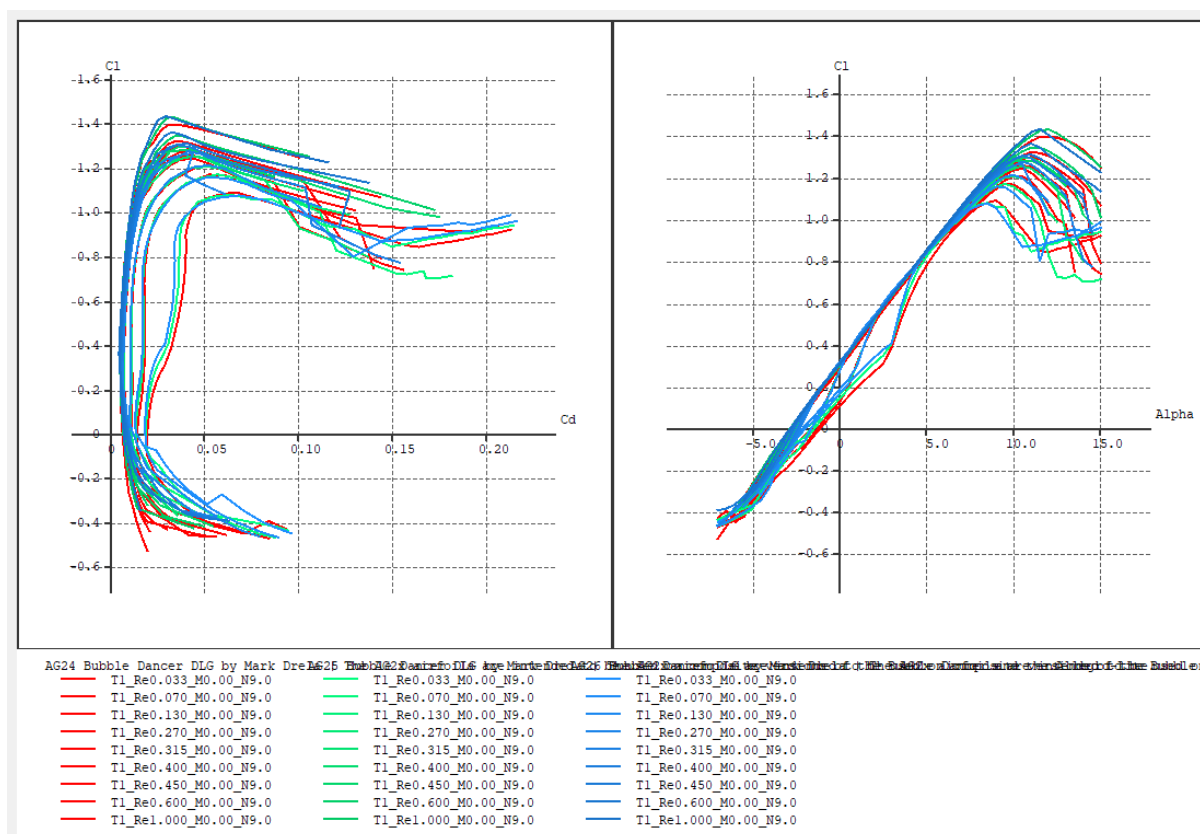


Slika 5.1. Odabir parametara za analizu aeroprofila u programu XFLR5

Promjena napadnog kuta za analizu aeroprofila odabrana je u rasponu od  $-7^\circ$  do  $15^\circ$ , s korakom od  $0,5^\circ$ . Na slici 5.2. nalaze se dijagrami koji prikazuju ovisnost koeficijenta uzgona ( $C_L$ ) o koeficijentu otpora ( $C_D$ ), kao i ovisnost koeficijenta uzgona o napadnom kutu ( $\alpha$ ).

Iz izračunatih rezultata vidi se da za iste vrijednosti Reynoldsovih brojeva kod različitih aeroprofila, krivulje slijede slične vrijednosti koeficijenta uzgona u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, te slične vrijednosti odnosa koeficijenta uzgona o koeficijentu otpora. Takvo ponašanje je i očekivano, jer je riječ o tri aeroprofila iz iste familije aeroprofila koji se razlikuju samo u relativnoj debljini.

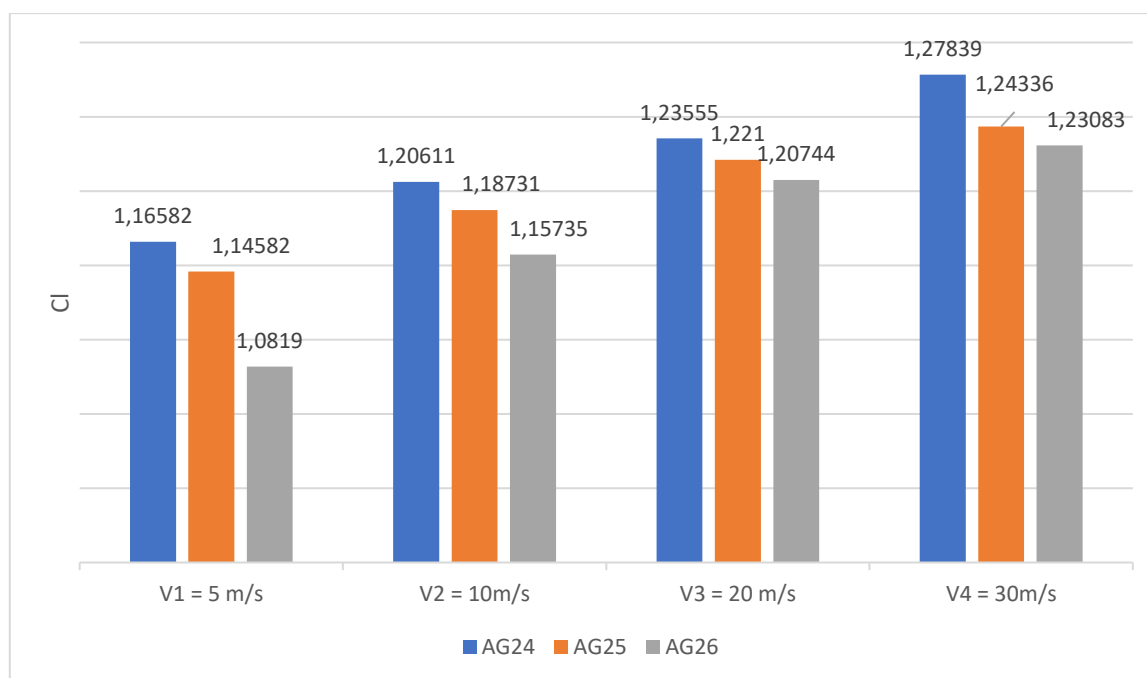




Slika 5.2. Rezultati analize aeroprofila AG24, AG25 i AG26

Iz rezultata u  $C_L, \alpha$  dijagramima, zaključuje se da se povećanjem brzine, odnosno Reynoldsovog broja, povećava i maksimalni koeficijent uzgona. Također je vidljivo da će za manje brzine leta, do sloma uzgona doći kod manjeg napadnog kuta ( $\alpha$ ). Za izračunate vrijednosti Reynoldsovog broja prema tablici 5.1., aeroprofil AG24 maksimalni koeficijent uzgona se ostvaruje pri brzini od 30 m/s i napadnom kutu od  $11^\circ$  te iznosi 1.27839. Aeroprofil AG25 također ostvaruje maksimalni koeficijent uzgona pri brzini od 30 m/s, napadni kut od  $11^\circ$  te iznosi 1.24336. Aeroprofil AG26 maksimalni koeficijent uzgona ostvaruje za brzinu od 30 m/s, napadni kut od  $10^\circ$  te iznosi 1.23083. To nisu najveće moguće vrijednosti koeficijenta uzgona jer za veće brzine leta koeficijent uzgona raste, ali istovremeno rastu i vrijednosti Reynoldsovog broja, pri čemu za vrijednosti Reynoldsovog broja veće od 500.000 rezultati zbog ograničenja programa mogu postati manje precizni. Očitane vrijednosti maksimalnog koeficijenta uzgona za pojedine aeroprofile s pripadnim brzinama, prikazani su na slici 5.3. Iz rezultata očitanih s dijagrama na slici 5.2., a prikazanih slikom 5.3., vidi se da tanji aeroprofil s kraćom duljinom tetive ostvaruju manje uzgona<sup>1</sup>. U  $C_L, C_D$  dijagramu vidi se da s manjom brzinom (Reynoldsovim brojem), za isti koeficijent uzgona, dolazi do većeg koeficijenta otpora, što govori da je na manjim brzinama, za postizanje istog uzgona, potrebno je povećati napadni kut aeroprofila, što povećava otpor. U tom režimu letni parametri nisu optimalni jer se povećava ukupni otpor.

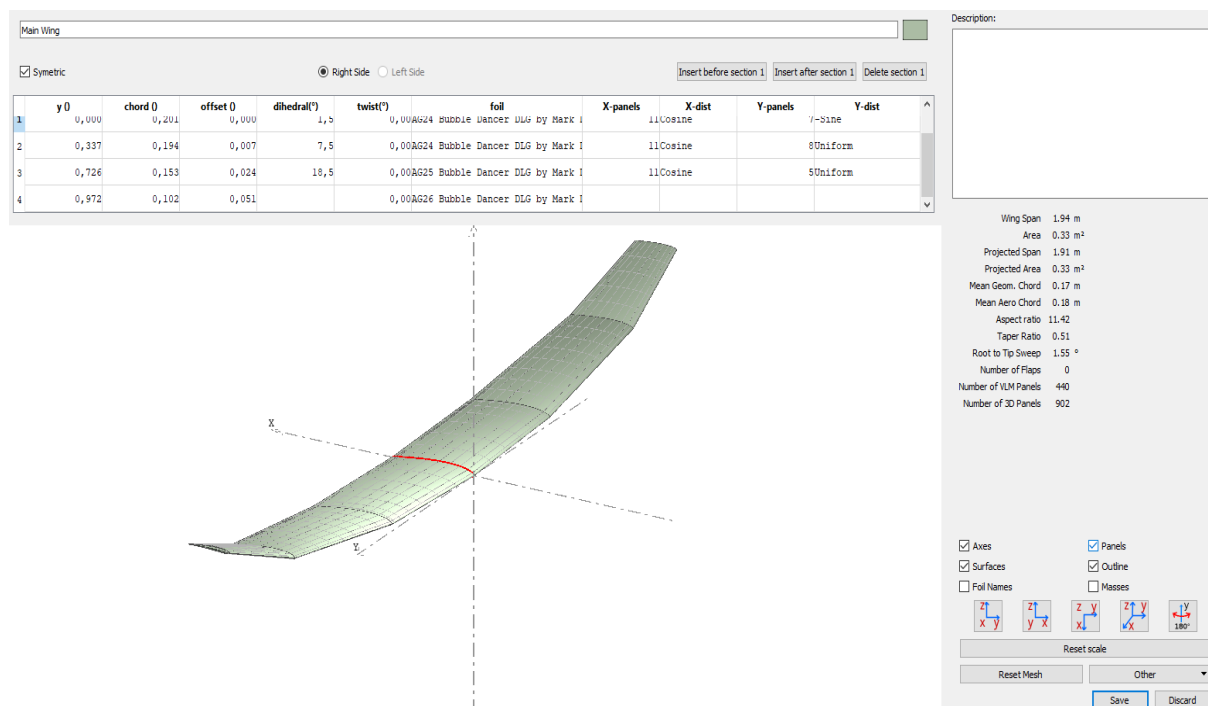
<sup>1</sup> Duljina tetive,  $c$ , potrebna je za izračunavanje Reynoldsovog broja,  $Re = V \cdot c / \nu$ , tako da se kombinacijom različitih duljina tetiva i brzina leta za isti aeroprofil može dobiti jednaka vrijednost Reynoldsova broja. Iz toga slijedi da se za kraću duljinu tetive smanjuje i Reynoldsov broj za istu brzinu leta.



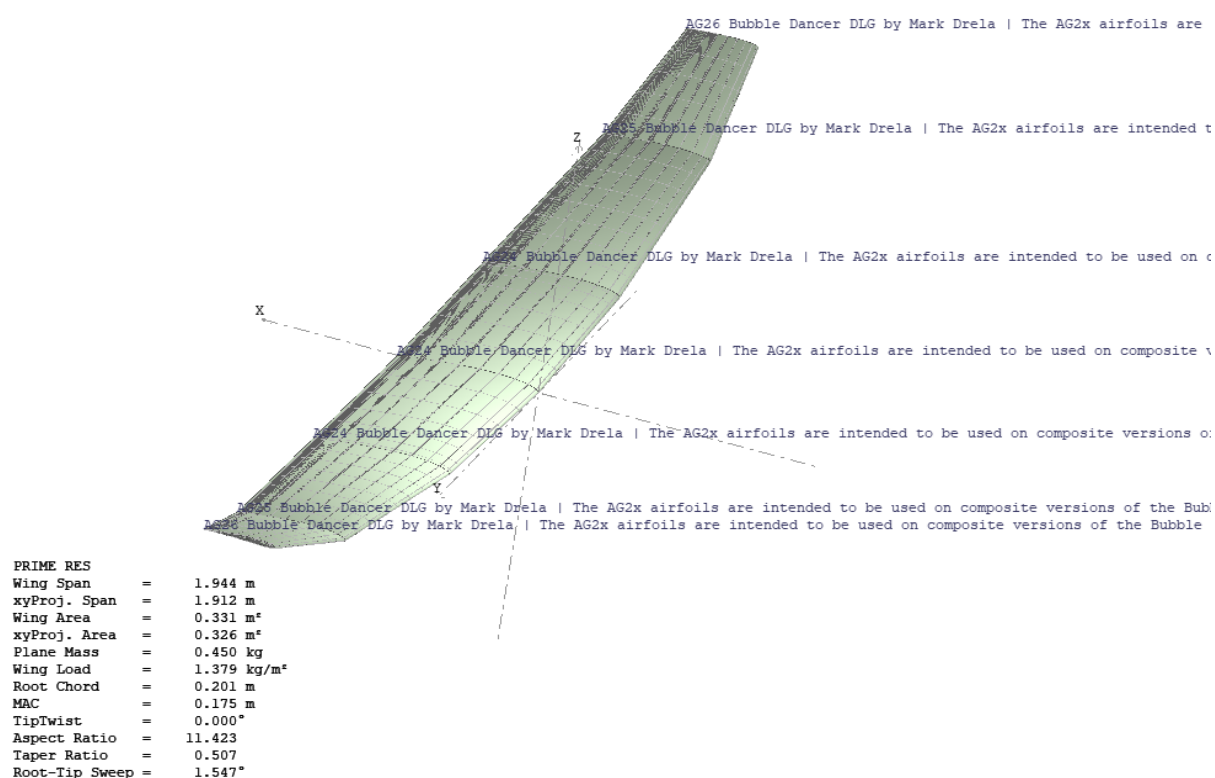
Slika 5.3. Najveće vrijednosti koeficijenta uzgona  $C_L$  u ovisnosti o brzini leta za pripadne aeroprofile

### 5.3. Analiza krila

Nakon provedene analize u 2D području za aeroprofile, može se analizirati cijelo krilo u 3D području pomoću metode vrtložne rešetke. Prvo se mora modelirati krilo uz pomoć podataka modela zrakoplova prikazanih na slici 4.6. Geometrija modela zrakoplova definira se odabirom na alatnoj traci „plane“, zatim „Define a New Plane“. U otvorenom prozoru odabire se samo „Define Main Wing“, dok se „Elevator“ i „Fin“ isključuju jer se analiza repnog dijela ne provodi. Definiranje parametara krila prikazano je na slici 5.4.. Projektira se jedno polukrilo, a zatim se to polukrilo preslikava preko osi simetrije kako bi se dobio puni model krila. Glavni parametri za projektiranje krila u programskom paketu XFLR5 su raspon polukrila, duljina tetive, pomak po x-osi od referentne linije, dihedral, te odabrani aeroprofil na određenom rasponu krila. Također je u tom istom prozoru prema slici 5.4. pod „Other“, zatim „Inertia“, dodana masa krila, odnosno čitavog modela koja iznosi 0,450 kg. Kako se podatci o krilu unose, program odmah izračunava površinu krila, srednju aerodinamičku tetivu i suženje krila. Definiranje gustoće mreže panela prepušta se programu da definira mrežu koju vidi. To se vrši resetiranjem mreže panela naredbom „Reset Mesh“ u prozoru prema slici 5.4. Finija mreža znači više točnosti, ali može dovesti do ograničenja interne memorije programa XFLR5. Na slici 5.5. prikazan je model krila jedrilice Prime RES u programu XFLR5 s pripadnim aeroprofilima.

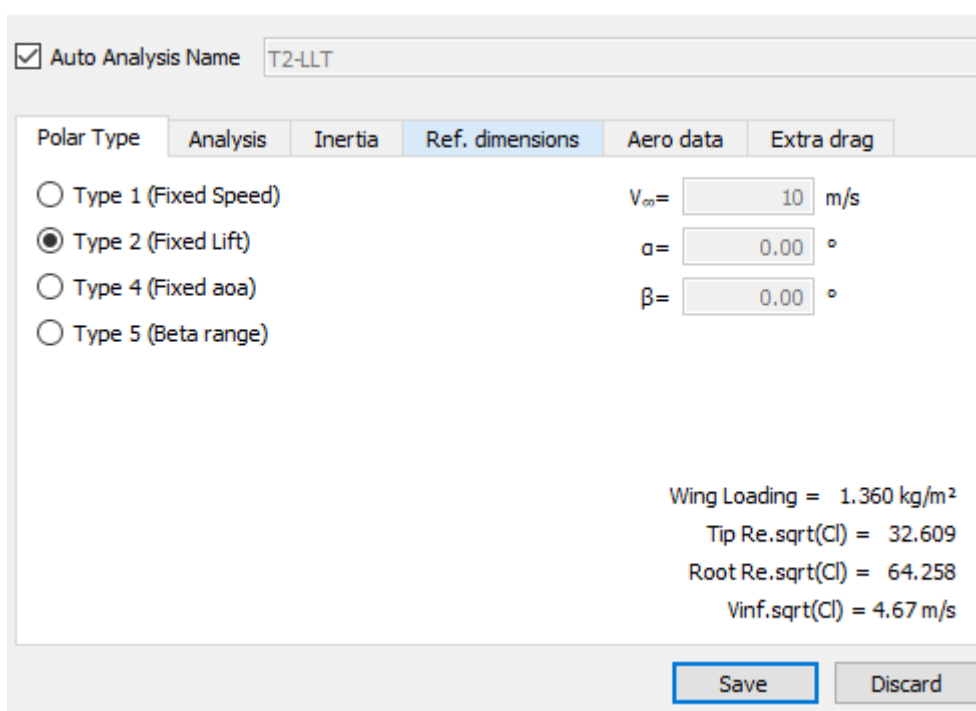


*Slika 5.4. Projektiranje krila u programu XFLR5*

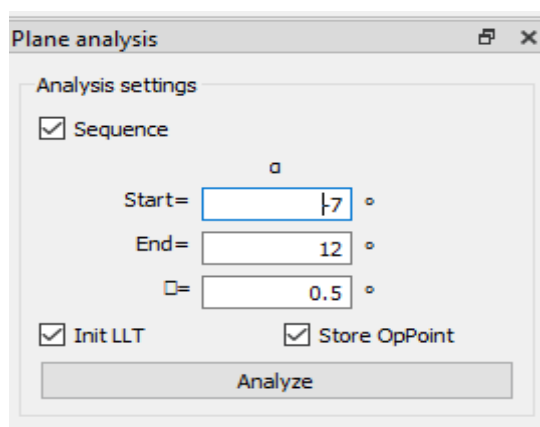


Slika 5.5. Model krila jedrilice Prime RES s pripadnim aeroprofilima u programu XFLR5

Za analizu krila iz izbornika „Analysis“, koristi se naredba „Define an Analysis“. Vrste analiza koje se mogu provesti su za konstantnu brzinu, konstantan uzgon i konstantni napadni kut. Kako krilo jedrilice u bilo kojem trenutku, mora generirati dovoljno uzgona da uravnoteži težinu modela, odabire se analiza s konstantnim uzgom, odnosno „Type 2“ prikazano na slici 5.6. Metoda za analiziranje je „LLT“, odnosno metoda teorije linije podizanja koja se može koristiti samo kada se analizira glavno krilo, bez repnog dijela. Za analizu krila nije potrebno uvrštavati vrijednosti Reynoldsovog broja jer se one automatski izračunavaju za korijen i vrh krila na temelju brzine leta. U krajnje desnom prozorskom oknu prikazanom na slici 5.7., prikazan je odabir promjene napadnog kuta za analizu krila u rasponu od  $-7^\circ$  do  $12^\circ$ , s korakom od  $0,5^\circ$ .

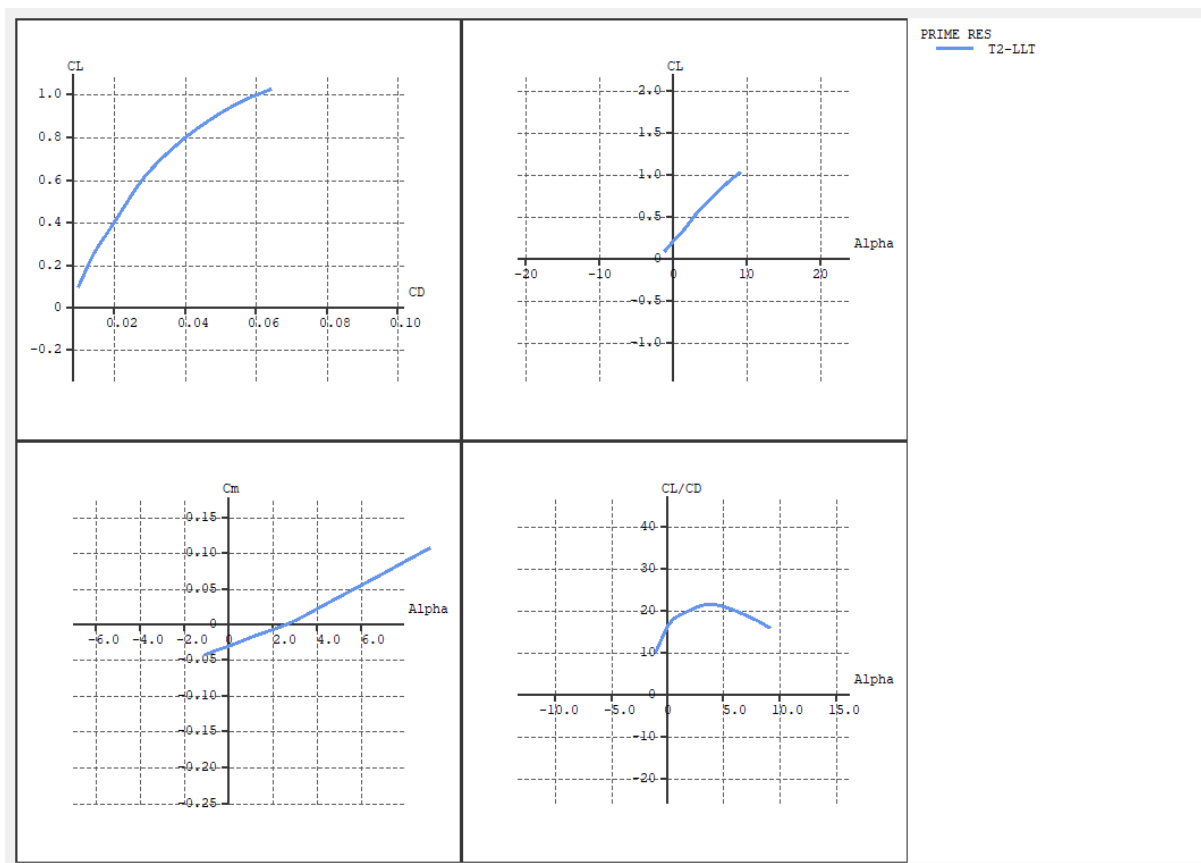


Slika 5.6. Definiranje analize krila u programu XFLR5



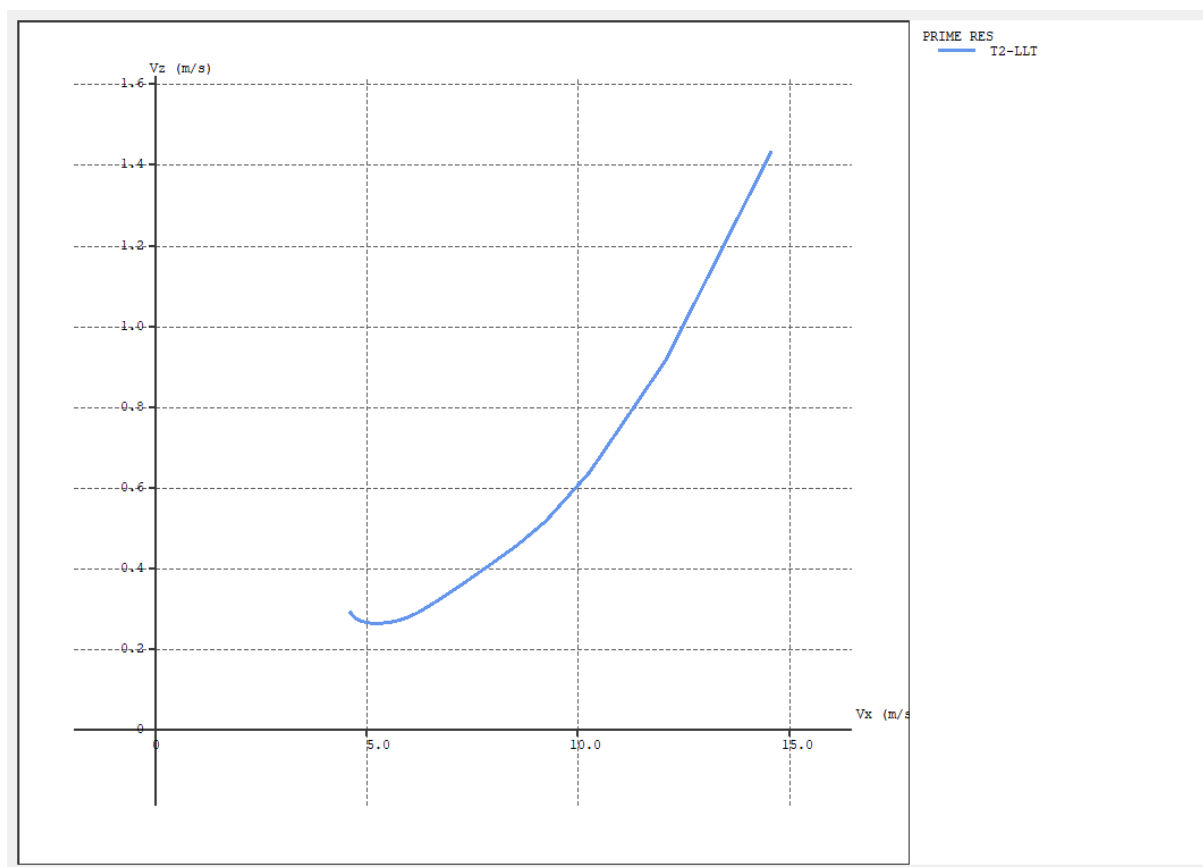
Slika 5.7. Definiranje napadnog kuta i koraka za analizu krila u programu XFLR5

Rezultati analize krila za konstantni uzgon prikazani su na slici 5.8., te prikazuju odnose koeficijenta uzgona o koeficijentu otpora, koeficijentu uzgona o veličini napadnog kuta, promjenu momenta propinjanja ( $C_M$ ) u odnosu na napadni kut, te dijagram koji prikazuje odnos između koeficijenta uzgona ( $C_L$ ) i koeficijenta otpora ( $C_D$ ) u funkciji napadnog kuta ( $\alpha$ ). Iz dijagrama se mogu očitati potrebni podatci za izračun doleta i istrajnosti modela.



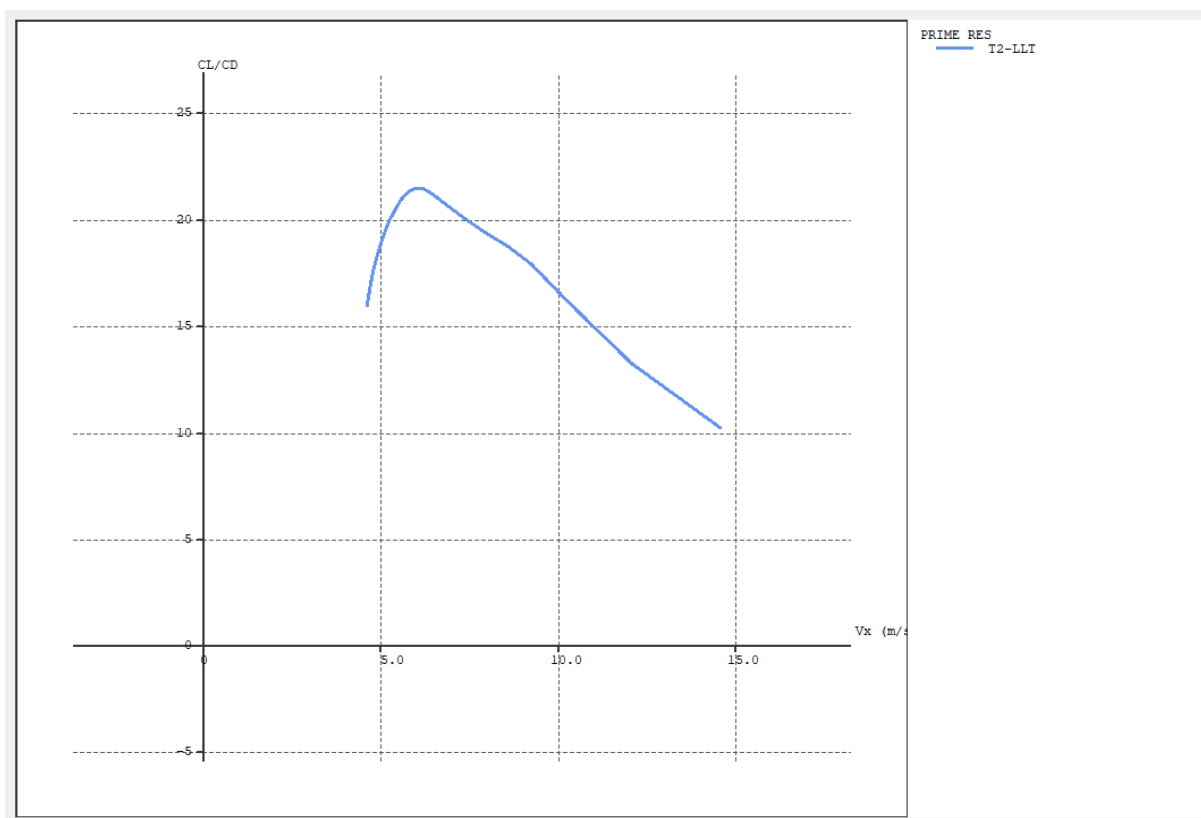
Slika 5.8. Rezultati analize modela krila jedrilice klase F3L

Na slici 5.9. prikazan je dijagram koji prikazuje odnos vertikalne brzine (brzine spuštanja) i horizontalne brzine leta modela zrakoplova, što daje pravu sliku performansi jedrilice, bilo da je riječ o modelu ili jedrilici pune veličine. Iz slike 5.9. se vidi da povećanjem napadnog kuta brzina spuštanja opada, ali se i brzina leta smanjuje. Model ima najmanju brzinu spuštanja nešto ispred brzine gubitka uzgona, što znači da bi model teoretski mogao postići brzinu spuštanja od samo 0,26 m/s pri brzini leta od 5,2 m/s. Za pilota koji želi ostati što je dulje moguće u zraku kada je atmosfera mirna, bitno je da ostvari što manju brzinu spuštanja, dok pilot koji želi postići najveći mogući dolet mora odabrati napadni kut koji omogućuje najveći dolet. U proračunu za dolet i istrajnost moći će se očitati vrijednosti za brzinu leta i vertikalnu brzinu pri ravnotežnom letu sa dijagrama na slici 5.9.

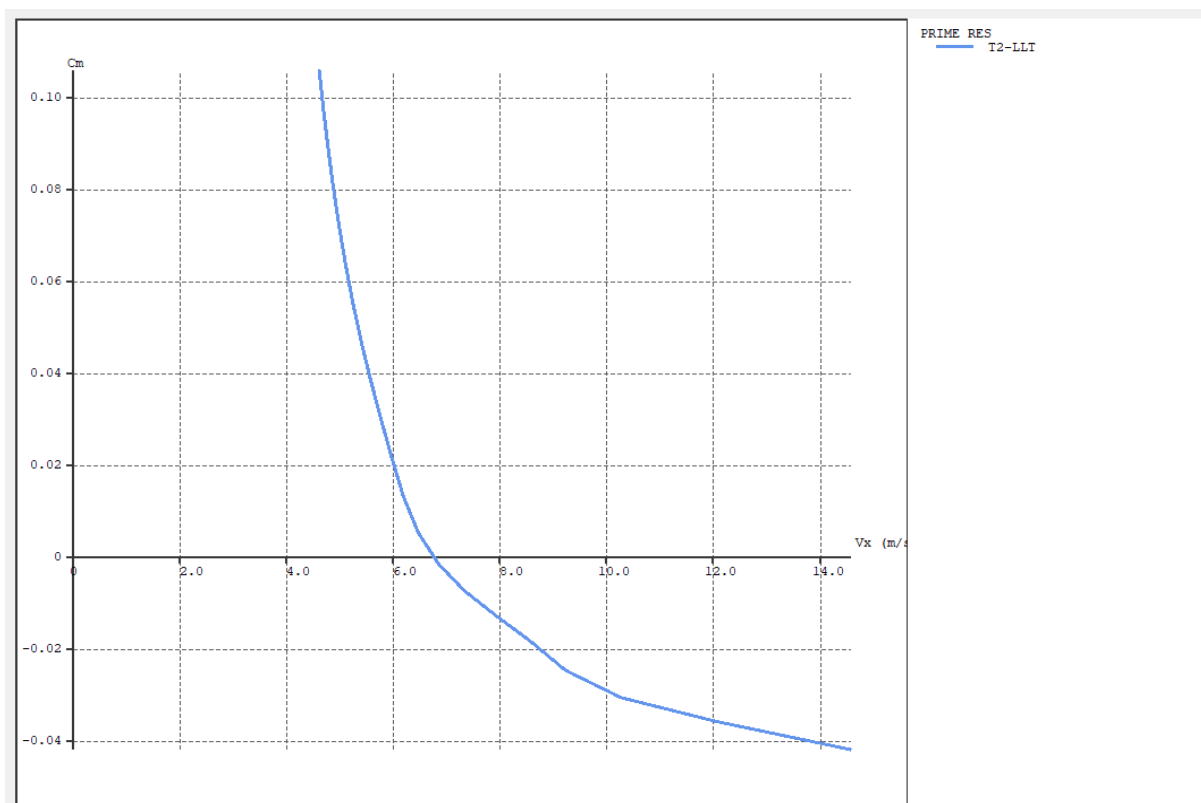


Slika 5.9. Odnos brzine spuštanja i brzine leta jedrilice Prime RES

Drugi, jasniji način proučavanja, je odnos omjera klizanja i brzine leta prikazan je na slici 5.10. Grafikon prikazuje maksimalnu točku klizanja i brojčanu vrijednost omjera koja teoretski iznosi više od 21 za brzinu leta od 6 m/s. Svako odstupanje od optimalne brzine leta predstavlja značajan gubitak učinkovitosti. Za standardne uvjete bitno je odrediti kojom brzinom model krila ostvaruje ravnotežni let, odnosno kada je moment propinjanja CM jednak nuli. S dijagrama na slici 5.11. koji predstavlja ovisnost momenta propinjanja o brzini leta, očita se brzina leta kada linija presijeca horizontalnu os, te ona iznosi 6,8 m/s, dok je napadni kut  $2,5^\circ$ . Također je vidljivo da povećanjem brzine od idealne (6,8 m/s), moment propinjanja postaje negativan, što uzrokuje spuštanje nosa modela, dok smanjenjem brzine moment propinjanja postaje pozitivan i nos modela se podiže.

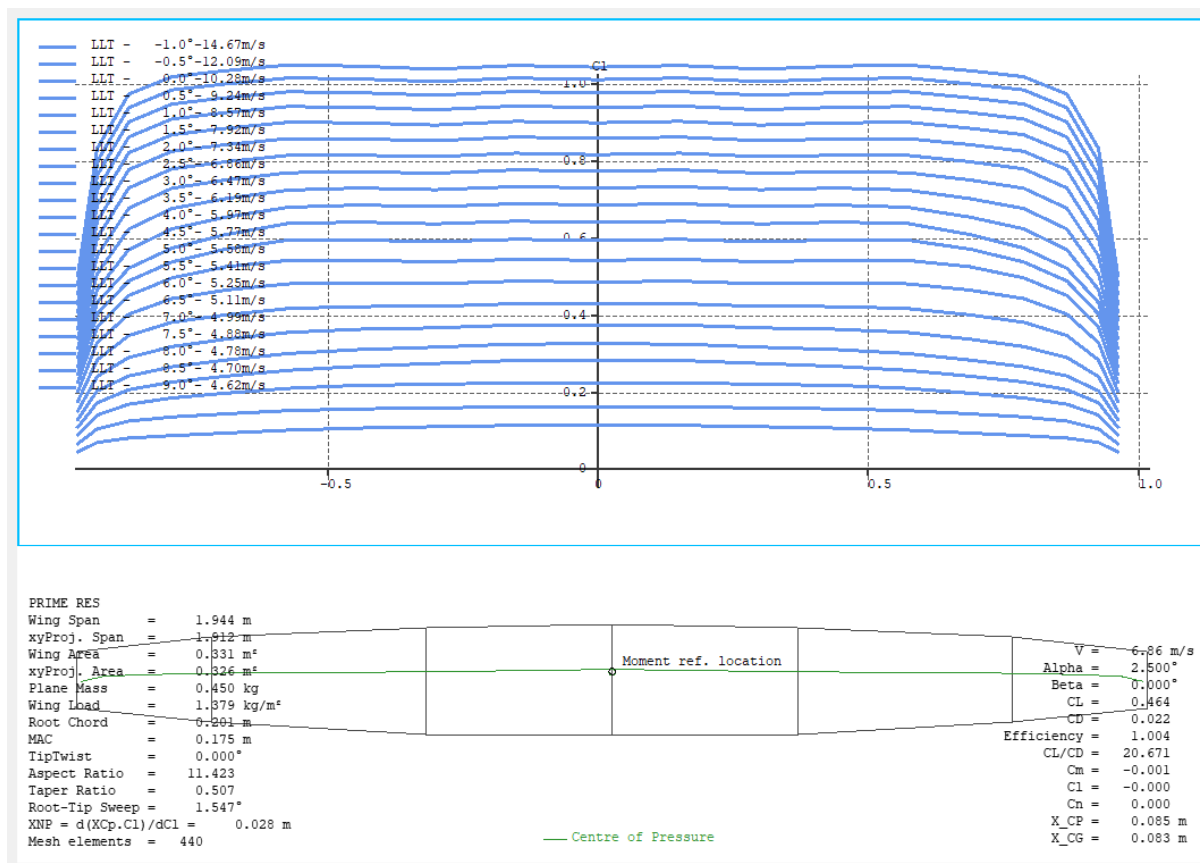


Slika 5.10. Omjer klizanja i brzine leta jedrilice Prime RES



Slika 5.11. Omjer momenta propinjanja i brzine leta jedrilice Prime RES

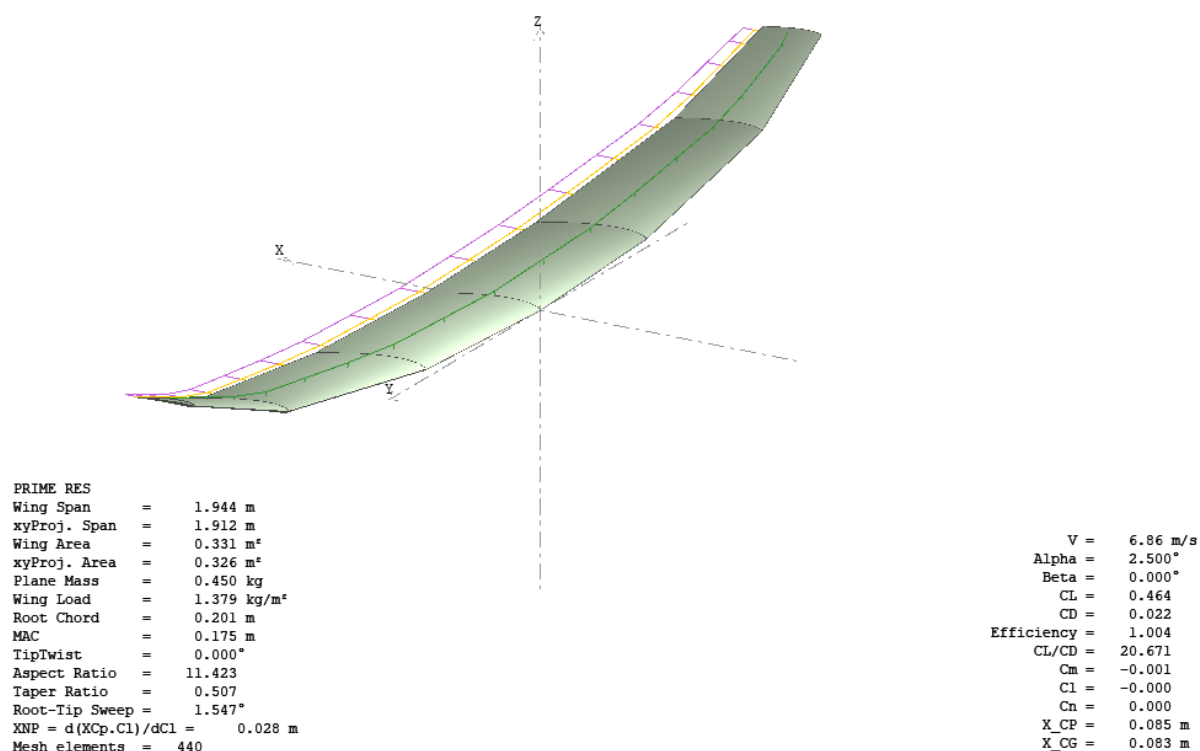
Na slici 5.12. prikazan je iznos koeficijenta uzgona po rasponu krila za pripadne napadne kutove i brzinu leta za taj napadni kut. Iz rezultata se vidi relativno konstantan koeficijent uzgona po rasponu krila, sa padom uzgona na vrhu krila što se podudara sa podacima analize pojedinačnih aeroprofila prema dijagramu na slici 5.3. Najveći koeficijent uzgona ostvaruje se za najveći napadni kut, dok se smanjenjem napadnog kuta i koeficijent uzgona smanjuje.



Slika 5.12. Prikaz koeficijenta uzgona po rasponu krila za različite napadne kutove jedrilice  
Prime RES

Na slici 5.13. prikazan je model krila u ravnotežnom letu za napadni kut od 2,5° i brzinu leta od 6,86 m/s. Na slici su prikazani raspodjela uzgona (zeleno), induciranog otpora (žuto) i viskoznog otpora (ljubičasto) po rasponu krila. Iz rezultata je vidljivo da je viskozni otpor dvostruko veći od induciranog otpora u ravnotežnom letu, dok se s povećanjem napadnog kuta i ostvarivanjem većeg uzgona vrijednosti otpora izjednačuju.

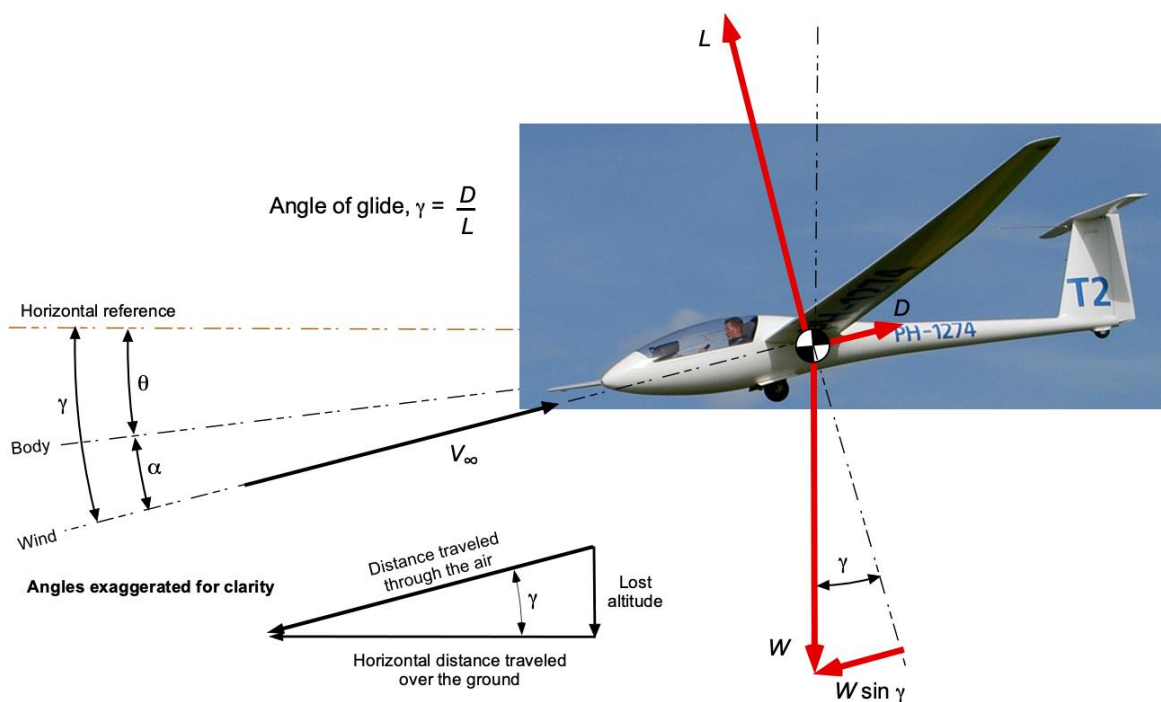




Slika 5.13. Model Prime RES krila u ravnotežnom letu

## 5.4. Dolet i očekivano trajanje leta

Za izračun doleta i istrajnosti pretpostavlja se ravnotežan let u kojem je uzgon jednak težini zrakoplova (krila), odnosno  $L = W \cdot \cos|\gamma|$  prikazano slikom 5.14. Masa krila iznosi 0,45 kg. Veličina kuta spuštanja  $\gamma$  izračunata je pomoću koeficijenata uzgona i otpora u ravnotežnom letu kada krivulja koeficijenta momenta propinjanja  $C_M$  u odnosu na napadni kut  $\alpha$  presijeca horizontalnu os. Koeficijenti uzgona i otpora očitani su iz donjeg desnog kuta na slici 5.13. Iz istih podataka može se i očitati i brzina leta potrebna za izračun brzine spuštanja, te iznosi 6,86 m/s. Početna visina spuštanja u prikazanom proračunu iznosi 70 metara, dok je u tablici 5.2. prikazan dolet i trajanje leta za različite početne visine leta od 50, 60, 70, 80, 90 i 100 metara. Najčešća početna visina iznosi približno 70 metara, te se ona ubraja u više, dok se visine od 90 i 100 metara rijetko ostvaruju. Visine starta od 50 m ili 60 m se također ostvaruju u slučaju nešto lošijeg starta ili bočnog vjetra.



Slika 5.14. Sile na zrakoplov tijekom spuštanja [12]

Podatci potrebni za izračun performansi modela jedrilice prikazani su na slici 5.15..

|              |          |
|--------------|----------|
| V =          | 6.86 m/s |
| Alpha =      | 2.500°   |
| Beta =       | 0.000°   |
| CL =         | 0.464    |
| CD =         | 0.022    |
| Efficiency = | 1.004    |
| CL/CD =      | 20.671   |

Slika 5.15. Podatci za proračun u ravnotežnom letu očitani u programu XFLR5

Kut spuštanja:

$$|\gamma| = \tan^{-1} \left| \frac{C_D}{C_L} \right| = \tan^{-1} \left| \frac{0,022}{0,464} \right| = 2,7^\circ \quad (5.1)$$

Gdje je:

$C_L$  – koeficijent uzgona

$C_D$  – koeficijent otpora

$\gamma$  – kut spuštanja, °

Sila uzgona:

$$L = m \cdot g \cdot \cos|\gamma| = 0,45 \cdot 9,81 \cdot \cos|2,7| = 4,41 \text{ N} \quad (5.2)$$

Gdje je:

$L$  – uzgon, N

$m$  – masa krila, kg

$g$  – gravitacijska konstanta (9,81), m/s<sup>2</sup>

Dolet:

$$X = \frac{H}{\tan|\gamma|} = \frac{70}{\tan|2,7|} = 1447 \text{ m} \quad (5.3)$$

Gdje je:

$X$  – dolet, m

$\gamma$  – kut spuštanja, °

Za izračun istrajnosti, prvo je potrebno odrediti brzinu spuštanja:

$$V_v = V \cdot \sin|\gamma| = 6,86 \cdot \sin|2,7| = 0,3315 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.4)$$

Gdje je:

$V_v$  – brzina spuštanja, m/s

$V$  – brzina leta, m/s

$\gamma$  – kut spuštanja, °

Očekivano trajanje leta:

$$t = \frac{H}{V_v} = \frac{70}{0,3232} = 211 \text{ s} \quad (5.5)$$

Gdje je:

$t$  – vrijeme spuštanja, s

$V_v$  – brzina spuštanja, m/s

Rezultat za očekivano trajanje leta mogao se riješiti i na način da se sa  $V_z, V_x$  dijagrama na slici 5.9. očita brzina spuštanja za ravnotežni let, što znači da se mogu koristiti samo gotove formule (5.1), (5.3) i (5.5) za izračun performansi jedrilice. Izračunato trajanje leta sa visine od 70

metara iznosi 3 minute i 31 sekundi, te bi se pomoću zračnih struja trajanje leta moglo produljiti. Rezultati doleta i trajanja leta za ostale početne visine leta prikazani su u tablici 5.2.

*Tablica 5.2. Prikaz doleta i trajanja leta za različite početne visine leta*

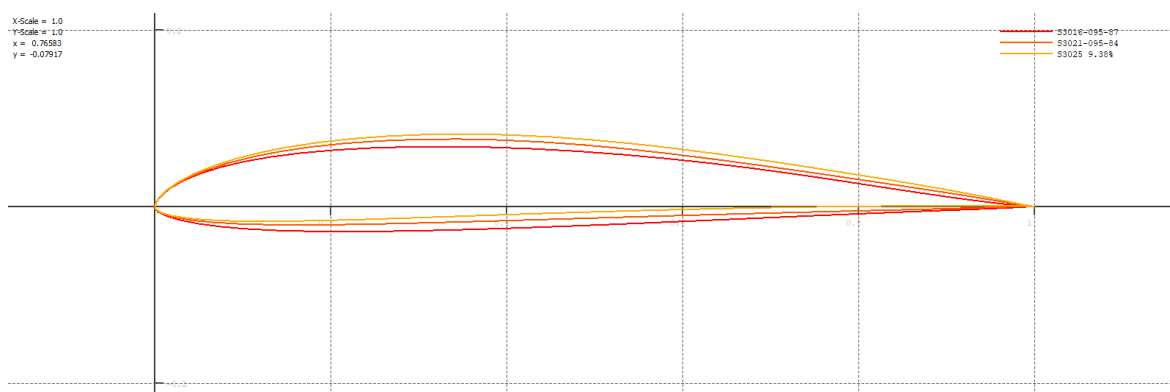
| Početna visina, m | Dolet, m | Trajanje leta, s |
|-------------------|----------|------------------|
| 50                | 1033,6   | 151              |
| 60                | 1240,3   | 181              |
| 70                | 1447     | 211              |
| 80                | 1653,7   | 241              |
| 90                | 1860,4   | 272              |
| 100               | 2067,1   | 302              |

## 6. USPOREDBA ODABRANE GEOMETRIJE JEDRILICE S GEOMETRIJOM SLIČNOG MODELA JEDRILICE

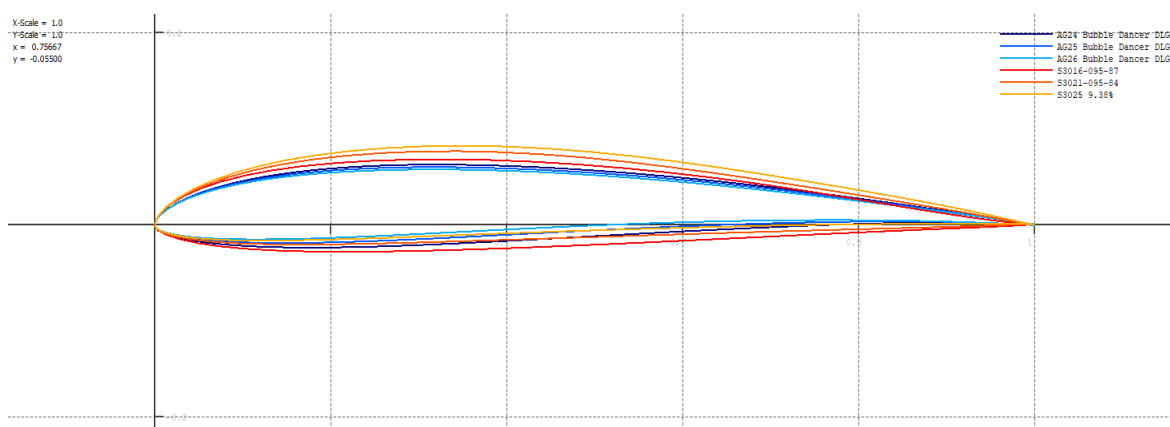
Kako bi se provjerila razina performansi odabranog model jedrilice, za usporedbu je uzet sličan model, također klase F3L naziva Wiki F3L. Postupak analize performansi je identičan kao i za originalni model jedrilice, a kako bi se što bolje prikazala razlika između dva modela, koristit će se isti projekt u programu XFLR5 kao i za originalni model jedrilice.

### 6.1. Analiza aeroprofila sličnog modela jedrilice

Za aerodinamičku analizu krila također će se koristiti tri aeroprofila. Svako polukrilo sastoji se od tri dijela: središnje ploče, ploče srednjeg krila i ploče vrha krila. Odabrani aeroprofili idu redom od najdebljeg u korijenu krila prema najtanjem u vrhu krila, a to su S3016 za središnju ploču, S3021 za sredinu krila i S3025 za vrh krila, prikazani na slici 6.1. Na slici 6.2. prikazani su i aeroprofili originalnog modela jedrilice, te se vidi da su oni tanji od sličnog modela jedrilice.

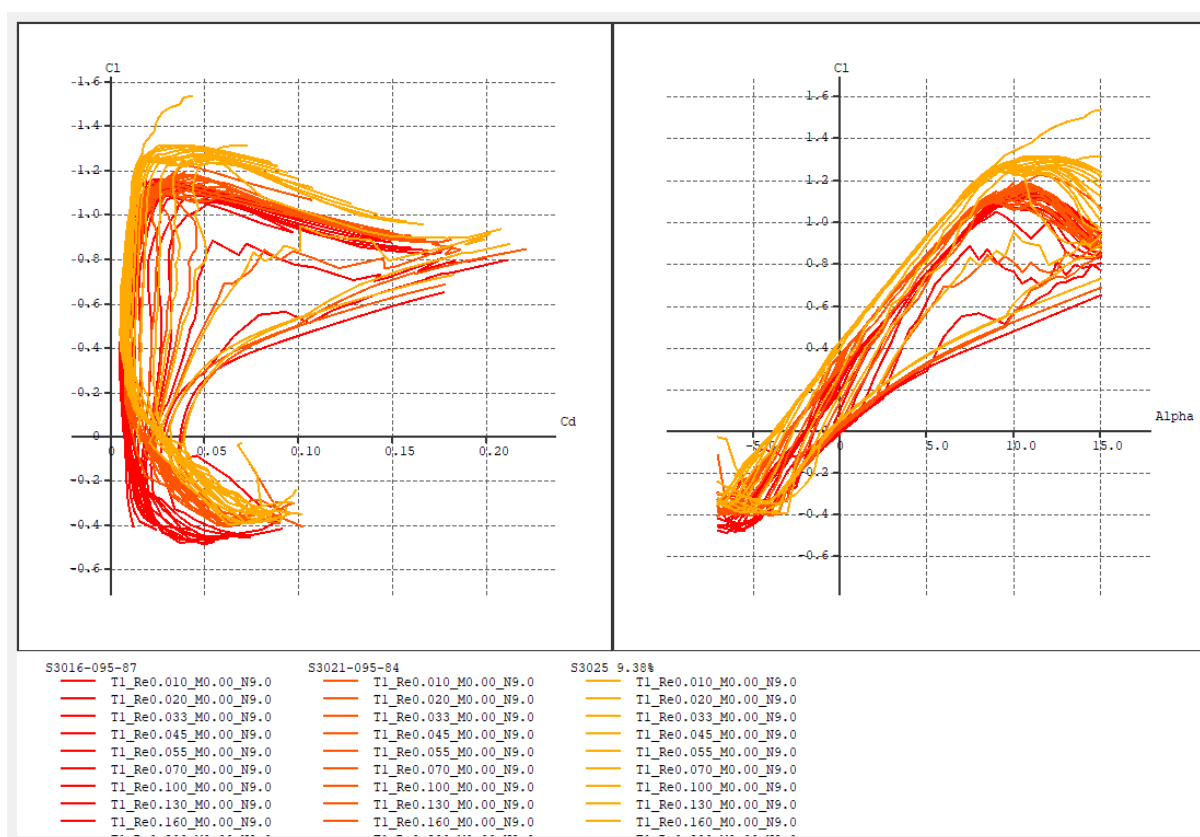


Slika 6.1. Aeroprofili modela jedrilice Wiki F3L



Slika 6.2. Usporedba aeroprofila odabranog i sličnog modela jedrilice

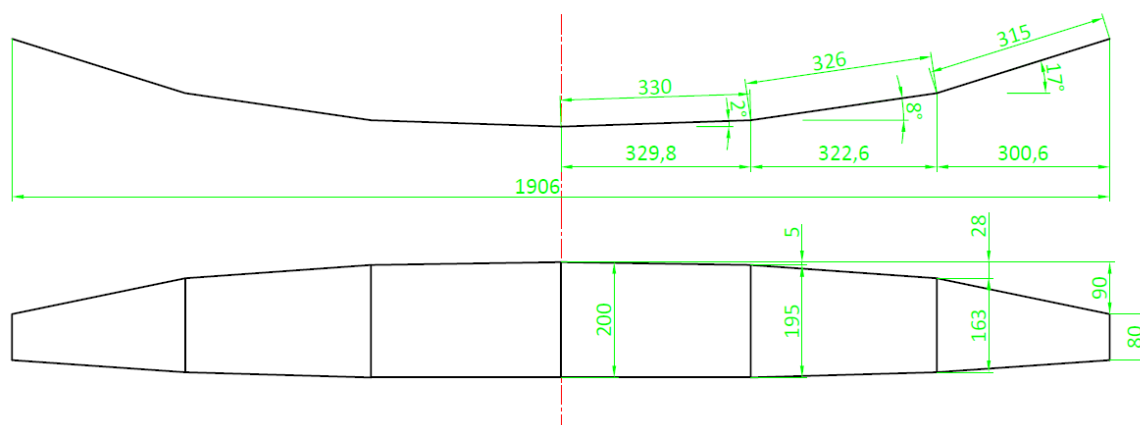
Za analizu aeroprofila modela jedrilice Wiki F3L potrebno je odabrati više Reynoldsovih brojeva nižih vrijednosti s manjom razlikom između njih kako bi se mogla izvršiti analiza krila za veći raspon napadnih kutova. To je prikazano većim brojem polara na slici 6.3. Nedovoljna pokrivenost Reynoldsovih brojeva uočava se tek nakon provedene analize krila kada je u rezultatima analize mali raspon napadnih kutova. Tada je potrebno vratiti se u analizu aeroprofila i provesti analizu za Reynoldsove brojeve koji povećavaju gustoću polara.



Slika 6.3. Rezultati analize aeroprofila S3016, S3021 i S3025

## 6.2. Analiza krila sličnog modela jedrilice

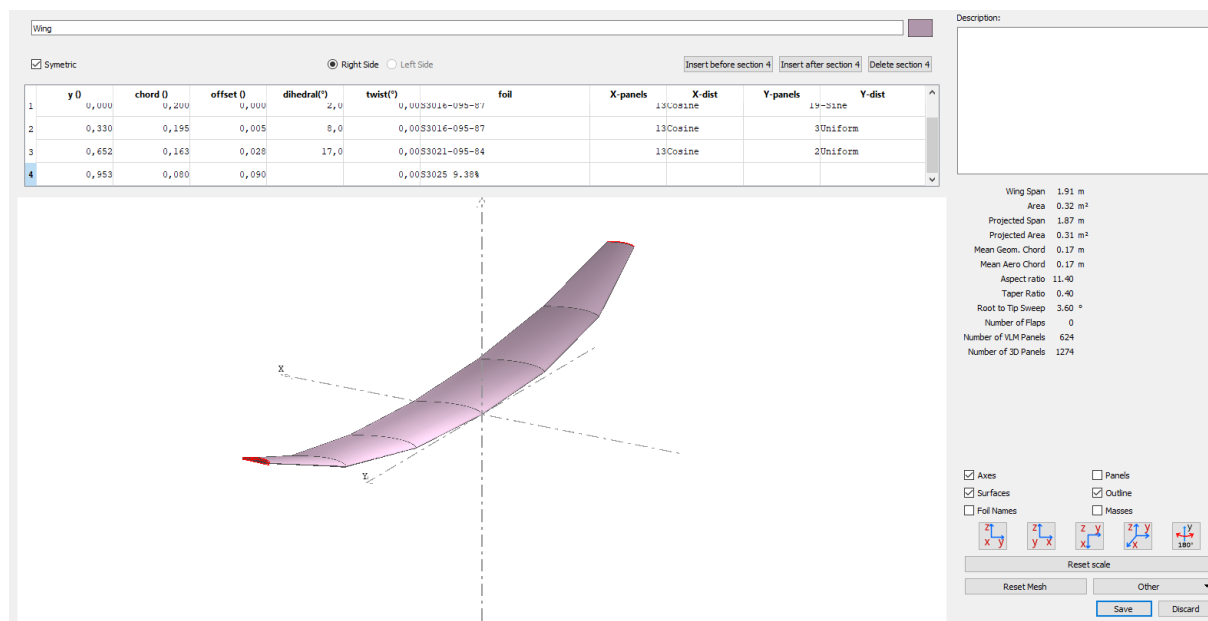
Postupak modeliranja krila identičan je opisanom postupku modeliranja originalnog modela jedrilice. Podatci o dimenzijama krila potrebnima za definiranje geometrije u programu XFLR5 prikazani su na slici 6.4. i u tablici 6.1. Masa krila iznosi 0,370 kg. Modeliranje krila modela jedrilice Wiki F3L u programu XFLR5 prikazano je na slici 6.5., a gotovi model sa pripadnim aeroprofilima na slici 6.6.



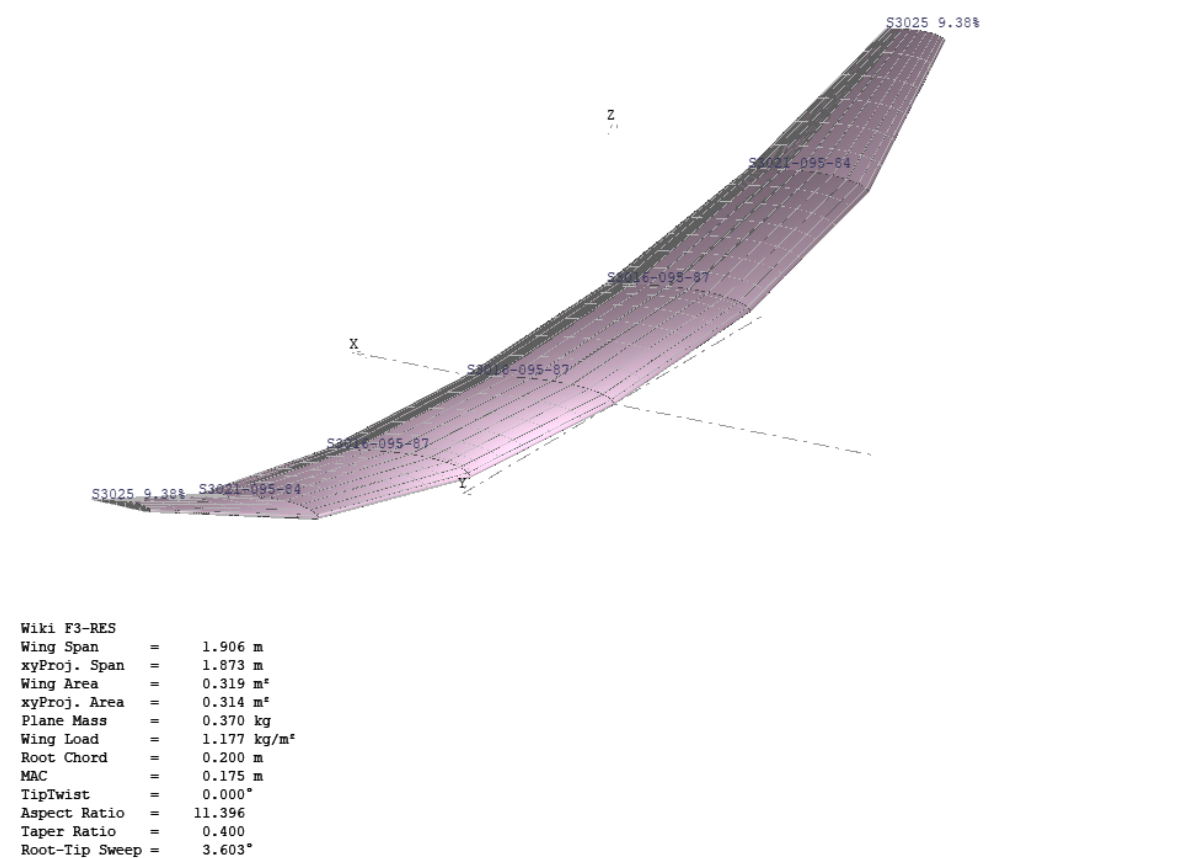
Slika 6.4. Geometrijske značajke krila u nacrtu i tlocrtu - mjere krila korištene za proračunski model Wiki F3L

Tablica 6.1. Prikaz glavnih geometrijskih značajki krila modela Wiki F3L potrebnih za definiranje krila u programu XFLR5

| Značajka                          | Oznaka i vrijednost        |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Raspon krila                      | $b^* = 1,906 \text{ m}$    |
| Raspon jedne središnje ploče      | $b_1^* = 0,3298 \text{ m}$ |
| Raspon jedne ploče srednjeg krila | $b_2^* = 0,3226 \text{ m}$ |
| Raspon jedne ploče vrha krila     | $b_3^* = 0,3006 \text{ m}$ |
| Korijenska tetiva                 | $c_t^* = 0,2 \text{ m}$    |
| Tetiva kraja središnje ploče      | $c_1^* = 0,195 \text{ m}$  |
| Tetiva kraja ploče srednjeg krila | $c_2^* = 0,163 \text{ m}$  |
| Vršna tetiva                      | $c_t^* = 0,08 \text{ m}$   |



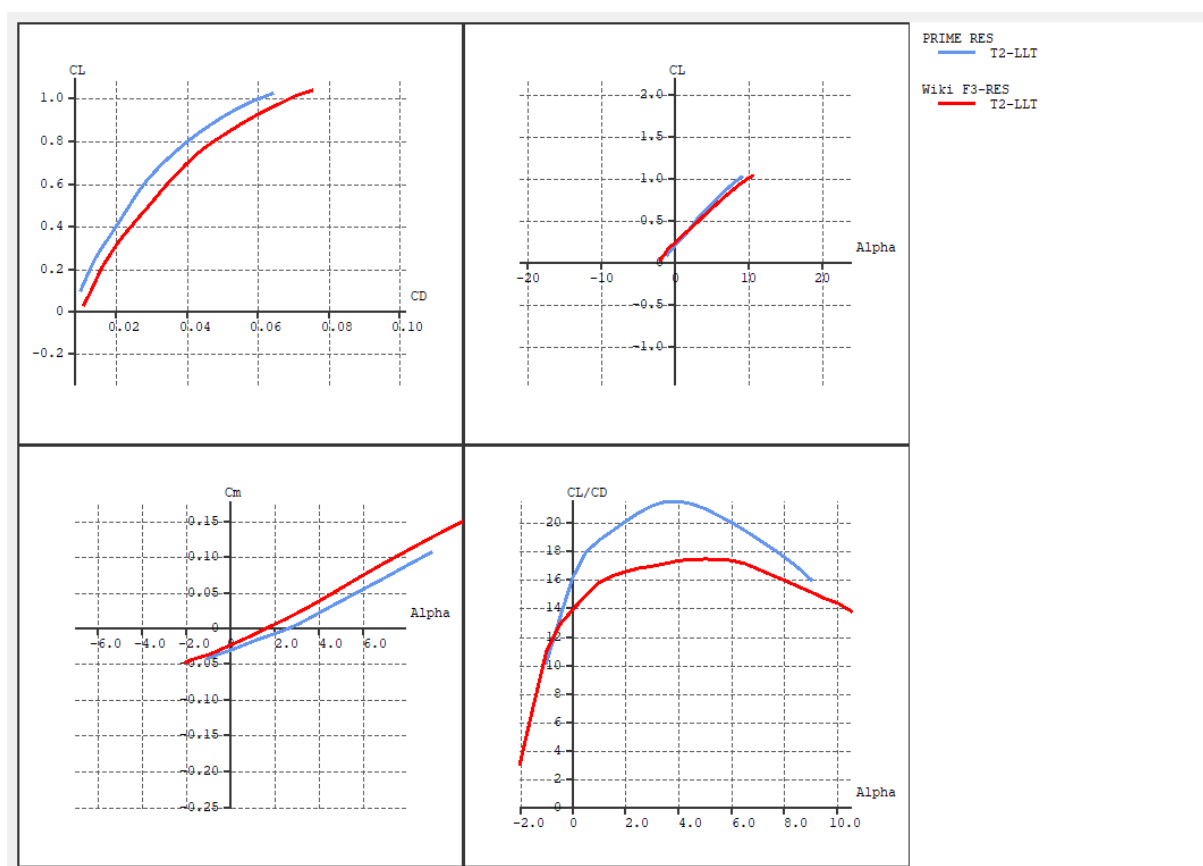
Slika 6.5. Projektiranje krila modela jedrilice Wiki F3L u programu XFLR5



Slika 6.6. Model krila jedrilice Wiki F3L s pripadnim aeroprofilima u programu XFLR5

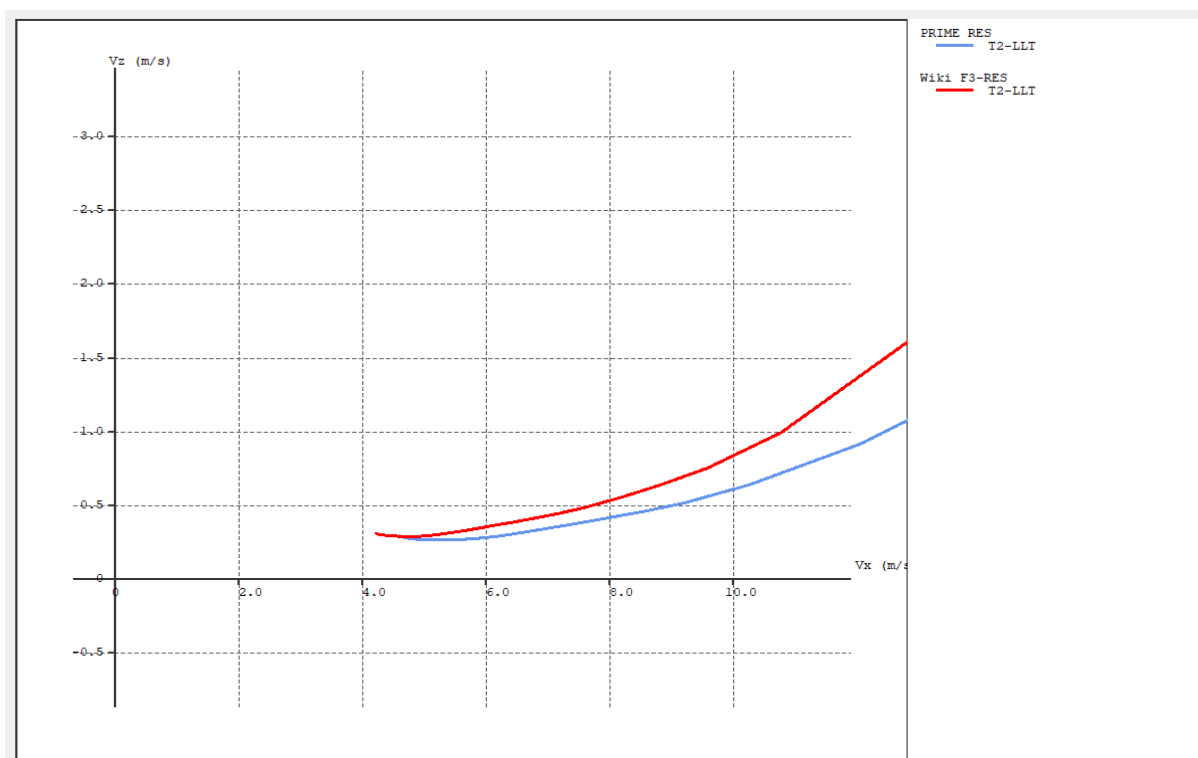


Metoda za analizu krila modela jedrilice Wiki F3L će biti ista kao i za originalni model „Type 2“, odnosno analiza s konstantnim uzgonom. Raspon promjene napadnog kuta za analizu krila će biti isti, od  $-7^\circ$  do  $12^\circ$ , s korakom od  $0,5^\circ$ . Rezultati analize prikazani su na slici 6.7.

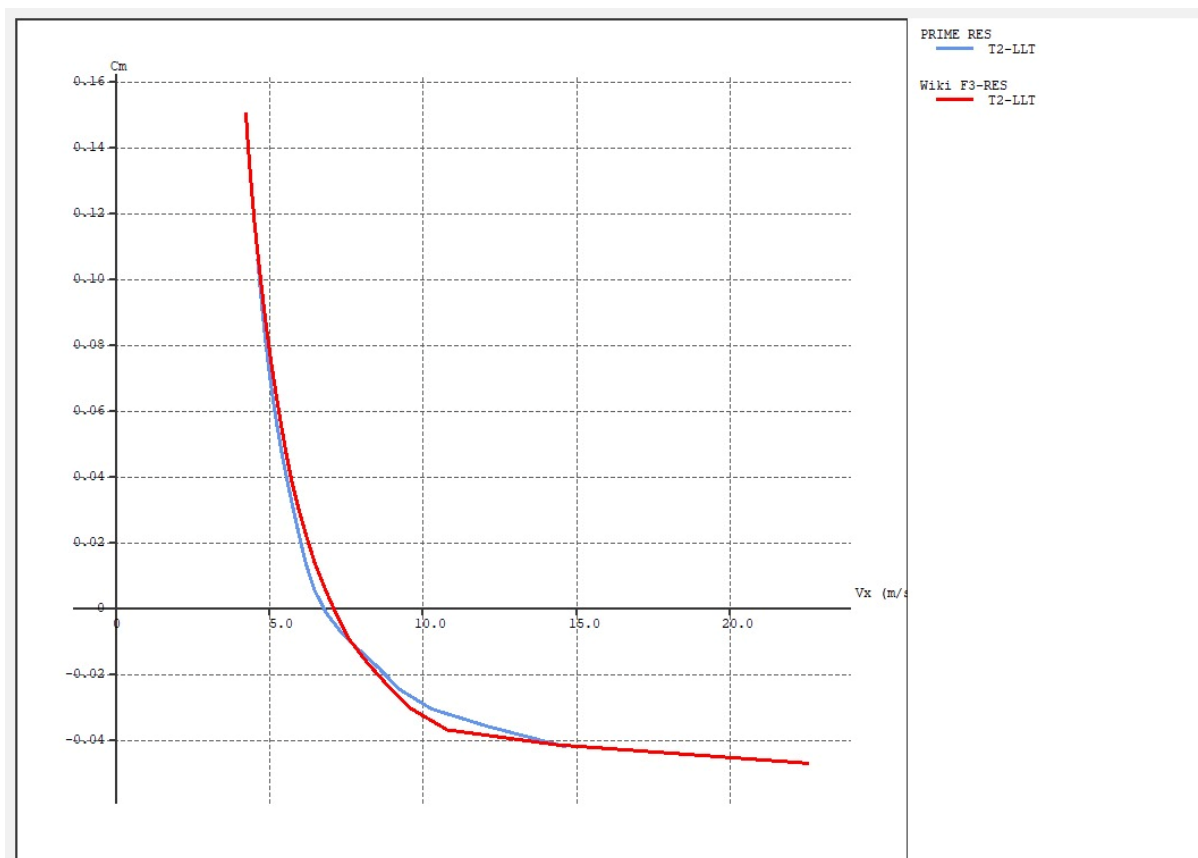


Slika 6.7. Usporedba rezultata analize modela krila originalnog i sličnog modela krila

Iz rezultata prema slici 6.7. uočava se da za isti koeficijent uzgona, model jedrilice Wiki F3L ima veći koeficijent otpora prema  $C_L, C_D$  dijagramu, što negativno utječe na performanse leta. Također za napadne kutove veće od  $2^\circ$  originalni model ostvaruje veći koeficijent uzgona za isti napadni kut. Prema  $C_m, \alpha$  dijagramu vidi se da model Wiki F3L ravnotežni let ostvaruje za napadni kut od  $1,5^\circ$ . Iz dijagrama koji prikazuje odnos vertikalne brzine (brzine spuštanja) i horizontalne brzine leta prikazan na slici 6.8., vidljivo je da model jedrilice Wiki F3L ima veću najmanju teoretsku brzinu spuštanja od 0,29 m/s za napadni kut od  $7^\circ$ , dok kod originalnog modela iznosi 0,26 m/s za napadni kut od  $6^\circ$ . Za ravnotežni let prema slici 6.8. brzina spuštanja iznosi 0,44 m/s, dok prema slici 6.9., brzina leta  $V_x$  iznosi 7,17 m/s.

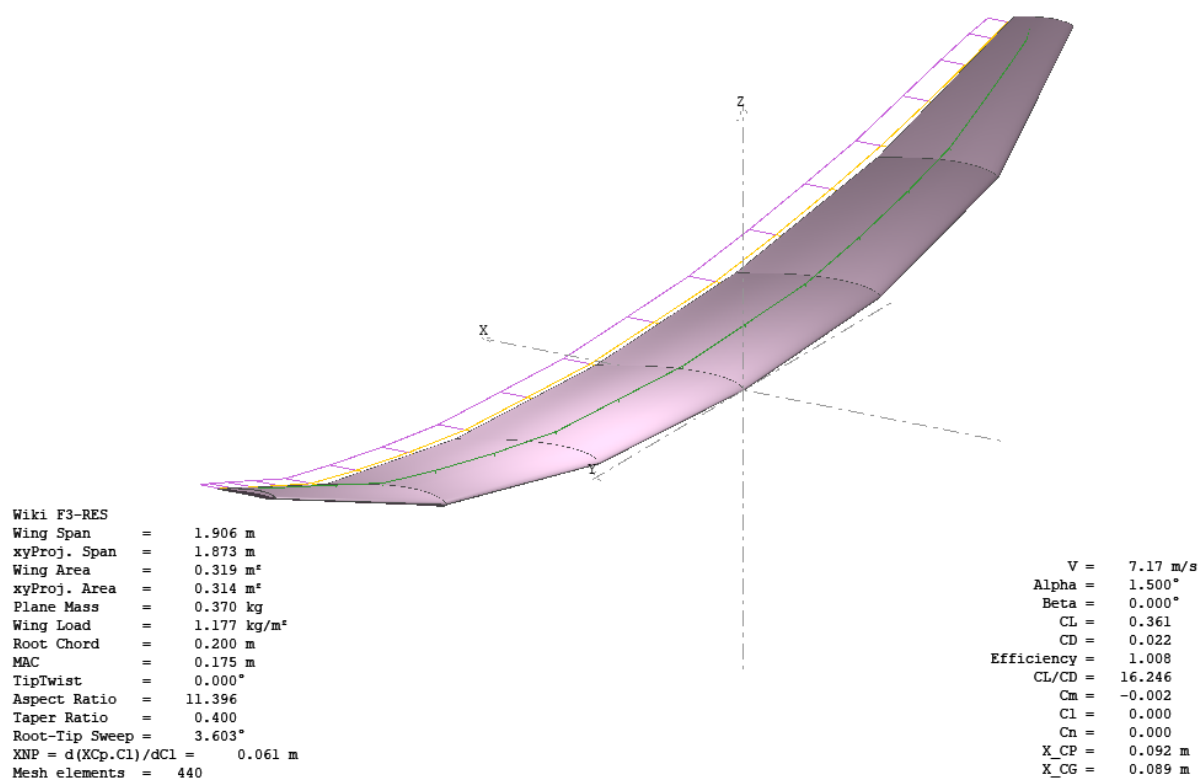


Slika 6.8. Usporedba odnosa brzine spuštavanja i brzine leta jedrilice Prime RES i Wiki F3L



Slika 6.9. Omjer momenta propinjanja i brzine leta jedrilice Prime RES i Wiki F3L

Na slici 6.10. prikazan je model krila jedrilice Wiki F3L u ravnotežnom letu za napadni kut od  $1,5^\circ$  i brzinu leta  $7,17$  m/s. Rezultati prikazuju slične vrijednosti kao i kod originalnog modela Prime RES. Viskozni otpor (ljubičasto) je znatno veći od induciranog otpora u ravnotežnom letu.



Slika 6.10. Model krila jedrilice Wiki F3L u ravnotežnom letu

### 6.3. Usporedba doleta i očekivanog trajanja leta modela Prime RES i Wiki F3L

Za izračun doleta i vremena trajanja leta korištene su formule 5.1, 5.3, 5.4 i 5.5. Potrebni podatci očitani su sa dijagrama za ravnotežni let kada je  $C_M = 0$ . Ravnotežni napadni kut  $\alpha_{rav}$  iznosi  $1,5^\circ$ , dok je brzina spuštanja od  $0,44$  m/s očitana iz  $V_z, V_x$  dijagrama prema slici 6.8., te je također i izračunata formulom 6.3. Podatci za ravnotežan let potrebni za izračun kuta spuštanja prikazani su na slici 6.11. u donjem desnom uglu. U prikazanom proračunu početna visina spuštanja iznosi  $70$  metara, isto kao i kod originalnog modela. Usporedba rezultata doleta i istrajnosti modela jedrilica Prime RES i Wiki F3L za početne visine leta  $50, 60, 70, 80, 90$  i  $100$  metara prikazani su u tablici 6.2.

Kut spuštanja:

$$|\gamma^*| = \tan^{-1} \left| \frac{C_D^*}{C_L^*} \right| = \tan^{-1} \left| \frac{0,022}{0,361} \right| = 3,5^\circ \quad (6.1)$$

Gdje je:

$C_L^*$  – koeficijent uzgona

$C_D^*$  – koeficijent otpora

$\gamma^*$  – kut spuštanja, °

Dolet:

$$X^* = \frac{H}{\tan|\gamma^*|} = \frac{70}{\tan|3,5|} = 1137,2 \text{ m} \quad (6.2)$$

Gdje je:

$X^*$  – dolet, m

$\gamma^*$  – kut spuštanja, °

Za izračun istrajnosti, prvo je potrebno odrediti brzinu spuštanja:

$$Vv^* = V^* \cdot \sin|\gamma^*| = 7,17 \cdot \sin|3,5| = 0,4405 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.3)$$

Gdje je:

$Vv^*$  – brzina spuštanja, m/s

$V^*$  – brzina leta, m/s

$\gamma^*$  – kut spuštanja, °

Očekivano trajanje leta:

$$t^* = \frac{H}{Vv^*} = \frac{70}{0,4405} = 159 \text{ s} \quad (6.4)$$

Gdje je:

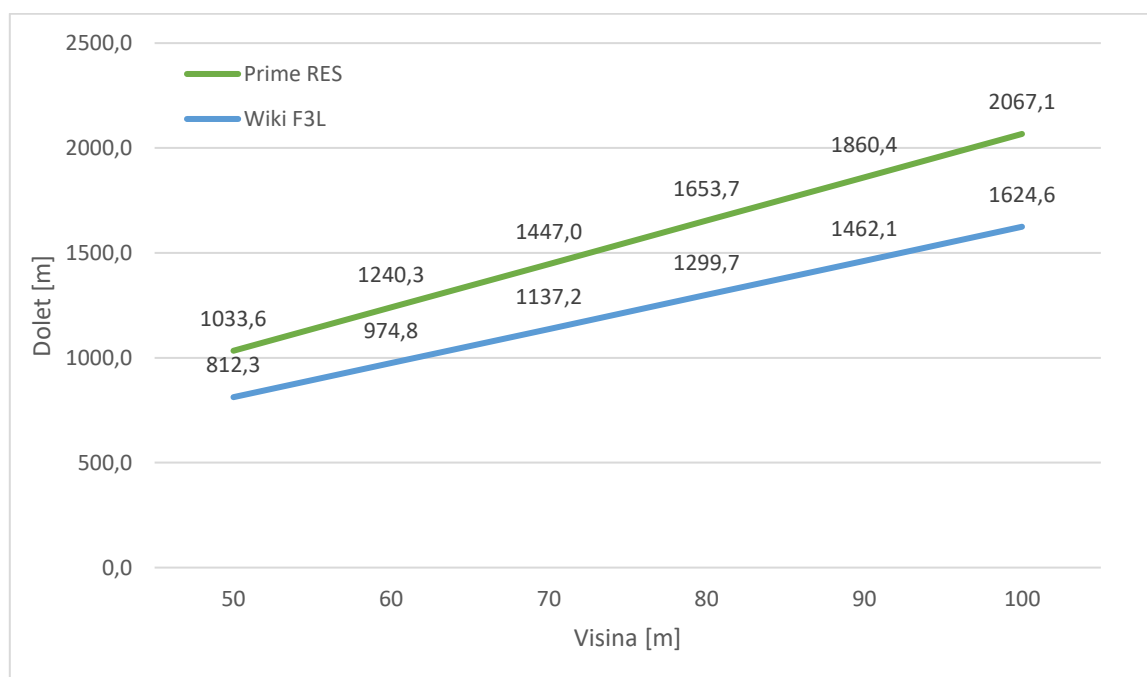
$t^*$  – vrijeme spuštanja, s

$Vv^*$  – brzina spuštanja, m/s

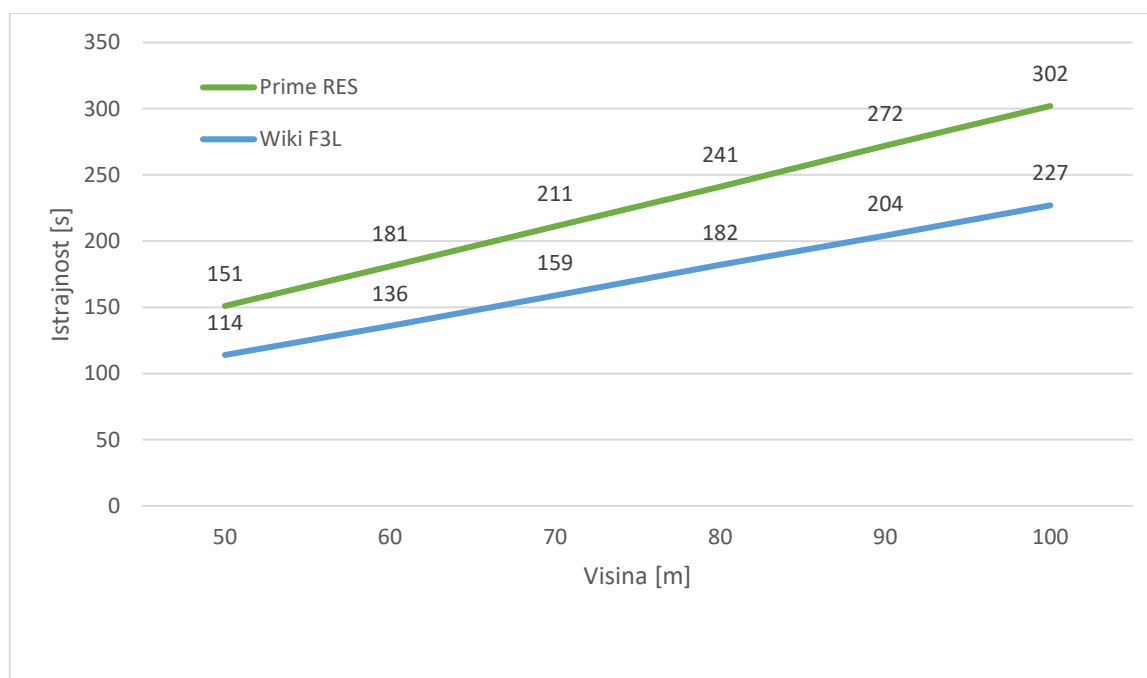
Tablica 6.2. Usporedba doleta i trajanja leta modela jedrilica Prime RES i Wiki F3L(\*) za različite početne visine leta

| Početna visina (m) | Dolet (m) | Trajanje leta (s) | Dolet* (m) | Trajanje leta* (s) |
|--------------------|-----------|-------------------|------------|--------------------|
| 50                 | 1033,6    | 151               | 812,3      | 114                |
| 60                 | 1240,3    | 181               | 974,8      | 136                |
| 70                 | 1447      | 211               | 1137,2     | 159                |
| 80                 | 1653,7    | 241               | 1299,7     | 182                |
| 90                 | 1860,4    | 272               | 1462,1     | 204                |
| 100                | 2067,1    | 302               | 1624,6     | 227                |

Iz rezultata prikazanih u tablici 6.2. vidljivo je da će model jedrilice Prime RES ostvariti 27% veći dolet od modela jedrilice Wiki F3L, te imati 33% dulje trajanje leta za sve iste početne visine leta. Rezultati proračuna su očekivani, jer se već usporedbom provedene analize krila uočilo da Wiki F3L ima veći koeficijent otpora za isti koeficijent uzgona, te prema  $V_z, V_x$  dijagramu ostvaruje veću brzinu spuštanja u ravnotežnom letu. Na slici 6.11. prikazan je dijagram usporedbe doleta u ovisnosti o početnoj visini, dok je na slici 6.12. prikazan dijagram usporedbe trajanja leta o početnoj visini leta za oba modela jedrilica.



Slika 6.11. Usporedba doleta u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L



Slika 6.12. Usporedba istrajnosti u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L

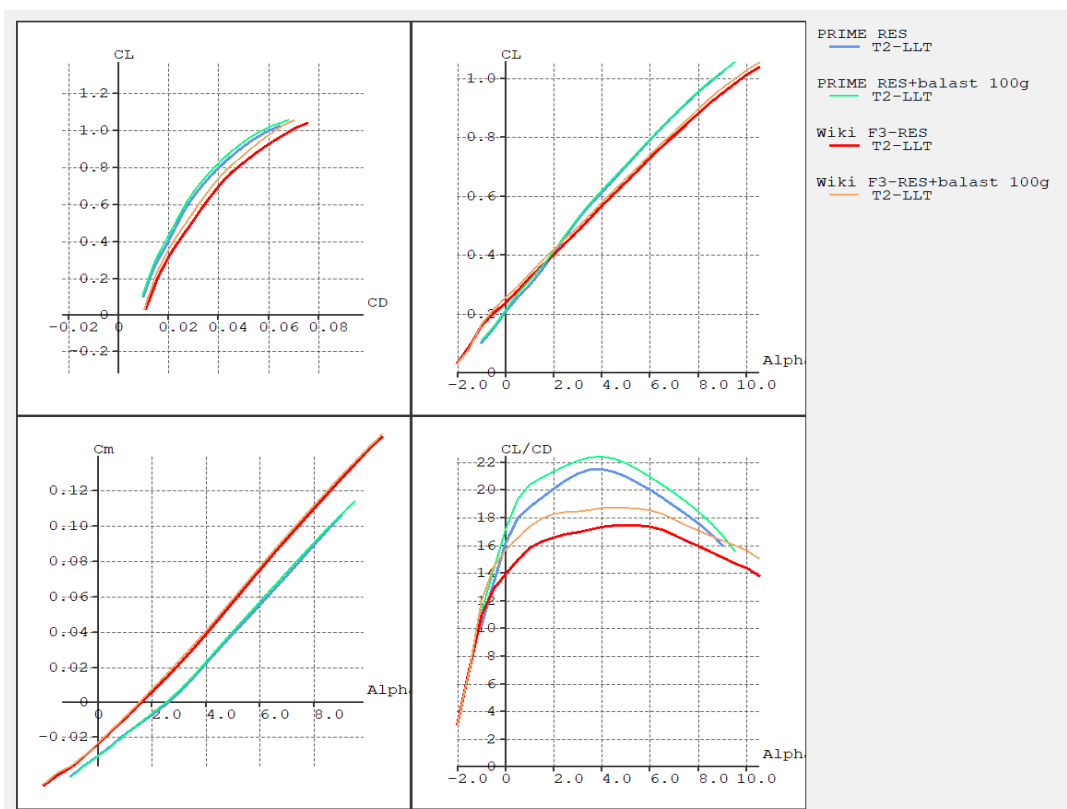
#### 6.4. Usporedba doleta i očekivanog trajanja leta modela jedrilica Prime RES i Wiki F3L s dodanim balastom

Prema pravilniku za klasu F3L, dozvoljeno dodati balast, ali isključivo ako se nalazi unutar trupa i čvrsto je pričvršćen za konstrukciju zrakoplova. Korisno je analizirati utjecaj balasta na performanse modela jedrilica. Balast se dodaje kako bi model jedrilice, u uvjetima jačeg vjetra i većih brzina, lakše održavao pravac leta te bio manje osjetljiv na turbulencije.

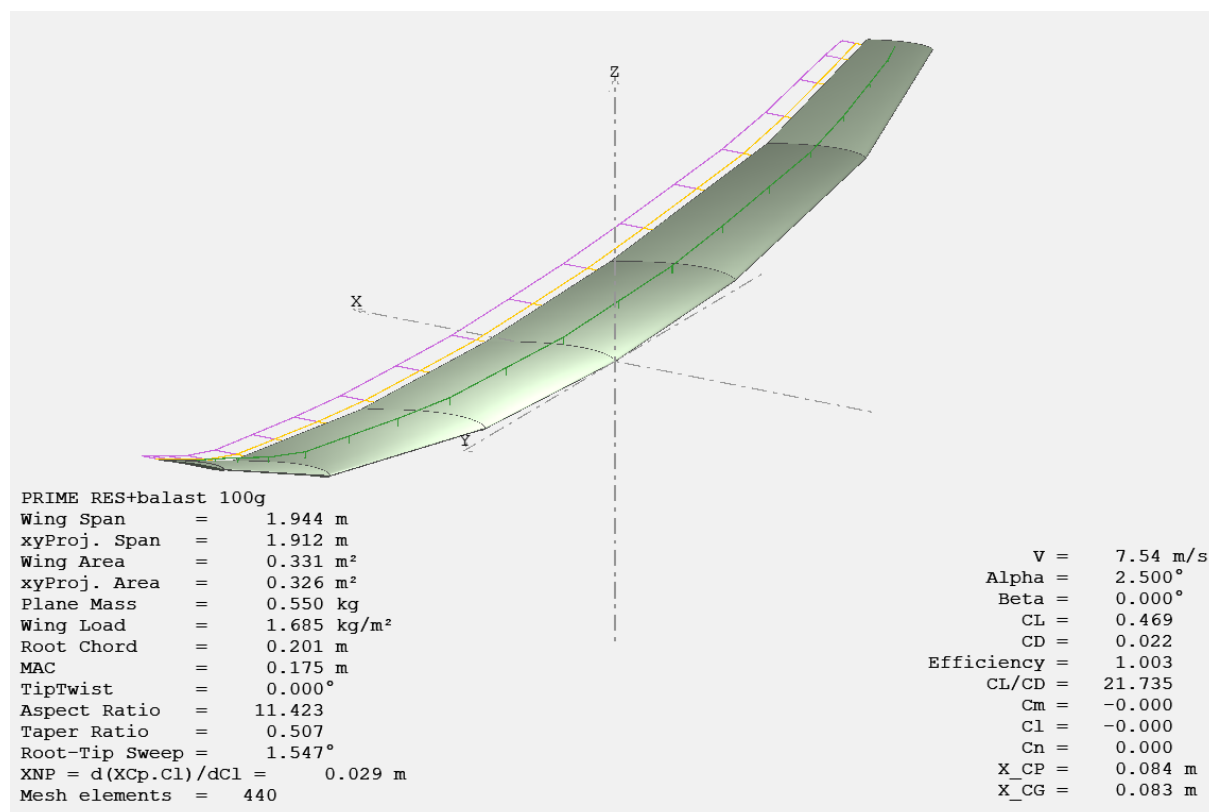
Dodavanjem balasta povećava se moment inercije, što smanjuje osjetljivost modela jedrilice na nagle promjene smjera vjetra i omogućuje glađe reakcije na komande. Balast se obično postavlja u blizinu središta mase kako bi se očuvala ravnoteža modela jedrilice i spriječila promjene karakteristika leta.

U oba modela jedrilica dodan je balast od 100 grama, smješten u središte mase, čime je ravnotežni let postignut uz isti napadni kut kao kod izvornih verzija, što je prikazano na  $C_{M,\alpha}$  dijagramu na slici 6.13. Rezultati prikazani na slici 6.13. pokazuju da je dodavanjem balasta povećan koeficijent uzgona za oba slučaja, pri istom napadnom kutu i koeficijentu otpora, što bi trebalo rezultirati boljim performansama.

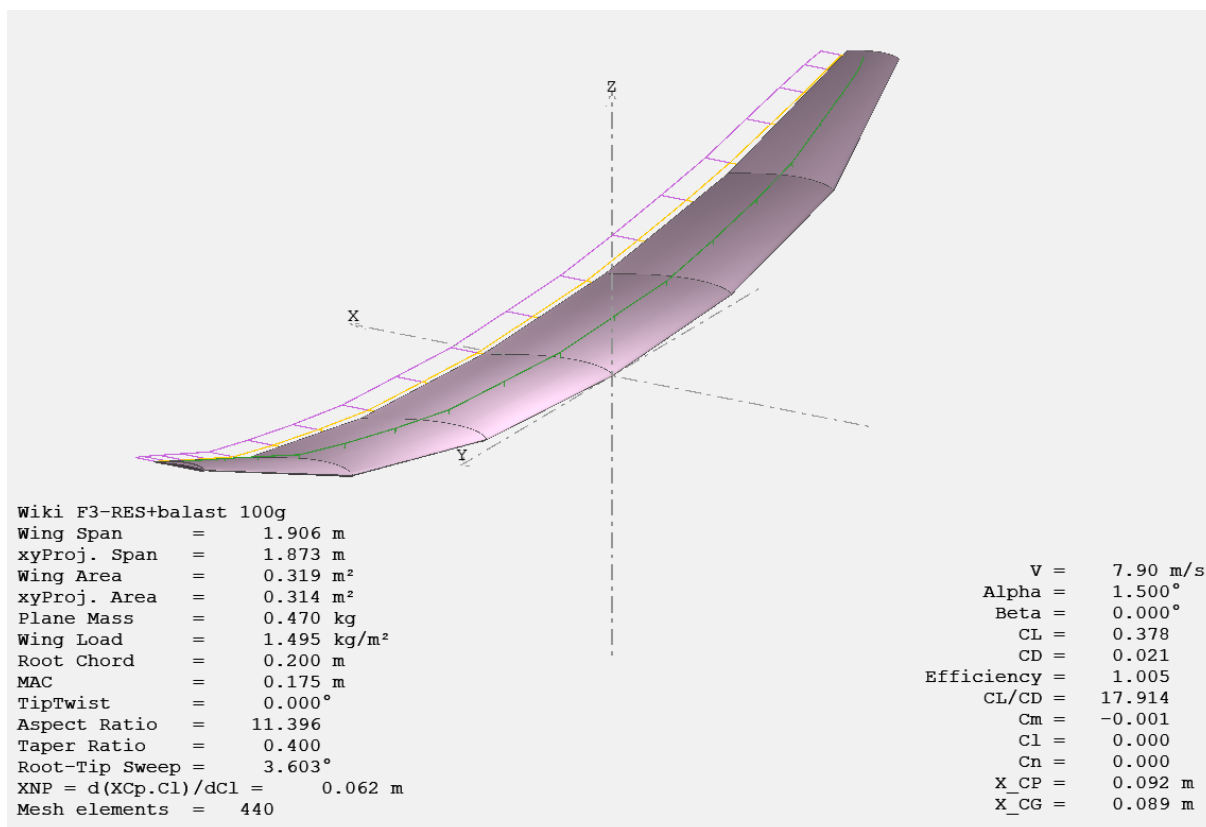
Podatci potrebni za izračun performansi prikazani su na slikama 6.14. i 6.15. u donjem desnom kutu. Također je vidljivo da je, za ravnotežni let, brzina leta povećana u odnosu na originalne modele jedrilica bez balasta.



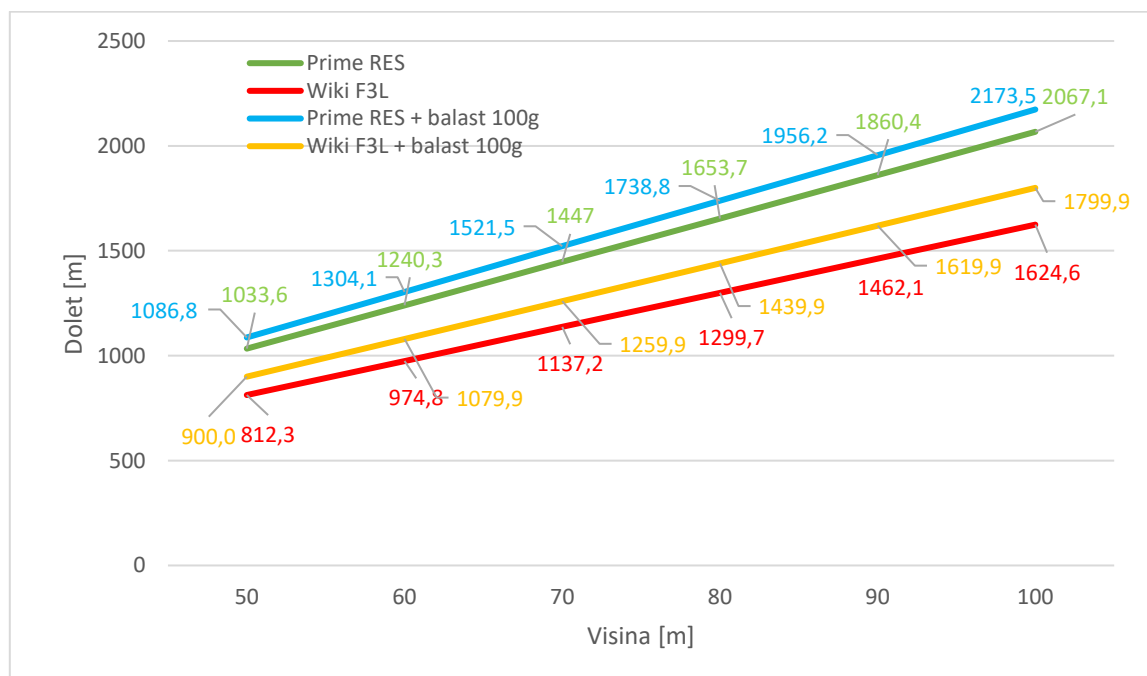
Slika 6.13. Usporedba rezultata analize modela krila originalnog Prime RES i sličnog modela krila Wiki F3L, bez balasta i s dodanim balastom



Slika 6.14. Model krila Prime RES s balastom u ravnotežnom letu

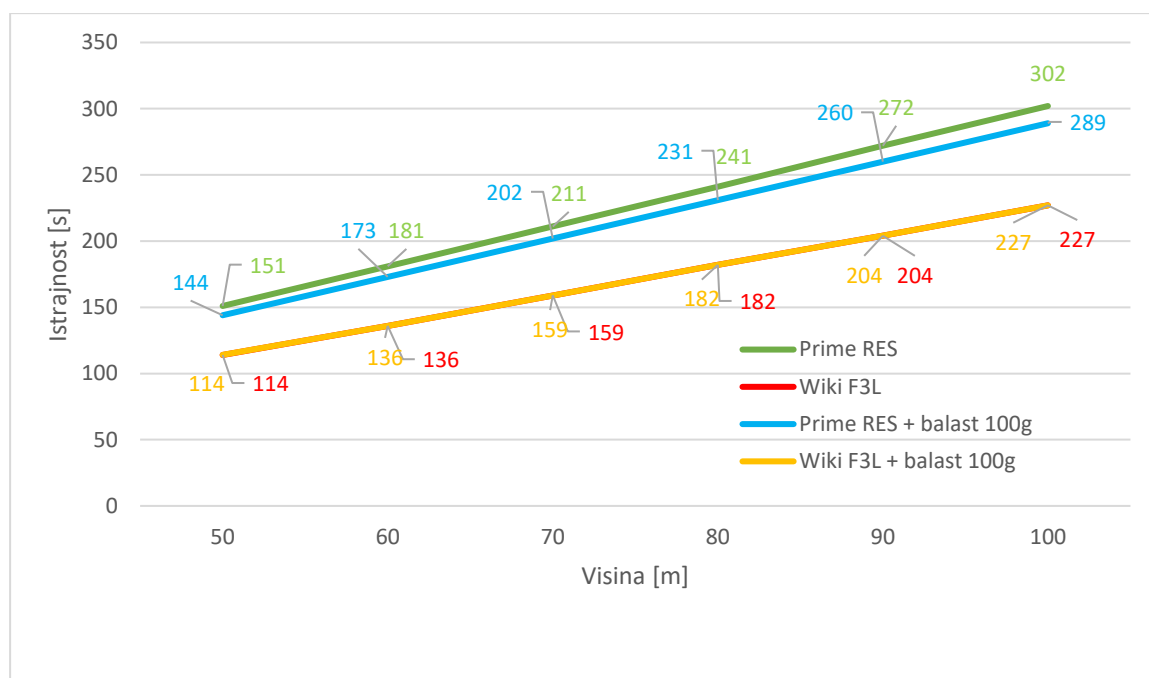


Slika 6.15. Model krila Wiki F3L s balastom u ravnotežnom letu



Slika 6.16. Usporedba doleta u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L, s i bez balasta



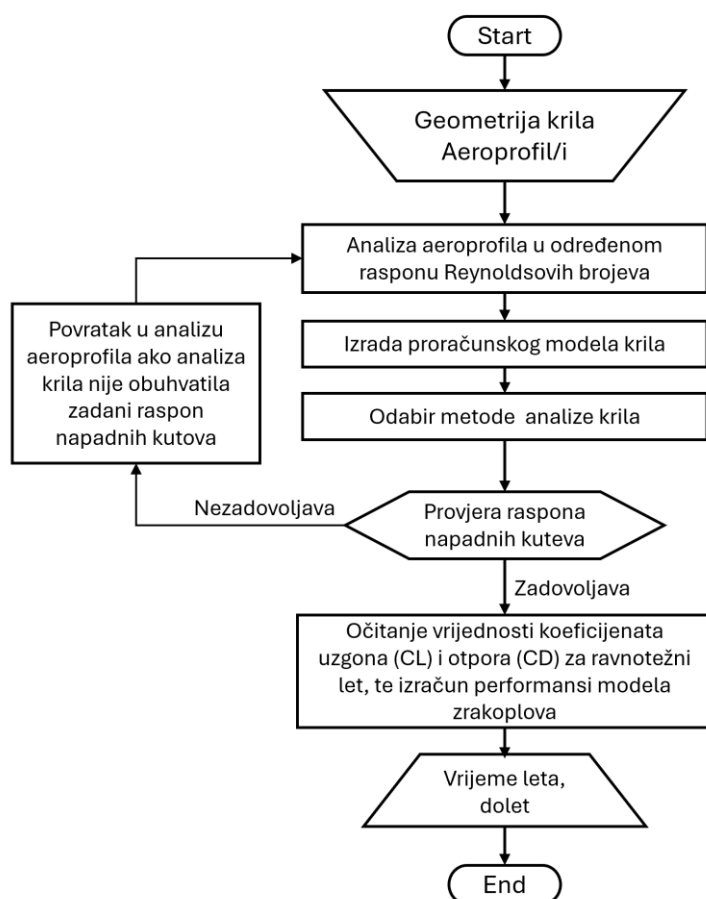


Slika 6.17. Usporedba istrajnosti u ovisnosti o početnoj visini leta za modele jedrilica Prime RES i Wiki F3L, s i bez balasta

Iz rezultata doleta u ovisnosti o početnoj visini leta, prikazanih na slici 6.16., vidi se da model jedrilice Prime RES s dodanim balastom ostvaruje 5 % veći dolet, a model Wiki F3L 10 % veći dolet za sve početne visine leta. Iz rezultata vremena trajanja leta u ovisnosti o početnoj visini leta, prikazanih na slici 6.17., vidljivo je da se vrijeme trajanja leta kod modela jedrilice Prime RES smanjuje za 4 %, dok kod Wiki F3L ostaje nepromijenjeno.

## 7. ZAKLJUČAK

Definiran je način proračuna i usporedbe rezultata s ciljem odabira boljeg rješenja po kriteriju trajanja leta. Postupak analize performansi modela zrakoplova prikazan je blok dijagramom na slici 7.1. Ovim postupkom analize ostvaren je relativno brz, jednostavan i pouzdan način usporedbe različitih modela zrakoplova. Potrebno je poznavati samo aeroprofile koji se koriste za oblikovanje krila, kao i njegove geometrijske značajke. Zadavanjem željene analize, program XFLR5 može prikazati velik broj rezultata na dijagramima, pri čemu se parametri horizontalne i vertikalne osi mogu neovisno mijenjati. Rezultati se također mogu prikazati i na gotovom modelu krila, gdje se mogu vidjeti promjene sile uzgona i veličine otpora u odnosu na napadni kut. Na ovaj način moguće je analizirati i modele zrakoplova koji se tek projektiraju, omogućujući usporedbu manjih promjena geometrije, dodavanje balasta ili odabir drugačijeg aeroprofila. Sve ove prilagodbe mogu rezultirati boljim performansama modela tijekom leta, jer čak i mala poboljšanja mogu donijeti značajnu prednost, osobito u natjecateljskim uvjetima, gdje razlika između prvog i drugog mjesta može biti minimalna.



Slika 7.1. Shematski prikaz postupka analize performansi modela zrakoplova

## 8. LITERATURA

- [1] Službena stranica Međunarodne zrakoplovne federacije (engl. *The Federation Aeronautique Internationale (FAI)*)  
[www.fai.org](http://www.fai.org), 16.2.2025.
- [2] HyperFlight.co.uk – Eli F3L 2m  
<https://www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=ELI&name=eli%2Df3l%2D2m>, 15.12.2024.
- [3] Great Hobbies – Getting Started in Radio Control Sailplanes  
<https://www.greathobbies.com/beginners/rcsailplanes/index.php>, 17.12.2024.
- [4] Zeller – modellbau – oprema za visoki start (engl. hi-start) modela jedrilice klase F3L  
<https://zeller-modellbau.com/zubehoer/zubehoer-res-modelle/res-hochstartset-megatrommel-komplett/>, 15.1.2025.
- [5] Kohlsrsrcmodels – Astrid RES LITE – F3L  
<https://kohlsrsrcmodels.com/en/rc-gliders/41-astrid-res-lite-f3l-f3-res-rc-glider-200cm78in-kit.html>, 28.12.2024.
- [6] CLM Pro - PRIME RES III-KIT-X-TAIL <https://www.clm-pro.com/store-detail/models/kits/pure-gliders/prime-res-iii-x-tail-detail>, 7.1.2025.
- [7] UIUC Airfoil Coordinates Database [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html), 15.2.2025.
- [8] MIT Aero-Astro Magazine  
<https://web.mit.edu/aeroastro/news/magazine/aeroastro-no3/2006drela.html>, 30.1.2025.
- [9] XFLR5 Release Notes <https://www.xflr5.tech/ReleaseNotes.htm>, 2.2.2025.
- [10] Fortran <https://www.ibm.com/history/fortran>, 6.2.2025.
- [11] Aerodynamics for students – 3D vortex lattice method  
<https://www.aerodynamics4students.com/subsonic-aerofoil-and-wing-theory/3d-vortex-lattice-method.php>, 7.2.2025.
- [12] Embry-riddle Aeronautical University  
<https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/gliders-sailplanes>, 15.2.2025.
- [13] Radio Controlled Soaring Digest 2008-02  
<https://www.rcsoaringdigest.com/pdfs/RCSD-2008/RCSD-2008-02.pdf>, 10.2.2025.