



**ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS  
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA**

Arentas Stonys

**PRIEŠSPARNIŲ ĮTAKA LENGVOJO ŠTURMO LÈKTUVO *AERO L-39*  
AERODINAMINÈMS CHARAKTERISTIKOMS  
INFLUENCE OF SLATS ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF LIGHT  
ATTACK AIRCRAFT *AERO L-39***

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS  
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)  
**Vytautas Rimša**  
\_\_\_\_\_  
(Vardas, pavardė)  
\_\_\_\_\_  
(Data)

Arentas Stonys

**PRIEŠSPARNIŲ ĮTAKA LENGVOJO ŠTURMO LĖKTUVO AERO L-39  
AERODINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS  
INFLUENCE OF SLATS ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF LIGHT  
ATTACK AIRCRAFT AERO L-39**

Baigiamasis magistro darbas

Dieninė studijų programa, valstybinis kodas 601H41001  
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

|                                    |                            |                    |                 |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------|
| <b>Vadovas</b>                     | Eduardas Lasauskas         | _____<br>(Parašas) | _____<br>(Data) |
| <b>Konsultantė</b>                 | Gabrielė Masiulionienė     | _____<br>(Parašas) | _____<br>(Data) |
| <b>Konsultantas</b>                | kpt. Kazimieras Chomičenko | _____<br>(Parašas) | _____<br>(Data) |
| <b>Lietuvių kalbos konsultantė</b> | Angelika Petrėtienė        | _____<br>(Parašas) | _____<br>(Data) |

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS FAKULTETAS  
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Dieninė studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
Vytautas Rimša  
(Vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO  
UŽDUOTIS**

2016-11-16 Nr. ....  
Vilnius

Studentui Arentui Stoniui

Baigiamojo darbo tema: „Priešsparnių įtaka lengvojo šturmo lėktuvo *Aero L-39* aerodinaminėms charakteristikoms“, patvirtinta 2017 m. balandžio 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 90ai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201...m. .... d.

**BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:**

- Atlikti literatūros analizę:
  - Priešsparniai ir jų įtaka aerodinaminėms charakteristikoms.
  - Lengvasis šturmo lėktuvas *Aero L-39*.
- Išanalizuoti aerodinaminių tyrimų metodus:
  - Programos XFOIL veikimo metodika.
  - Programos XFLR5 veikimo metodika.
  - Programos JAVA FOIL veikimo metodika.
- Pasirinktais metodais išanalizuoti orlaivio *Aero L-39* sparno profilį ir patį orlaivį su pridėtais priešsparniais.
- Išanalizuoti ir įvertinti gautus darbo rezultatus, parašyti darbo išvadas bei rekomendacijas darbo tęstinumui.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: kpt. Kazimieras Chomičenko, Gabrielė Bilkauskaitė.

Vadovas .....  
(Paraša )

Doc. dr. Eduardas Lasauskas

Užduotį gavau

.....  
(Parašas)

.....  
(Vardas, pavardė)

.....  
(Data)

**Vilniaus Gedimino technikos**

**universitetas**

**Antano Gustaičio aviacijos institutas**

ISBN    ISSN

Egz. sk. ....

Data ....-....-....

**Orlaivių pilotavimo studijų programos baigiamasis magistro darbas**

Pavadinimas: **Priešsparnių įtaka lengvojo šturmo lėktuvo *Aero L-39* aerodinaminėms charakteristikoms**

Autorius **Arentas Stonys**

Vadovas **Eduardas Lasauskas**

**Kalba**

|                                            |
|--------------------------------------------|
| <input checked="checked" type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/>                   |

lietuvių

užsienio

### **Anotacija**

Šiame darbe tiriama atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio *Aero L-39* sparno profilio ir viso orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms ir skrydžio procedūroms. Tyrimas atliekamas kompiuterinėmis programomis *JavaFoil*, *Xfoil* ir *Xflr5*.

Darbą sudaro 3 pagrindinės dalys:

1. Įvadas, literatūros analizė, taikomų metodų aptarimas.
2. Tyrimas – atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio *Aero L-39* aerodinaminėms charakteristikoms ir skrydžio procedūroms.
3. Išvados

Darbo apimtis – 71 p. teksto be priedų, 55 iliustr., 3 lent., 47 bibliografiniai šaltiniai.

**Prasminiai žodžiai:** aerodinamika, *Xflr5*, priešsparniai, *Aero L-39*, atlenkiama noselė, plyšinis priešsparnis.

**Vilnius Gediminas Technicl University**  
**Antanas Gustaitis' Aviation Institute**  
**Department of Aviation technologies**

ISBN    ISSN  
Copy no.  
Date    .....-.....-.....

Aircraft piloting study programme Master Graduation Thesis

Title: **Influence of slats on aerodynamic characteristics of light attack aircraft *Aero L-39***

Author: **Arentas Stonys**

Academic supervisor: **Eduardas Lasauskas**

Language

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| <input checked="checked" type="checkbox"/> | Lithuanian |
| <input type="checkbox"/>                   | Foreign    |

### **Annotation**

In this master project we analyze influence of slats on aerodynamic characteristics of light attack aircraft *Aero L-39*. Analysis is done by using *JavaFoil*, *Xfoil* and *Xflr5* software.

The project consists of 3 main parts:

Part 1: Introduction, analysis of literature, consideration about methods for the analysis.

Part 2: Analysis – extending nose type and slot type slat influence on aerodynamic characteristics of wing profile and whole plane of aircraft *L-39*.

Part 3: Consideration on results and conclusions.

Work volume – 71 pages of text without appendixes, 55 illustrations, 3 table, 46 references.

**Key words:** Aerodynamics, *Xflr5*, slats, *Aero L-39*, extending nose, slot type slat.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų  
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo  
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.  
2 priedas

**(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)**

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

\_\_\_\_\_  
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

\_\_\_\_\_  
(Fakultetas)

\_\_\_\_\_  
(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)  
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2017 m. \_\_\_\_\_ d.  
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Priešsparnių įtaką lengvojo  
šturmo lėktuvo Aero L-39 aerodinaminėms charakteristikoms

patvirtintas 20\_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d. dekanu potvarkiu Nr. \_\_\_\_\_, yra  
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar  
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo  
mokslininkai ir specialistai: Gabrielė Masiulionienė, kpt. Kazimieras Chomičenko

Mano darbo (projekto) vadovas Eduardas Lasauskas

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų  
piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Vardas ir pavardė)

## Turinys

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Darbo užduotis .....                                                                                     | 3  |
| Anotacija (lietuvių k.) .....                                                                            | 4  |
| Anotacija (anglų k.) .....                                                                               | 5  |
| Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracija .....                                                           | 6  |
| Santrumpų sąrašas .....                                                                                  | 8  |
| Paveikslų sąrašas .....                                                                                  | 9  |
| Lentelių sąrašas .....                                                                                   | 11 |
| Įvadas.....                                                                                              | 12 |
| 1. Literatūros analizė.....                                                                              | 14 |
| 2. Lengvasis šturmo lėktuvas <i>Aero L-39 Albatros</i> .....                                             | 21 |
| 3. Taikoma metodika.....                                                                                 | 25 |
| 3.1 Kompiuterinės programos <i>Xfoil</i> veikimo metodika .....                                          | 26 |
| 3.2 Kompiuterinės programos <i>Xflr5</i> veikimo metodika.....                                           | 29 |
| 3.3 Kompiuterinės programos <i>Java foil</i> veikimo metodika .....                                      | 32 |
| 4. Priešsparnių įtaka orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio aerodinaminėms charakteristikoms.....         | 35 |
| 4.1 Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio aerodinaminis tyrimas.....                                      | 35 |
| 4.2 Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio su išskleista užsparniais aerodinaminis tyrimas.....            | 39 |
| 4.3 Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio su plyšiniu priešsparniu aerodinaminis tyrimas.....             | 41 |
| 4.4 Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio su atlenkiamos noselės priešsparniu aerodinaminis tyrimas ..... | 45 |
| 5. Priešsparnių įtaka orlaivio <i>L-39</i> aerodinaminėms charakteristikoms .....                        | 50 |
| 5.1 Orlaivio <i>L-39</i> aerodinaminis tyrimas .....                                                     | 51 |
| 5.2 Plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio <i>L-39</i> aerodinaminėms charakteristikoms .....              | 53 |
| 5.3 Atlenkiamos noselės įtaka orlaivio <i>L-39</i> aerodinaminėms charakteristikoms .....                | 56 |
| 6. Priešsparnių įtaka orlaivio <i>L-39</i> skrydžio procedūroms.....                                     | 61 |
| Išvados.....                                                                                             | 66 |
| Literatūra .....                                                                                         | 68 |
| Pažymėjimas (apie dalyvavimą konferencijoje) .....                                                       | 71 |
| Priedai .....                                                                                            | 72 |

## Santrumpų sąrašas

$A$  – sparno proilgis

$b$  – sparno mostas

$C_D$  – pasipriešinimo koeficientas

$C_{D0}$  – pasipriešinimo koeficientas, kai keliamoji jėga lygi nuliui

$C_{D0f}$  – liemens pasipriešinimo koeficientas

$C_f$  – trinties koeficientas

$C_L$  – keliamosios jėgos koeficientas

$C_{Lmax}$  – maksimalus keliamosios jėgos koeficientas

$C_{L0}$  – keliamosios jėgos koeficientas, kai atakos kampas lygus nuliui

$C_P$  – slėgio koeficientas

$C_M$  – momento koeficientas

$D$  – pasipriešinimo jėga

$L$  – keliamoji jėga

$R$  – atstumas

$M$  – masė

$M_{OL39}$  – orlaivio *L-39* masė

$mac$  – vidutinė aerodinaminė styga

$Re$  – Reinoldso skaičius

$S$  – sparno plotas

$T$  – variklio traukos jėga

$V_A$  – tūpimo greitis

$V_{LOF}$  – atsiplėšimo nuo tako greitis

$V_{MC}$  – minimalus valdymo greitis

$V_{Smin}$  – minimalus smukos greitis

$V_{S1g}$  – smukos greitis, kai orlaivis skrenda tiesiai ir tame pačiame aukštyje

$V_2$  – kilimo greitis

$\delta_f$  – užsparnių atlenkimo kampas

$\alpha$  – atakos kampas

$\rho$  – oro tankis

$\nu$  – kinematinis klampumas

$\mu$  – absoliutus klampumas

## Iliustracijų sąrašas

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 pav. Pirmasis orlaivis su priešsparniais <i>D.H.9</i> (Handley Page 1921) .....                                              | 15 |
| 2 pav. Orlaivis <i>D.H.4</i> (Parsons 2006) .....                                                                              | 15 |
| 3 pav. Orlaivis <i>Handley Page Hampden</i> (Airplane pictures ...).....                                                       | 16 |
| 4 pav. Išsiskleidžiantis priešsparnis (Abbott 1949).....                                                                       | 17 |
| 5 pav. Priešsparnių tipai (Abbott 1952) .....                                                                                  | 17 |
| 6 pav. Keliamąją jėgą didinančios plokštumos (Van Dam 2002) .....                                                              | 18 |
| 7 pav. Orlaivio <i>Boeing 777</i> priešsparniai (Van Dam 2002).....                                                            | 19 |
| 8 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo (Dolson 2015) .....                                                    | 19 |
| 9 pav. Martino Heperle tyrimas (Heperle 2016) .....                                                                            | 20 |
| 10 pav. Orlaivis <i>Aero L-29 Delfin</i> (MigFlug...2017) .....                                                                | 21 |
| 11 pav. Orlaivis <i>Aero L-39 C</i> (Airliners...2017) .....                                                                   | 22 |
| 12 pav. Orlaivis <i>Aero L-39 ZA</i> (Lengvasis atakos lėktuvas <i>L-39 ZA</i> 2015) .....                                     | 22 |
| 13 pav. Analizuojamas profilio modelis (Drela 1989).....                                                                       | 26 |
| 14 pav. Sparno geometrinės charakteristikos (Xflr5 Guidelines 2014) .....                                                      | 30 |
| 15 pav. Tekstinis dokumentas, su kūno koordinatėmis (Xflr5 Guidelines 2014).....                                               | 31 |
| 16 pav. Kompiuterinės programos <i>JavaFoil</i> aplinka (Heperle 2014).....                                                    | 33 |
| 17 pav. Slėgio pasiskirstymas virš orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio pavaizduotas grafike. ....                             | 34 |
| 18 pav. Slėgio pasiskirstymas virš orlaivio <i>L-39</i> sparno profilio pavaizduotas vizualiai .....                           | 34 |
| 19 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis kompiuterinės programos <i>Xfoil</i> aplinkoje. ....                              | 35 |
| 20 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis kompiuterinės programos <i>JavaFoil</i> aplinkoje.....                            | 36 |
| 21 pav. Aerodinaminių charakteristikų, gautų <i>JavaFoil</i> ir <i>Xfoil</i> kompiuterinėmis programomis,<br>palyginimas ..... | 36 |
| 22 pav. Aerodinaminių charakteristikų gautų <i>JavaFoil</i> ir <i>Xfoil</i> programomis, palyginimas.....                      | 37 |
| 23 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai Reinoldso skaičius 3 mln. ....                                   | 37 |
| 24 pav. <i>JavaFoil</i> , <i>Xfoil</i> ir praktinio bandymo palyginimas.....                                                   | 38 |
| 25 pav. Martino Heperle tyrimas (Heperle 2016) .....                                                                           | 38 |
| 26 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis, kai užsparniai iškleisti 25-ių laipsnių kampu .....                              | 39 |
| 27 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis, kai užsparniai iškleisti 44-ių laipsnių kampu .....                              | 40 |
| 28 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai užsparniai 25° ar 44° .....                                      | 40 |
| 29 pav. Poliarė, kai užsparniai kilimo ar tūpimo padėtyje .....                                                                | 41 |
| 30 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis su plyšiniu priešsparniu .....                                                    | 42 |
| 31 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai profilis su plyšiniu priešsparniu .....                          | 42 |
| 32 pav. Poliarė, kai profilis su ir be plyšinio priešsparnio. ....                                                             | 43 |

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 33 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais kilimo padėtyje. ....                                                                                               | 44 |
| 34 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais tūpimo padėtyje.....                                                                                                | 44 |
| 35 pav. Profilio su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo .....                                                                                          | 44 |
| 36 pav. Profilio su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais poliarė .....                                                                                                                                   | 44 |
| 37 pav. Orlaivio <i>L-39</i> sparno profilis su atlenkiama nosele.....                                                                                                                                   | 46 |
| 38 pav. Profilio su atlenkiama nosele poliarė .....                                                                                                                                                      | 46 |
| 39 pav. Profilio su atlenkiama nosele keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo .....                                                                                                             | 47 |
| 40 pav. Profilis su atlenkiama nosele ir užsparniais išskleistais kilimui.....                                                                                                                           | 48 |
| 41 pav. Profilis su atlenkiama nosele ir užsparniais išskleistais tūpimui.....                                                                                                                           | 48 |
| 42 pav. Profilio su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais poliarė.....                                                                                                                           | 48 |
| 43 pav. Profilio su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo.....                                                                                  | 49 |
| 44 pav. Orlaivio <i>L-39</i> liemens modeliavimas kompiuterinės programos <i>Xflr5</i> aplinkoje .....                                                                                                   | 50 |
| 45 pav. Orlaivis <i>L-39</i> sumodeliuotas kompiuterinės programos <i>Xflr5</i> aplinkoje .....                                                                                                          | 51 |
| 46 pav. Orlaivio <i>L-39</i> keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje .....                                                                        | 52 |
| 47 pav. Orlaivio <i>L-39</i> poliarė, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje .....                                                                                                                 | 52 |
| 48 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais.....                                                                                             | 53 |
| 49 pav. Poliarė, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais.....                                                                                                                                      | 54 |
| 50 pav. Orlaivio <i>L-39</i> keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir išskleistais užsparniais .....                               | 55 |
| 51 pav. Orlaivio <i>L-39</i> poliarė, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir užsparniais.....                                                                                                  | 55 |
| 52 pav. Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir be jos (apskaičiuota pagal <i>JavaFoil</i> ir <i>Xflr5</i> sparno profilio poliares)..... | 57 |
| 53 pav. Poliarė, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir be jos (apskaičiuota pagal <i>JavaFoil</i> ir <i>Xflr5</i> sparno profilio poliares) .....                                                     | 57 |
| 54 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais .....                                                                        | 59 |
| 55 pav. Poliarė, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais.....                                                                                                                  | 59 |

## **Lentelių sąrašas**

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 lentelė. Keliamąją jėgą didinančių plokštumų įtaka orlaivio maksimaliam keliamosios jėgos koeficientui (Roskam 1990; Entsminger 2004; Heintz 2009)..... | 13 |
| 2 lentelė. Orlaivio <i>Aero L-39 C</i> techninė charakteristika (Aero Vodochody 1990) .....                                                               | 23 |
| 3 lentelė. Orlaivio <i>Aero L -39 ZA</i> techninė charakteristika (Aero Vodochody 1990) .....                                                             | 23 |

## IVADAS

### Aktualumas

Aviacijoje viena iš svarbiausių orlaivio charakteristikų yra smukos greitis (angl. *stall speed*). Kuo mažesnis smukos greitis, tuo mažesniu greičiu gali skristi orlaivis. Nuo smukos greičio priklauso tūpimo bei kilimo greičiai. Jei orlaivio smukos greitis yra sumažinamas, tūpimo bei kilimo greitis taip pat sumažėja. Kuo mažesnis tūpimo ar kilimo greitis, tuo trumpesnio tako reikia orlaiviui norint pakilti ar nutūpti. Orlaivis, galintis nutūpti ar pakilti trumpame take, yra naudingesnis orlaivio operatoriui dėl paprastesnio skrydžio planavimo, didesnio galimų tūpimo vietų (aerodromų) skaičiaus bei geresnio prisitaikymo prie vykdomų, operacijų pvz., karinės operacijos. Šiandien Lietuvos kariuomenėje yra naudojamas lengvasis šturmo lėktuvas *Aero L-39 Albatros* (toliau *L-39*). Pagrindinė šio orlaivio funkcija yra mokomoji. Daugelyje Europos šalių, tokiose kaip Lenkija, Čekija, Bulgarija ir kt., šie orlaiviai skirti mokyti būsimus atakos lėktuvų pilotus, ruošiant juos tapti *F-16 Fighting Falcon*, *Saab JAS 39 Gripen*, *Mikoyan Mig-29* orlaivių pilotais. Lietuva atakos lėktuvų neturi, todėl *L-39* orlaivis yra naudojamas kitoms užduotims. Užduotys, kurias atlieka šis orlaivis, tai oro mūšis – treniruotė su NATO sąjungininkais imituojant tikrą oro mūšį, artima oro parama (angl. *Close Air Support*) ir kitos. Šis orlaivis neturi priešsparnių, o turi tik užsparnius. Priešsparnių panaudojimas būtų naudingas šiam orlaiviui, nes priešsparniai padidina keliamosios jėgos koeficientą ir pristabdo srauto atitrūkimą iki didesnių atakos kampų (Lasauskas 2008, 2010). Orlaivis su didesniu keliamosios jėgos koeficientu turėtų mažesnę smukos greitį. Mažesnis smukos greitis padėtų šiam orlaiviui manevruoti oro dvikovoje. Jei prieš orlaivis, kuris yra greitesnis persekiotų, vienintelis būdas išvengti prieš – manevravimas. Kadangi prieš orlaivis yra greitesnis, jo smukos greitis yra didesnis, todėl manevro metu jis skris didesniu spinduliu nei orlaivis, galintis skristi lėčiau. Lėtesnio orlaivio, kuris manevruoja, persekiojimas yra labai nepatogus priešui, perimti (angl. *intercept*) lėtai skrendantį ir manevruojantį orlaivį yra sudėtinga (Dole 1981, Air Force manual 1983).

### Naujumas

Šiuo metu galima rasti nemažai tyrimų apie priešsparnių įtaką įvairiems orlaiviams (Nield 1995; Wedderspoon 1986; Capbern 1993). Priešsparnių nauda priklauso nuo lėktuvo tipo, sparno, sparno profilio ir lėktuvo konfigūracijos. Kiekvienas orlaivis turi savitas aerodinamines charakteristikas, būdingas tik tam orlaiviui. Šiame darbe bus tiriamas orlaivis *L-39*, kuris yra naudojamas Lietuvos kariuomenės oro pajėgose ir atlieka Lietuvos kariuomenės oro pajėgų

užduotis. Orlaivis *L-39* turi užsparnius, bet neturi priešsparnių. Tyrimų, nagrinėjančių priešsparnių įtaką šio orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms nėra.

## **Darbo tikslai ir uždaviniai**

Šio baigiamojo darbo tikslas – ištirti plyšinio ir atlenkiamos noselės priešsparnių įtaką orlaiviui *L-39*. Apskaičiuoti, kaip pasikeis aerodinaminės charakteristikos bei kiek teoriškai galėtų sutrumpėti nagrinėjamo orlaivio smukos greitis bei kilimo ir tūpimo atstumas.

Siekiant įgyvendinti šio darbo tikslą, keliama tokie uždaviniai:

- Atlikti literatūros analizę darbo tema, išnagrinėti mokslinius straipsnius apie priešsparnių įtaką įvairiems orlaiviams.
- Išanalizuoti ir aptarti priešsparnių aerodinaminių tyrimų metodus.
- Naudojant kompiuterinę programą XFOIL, ištirti atlenkiamos noselės įtaką orlaivio *L-39* sparno profilio aerodinaminėms charakteristikoms.
- Naudojant kompiuterinę programą JAVA FOIL, ištirti plyšinio priešsparnio įtaką orlaivio *L-39* sparno profilio aerodinaminėms charakteristikoms.
- Naudojant kompiuterinę programą XFLR5 ištirti plyšinio ir atlenkiamos noselės priešsparnio įtaką sumodeliuotam orlaiviui *L-39* ir jo aerodinaminėms charakteristikoms.
- Įvertinti gautus darbo rezultatus. Pateikti aerodinaminių charakteristikų skaitinius rezultatus, gautus ištyrus atlenkiamos noselės ir plyšinius priešsparnius. Iš gautų rezultatų pateikti išvadas ir siūlymų tolimesniam darbo tęstinimui.

## **Taikoma metodika**

Naudojantis kompiuterinėmis analizės programomis *Xflr5*, *Xfoil* ir *JavaFoil* ištiriami atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaką orlaivio *L-39* sparno profilio aerodinaminėms charakteristikoms. *Xfoil* veikia sąveikąjaunčiu zoniniu metodu, o *JavaFoil* veikia nesąveikąjaunčiu zonininiu metodu. (Drela 1989; Eppler, Somers 1980). Plačiau metodai aptarti 3 baigiamojo darbo skyriuje.

## 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

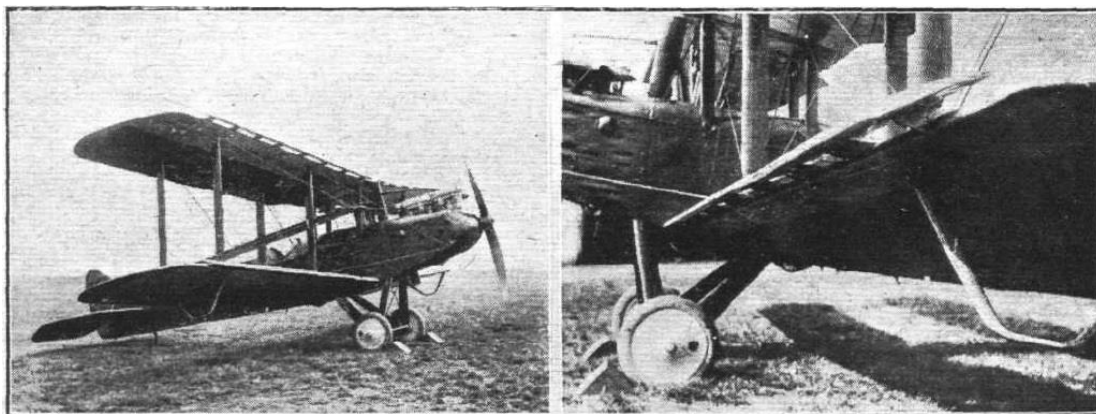
Šiuolaikinėje aviacijoje sunku rasti orlaivį, kuris neturėtų keliamąją jėgą didinančių plokštumų. Šios plokštumos reikalingos padidinti keliamąją jėgą (žr. 1 lentelę.) ir dažniausiai yra naudojamos kilimo ar tūpimo metu. Keliamosios jėgos padidinimas leidžia orlaiviui tūpti ar kilti mažesniu greičiu. Kuo mažesniu greičiu orlaivis kyla ar tupia, tuo mažiau kelio jam reikia įsibėgėti, norint pakilti arba nutūpti ir visiškai sustoti. Išskiriamos dvi pagrindinės keliamąją jėgą didinančių plokštumų rūšys. Tai yra priešsparnai (angl. *slats* arba *leading edge slats*) bei užsparniai (angl. *flaps*). Šiame darbe bus nagrinėjama priešsparnių įtaką sparno aerodinaminėms charakteristikoms.

**1 lentelė.** Keliamąją jėgą didinančių plokštumų įtaka orlaivio maksimaliam keliamosios jėgos koeficientui (Roskam 1990; Entsminger 2004; Heintz 2009)

| Orlaivis           | Keliamosios jėgos koeficientas (be keliamąją jėgą didinančių plokštumų) | Keliamosios jėgos koeficientas (su keliamąją jėgą didinančiomis plokštumomis) | Keliamosios jėgos padidėjimas |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <i>F-4</i>         | 1,05                                                                    | 1,40                                                                          | 33 %                          |
| <i>F-5</i>         | 1                                                                       | 1,40                                                                          | 40 %                          |
| <i>F-16</i>        | 1,52                                                                    | 1,9                                                                           | 25 %                          |
| <i>F-111</i>       | 1,55                                                                    | 2,45                                                                          | 58 %                          |
| <i>STOL CH 701</i> | 1,5                                                                     | 3,3                                                                           | 220 %                         |

Pirmasis priešsparnis buvo sukurtas vokiečių aeronautikos inžinieriaus Gustavo Lachmano 1918 metais. Dėl staigios smukos sudužus vokiečių orlaivių gamintojų *Rumpler C* orlaiviui, G. Lachmanui kilo idėja sukurti papildomas sparno plokštumas, kurios sumažintų sparno smukos tikimybę. 1917 metais laboratorijoje buvo sukurtas mažas medinis modelis, kuris turėjo sparną, sudarytą iš kelių dalių, tai yra priešsparnio ir sparno profilio. Šis modelis buvo naudojamas eksperimentui, kuriame jį apipūtė matomų dūmų oro srautu. Deja, eksperimento rezultatai neparodė jokių ypatingų pokyčių dėl to, nes priešsparnio plokštuma buvo per daug siaura. 1918 metais mokslininkas mėgino užpatentuoti atskirų plokštumų sparno profilį. Vokietijos patentų biuras, iš pradžių atsisakė patentuoti tokį sparno profilį, nes netikėjo, kad toks sparno profilis galėtų pagerinti sparno aerodinamines charakteristikas (Lachman 1921).

Nepriklausomai nuo G. Lachmano britų orlaivius gaminanti įmonė *Handley Page* kūrė sparno profilį, kuris turėtų priešsparnį. 1919 metais ši įmonė mėgino užpatentuoti atskirų plokštumų sparno profilį, bet jiems nepavyko, nes Lachmanas buvo pirmasis, kuris mėgino užpatentuoti tokio tipo sparno profilį. Tuomet įmonė pasirašė bendradarbiavimo sutartį su vokiečių mokslininku G. Lachmanu. Tais pačiais metais prie britų įmonės orlaivio *D.H.9* (1 pav.) sparno buvo pritaisyti plyšiniai priešsparniai ir buvo atlikti pirmieji bandomieji skrydžiai (Handley Page 1921).



**1 pav.** Pirmasis orlaivis su priešsparniais *D.H.9* (Handley Page 1921)

Vėliau įmonė padedama G. Lachmano modifikavo baiplaną orlaivį *D.H.4* (2 pav.) į monoplaną pridėdama jam galinius aileronus (angl. *back ailerons*), šie aileronai vėliau buvo pervadinti į užsparnius (angl. *flaps*). *D.H.4* orlaivis taip pat turėjo plyšinius priešsparnius, todėl šis modifikuotas orlaivis turėjo geras lėto skrydžio charakteristikas.



**2 pav.** Orlaivis „*D.H.4*“ (Parsons 2006)

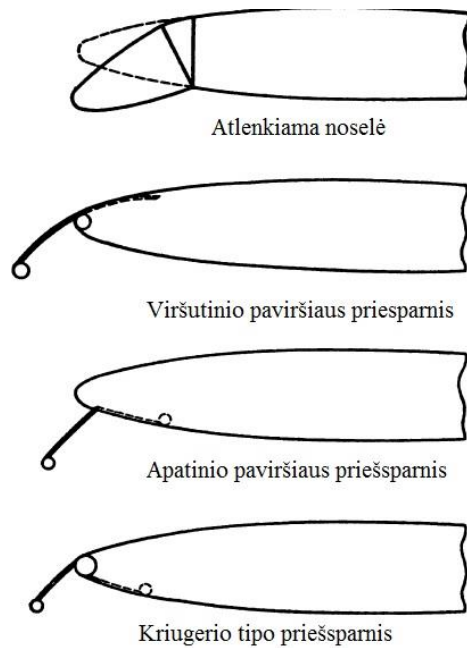
Per kelerius metus G. Lachmanas buvo atsakingas už daugybę *Handley Page* projektų vienas iš žymesnių jo darbų – tai bombonešis *Handley Page Hampden* (Lachman 1921).

Antrojo pasaulinio karo metu vokiečių sukurtas orlaivis *Fieseler Fi 156 Storch* (3 pav.) turėjo įspūdingas trumpo tūpimo ir kilimo (angl. *STOL*) charakteristikas dėl fiksuoto plyšinio priešsparnio, esančio šalia sparno profilio priekinės briaunos. Šio orlaivio kilimo atstumas, kai vėjo greitis 0 m/s, buvo 30 metrų, tūpimo 50 metrų (Bateson 1971).



**3 pav.** Vokiečių gamybos orlaivis *Fieseler Fi 156* (Airplane pictures...)

Iki pat XX amžiaus vidurio aiškios teorijos, paaiškinančios priešsparnių veikimą nebuvo. Vienas iš svarbiausių mokslininkų, kuris nemažai prisidėjo prie teorijos plėtojimo, tai vokiečių Liudvikas Prandtelis (Ludwig Prandtl). Jis su kitų mokslininkų pagalba išleido du svarbius leidinius: *Essentials of fluid dynamics* (1952) ir *Fundamentals of Hydro - and Aeromechanics* (1957). Mokslininkas manė, kad priešsparniai nukreipia laisvąjį srautą į sparno profilio viršuje aptekantį srautą. Tokiu būdu profilį aptekantis srautas gaudavo papildomos energijos iš laisvojo srauto. Kuo daugiau kinetinės energijos turi srautas virš sparno profilio, tuo mažesnis statinis slėgis susidarydavo profilio viršuje. Statiniam slėgiui profilio viršuje sumažėjus, virš ir po profilio esančių statinių slėgių skirtumas padidėdavo. Kadangi keliomoji jėga yra tiesiogiai proporcinga šiam skirtumui, padidėjus statinių slėgių skirtumui keliomoji jėga taip pat padidėja. (Prandtl 1952, 1957). Kitas svarbus mokslininkas, prisidėjęs prie priešsparnių tyrimų, tai amerikietis Ira H. Abotas (Ira H. Abbott). Kartu su amerikiečiu mokslininku Albertu E. Von Doenhofu (Albert E. Von Doenhoff) 1949 metais išleido leidinį *Theory of wing sections*. Savo leidinyje jis rašė, kad priešsparniai – tai maži profiliai, pridedami prieš sparno profilio noselę ir jie užsuka laisvąjį srautą link srauto, tekančio virš sparno profilio. Tokiu būdu atidėdami smuką iki didesnių atakos kampų. Priešsparniai sumažina slėgio piką (angl. *pressure peak*), kuris prasideda esant dideliems, arti kritiniams atakos kampams. Slėgio piko atidėjimas arba sumažinimas leisdavo atidėti sparno profilio smuką iki didesnių atakos kampų. Autorius aprašė pagrindinius priešsparnių tipus (4 pav.). Priešsparniai gali būti stacionarūs arba išskleidžiami (5 pav.). Stacionarūs priešsparniai kitaip vadinami plyšiniais (angl. *slot*). Taip pat autorius teigė, kad priešsparniai yra efektyvūs tik tada jei jie yra naudojami su užsparniais (Abbott, Doenhoff 1949).



4 pav. Priešsparnių tipai (Abbott 1949)

Mokslininkas teigė, kad plyšys gali būti įvairiose sparno profilio vietose. Jeigu plyšys sparno profilyje bus vienas, geriausia, kad jis būtų kuo arčiau profilio priekinės briaunos (Abbott, Doenhoff 1949).

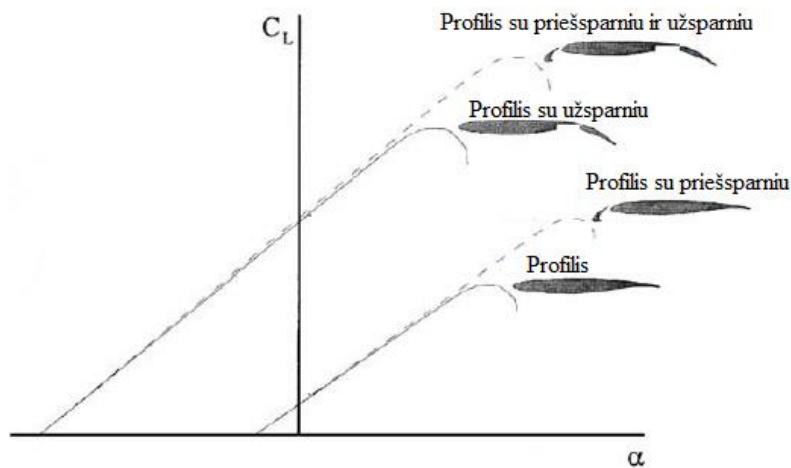


5 pav. Išsiskleidžiantis priešsparnis (Abbott 1949)

1975 metais amerikiečių mokslininkas A. M. O Smitas (A. M. O Smith) išleido leidinį *High-Lift aerodynamics*. Mokslininkas paneigė įsivyravusią teoriją, kad priešsparniai padidina srauto, tekančio virš sparno profilio, greitį. Priešingai Amerikietis įrodė, kad srauto greitis sumažėja, todėl slėgio pikai (angl. *pressure peaks*) profilio galinėje dalyje sumažėdavo. Dėl to srautas atitrūkdavo vėliau ir smuka prasidėdavo prie didesnių atakos kampų. Taip pat mokslininkas teigė, kad srautas, tekantis galinėje sparno profilio dalyje (angl. *downstream*) pagerindavo srauto aptekėjimą apie noselę (angl. *upstream*). Smitas aprašė dar vieną priešsparnių efektą – tai profilių pasienių sluoksnių efektas (angl. *fresh boundary layer effect*). Šis efektas pasireiškia tuo, kad pasienio sluoksnis naudojant priešsparnį sumažėja, nes kiekvienas naujas elementas turi savo pasienio sluoksnį. Kuo

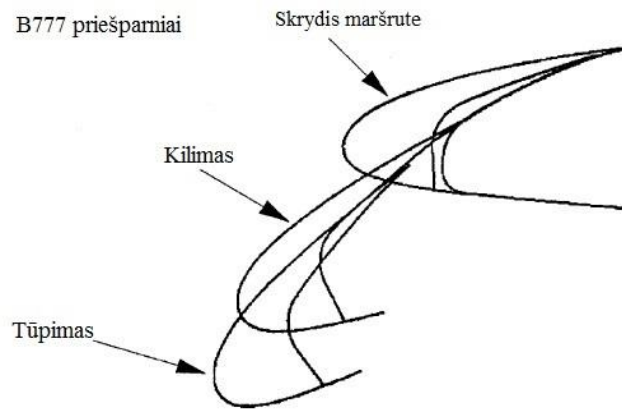
plonesnis pasienio sluoksnis, tuo jis atsparesnis srauto atsiskyrimui (angl. *adverse gradients*) (Smith 1972, 1975).

Šių dienų aviacijoje galima rasti daug tyrimų, nagrinėjančių keliamąją jėgą didinančių plokštumų įtaką orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms (5 pav.). Vienas iš žymiausių straipsnių – tai amerikiečių mokslininko C. P. Van Damo (C. P. Van Dam) *The aerodynamic design of multi-element high-lift systems*. Savo darbe mokslininkas aptaria beveik visus XX amžiaus mokslininkų, tokių kaip : Greenman, Gatlin, Brune, McMaster, ir daugelį kitų bei šitame darbe jau minėtus A. M. O. Smith, I. H. Abbott ir Prandtl darbus. Kaip ir Smitas, Van Damas sutinka, kad priešsparniai nesuteikia energijos srautui, tekančiam virš sparno profilio (Van Dam 1993, 1997). Mokslininkas pabrėžia, kad empirinių metodų taikymas nebeturi prasmės šiandien. Dauguma tyrimų yra atliekama naudojant sudedamąją skysčių dinamikos metodiką (angl. *Computational fluid dynamics*). (Van Dam 2002). Taip pat mokslininkas teigia, kad keliamąją jėgą didinančių plokštumų tyrinėjimas nepraranda prasmės ir yra labai aktualus. Mokslininkas pateikia pavyzdį – jei padidinsime maksimalų keliamosios jėgos koeficientą per 1 % vidutiniam civiliniam orlaiviui, tai galėsime įsodinti papildomus 22 keleivius arba įsikrauti 2000 kg krovinio (Van Dam 2002). Taip pat mokslininkas pateikia grafikus, kurie parodo, kokios priešsparnių ir užsparnių konfigūracijos, suteikia didžiausią priegaugį keliamosios jėgos koeficientui kintant atakos kampui (žr. 6 pav.)



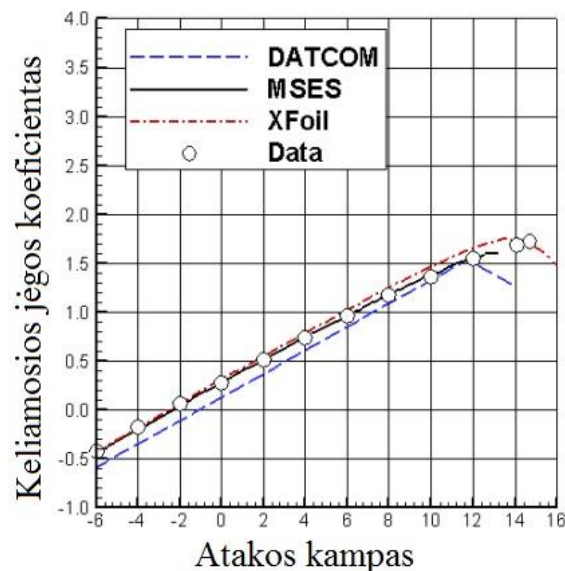
6 pav. Keliamąją jėgą didinančios plokštumos (Van Dam 2002)

Iš 6 paveikslo matoma, kad didžiausias keliamosios jėgos koeficientas yra gaunamas, kai priešsparnis yra naudojamas kartu su užsparniu. Galima pastebėti, kad padidėja ne tik keliamosios jėgos koeficientas, bet ir kritinis atakos kampas. Mokslininkas pateikia daug informacijos apie priešsparnius, kurie naudojami šiuolaikiniuose transporto orlaiviuose, tokiuose kaip *Boeing 777* (7 pav.) (Van Dam 2002).



7 pav. Orlaivio Boeing 777 priešsparniai (Van Dam 2002)

Šiame darbe bus tiriama priešsparnių įtaką orlaivio Aero L-39 sparno profilio ir viso orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms skrendant mažais greičiais – tūpimo ir kilimo fazėse. Vienas iš naujausių tyrimų šia tema – tai amerikiečių mokslininko Eriko Dolsono darbas „Pusiau empirinis orlaivio, skrendančiu mažais greičiais, aerodinaminis tyrimas“ (angl. *Semi-Empirical Prediction of Aircraft Low-Speed Aerodynamic Characteristics*). Savo darbe mokslininkas tyrė superkritinį (angl. *supercritical*) sparno profilį su keletos rūšių užsparniais, bei visą orlaivį su plyšiniu priešsparniu ir dviplyšiniu užsparniu (angl. *double-slotted flap*). Šį tyrimą mokslininkas atliko *Datcom*, *Mses* ir *Xfoil* programine įranga. Taip pat atliko ir praktinius bandymus oro tunelyje. Gautus aerodinaminių rodiklių rezultatus atvaizdavo grafikuose (8 pav.).

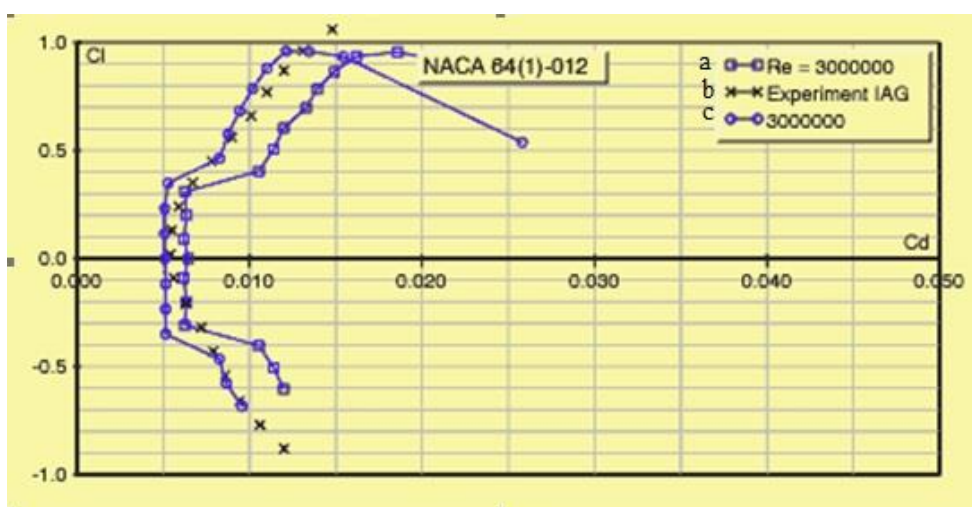


8 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos (Dolson 2015)

Šio darbo išvadose mokslininkas teigiamai įvertino kompiuterinės programos *Xfoil* pateikiamus tyrimo rezultatus, nes jie buvo panašūs į gautus praktinio bandymo rezultatus. Mokslininkas teigė, kad *Xfoil* puikiai tinka tirti sparno profilio aerodinamines charakteristikas, jei

atakos kampas neviršija kritinio. Pasiekus kritinį atakos kampą *Xfoil* apskaičiuotos aerodinaminės charakteristikos nukrypsta nuo realiu sparno profilio aerodinaminių charakteristikų (Dolson 2015).

Šiame darbe bus tiriama plyšinio priešsparnio įtaką orlaivio *Aero L-39* aerodinaminėms charakteristikoms. Kompiuterinė programa *Xfoil* negali tirti sparno profilio sudaryto iš atskirų elementų, todėl naudosime kompiuterinę programą *JavaFoil*. Šią programą sukūrė mokslininkas Martinas Heperle. 2016 metais jis atliko tyrimą, kuriame tyrė NACA 64012 sparno profilį. Tokį sparno profilį turi orlaivis *L-39*. Tyrimą mokslininkas atliko naudodamasis kompiuterinę programą *JavaFoil*. Gautus rezultatus palygino su praktiniu bandymo oro tunelyje. Tyrimo rezultatai atvaizduoti poliarėje (9 pav.). Poliarė tai keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo pasipriešinimo koeficiento.



9 pav. Martino Heperle tyrimas (Heperle, 2016)

Čia a kreivė gauta ištyrus profilį kompiuterine programa *JavaFoil*, kai sparno profilį jungiantys taškai yra sukonzentruoti ties sparno profilio galine briauna, b kreivė – tai eksperimento oro tunelyje gauti aerodinaminiai parametrai ir c kreivė gauta ištyrus sparno profilį kompiuterine programa *JavaFoil*, kai sparno profilio taškai yra išdėstyti pagal kosinuso principą. Kosinuso principu išdėstyti sparno profilio taškai yra susikonzentravę ties sparno priekine ir galine briauna. Heperlė teigia, kad kompiuterinė programa *JavaFoil* yra efektyvi ir gali tiksliai apskaičiuoti aerodinamines charakteristikas iki tam tikro keliamosios jėgos koeficiento, kuris neturėtų būti didesnis nei 70 % nuo maksimalaus keliamosios jėgos koeficiento (Heperle 2016).

## 2. LENGVASIS ŠTURMO LĖKTUVAS AERO L-39 ALBATROS

*Aero L-39 Albatros* yra mokomasis ir lengvasis šturmo lėktuvas, sukurtas buvusios Čekoslovakijos orlaivių gamintojo *Aero Vodochody*. Šis orlaivis pradėtas kurti XX a. 6-tame dešimtmetyje. Pirmą kartą į orą pakilo 1968 metų lapkričio 4 dieną. Orlaivis pakeitė iki tol naudotą reaktyvinį mokomojį orlaivį *Aero L-29 Delfin* (10 pav.), kuris turėjo turbo-reaktyvinį variklį.



**10 pav.** Orlaivis *Aero L – 29 Delfin* (MigFlug...2017)

Orlaivis *L-39* yra vienas iš pirmųjų mokomųjų reaktyvinių orlaivių, kurie turėjo turbo ventiliatorinį variklį. Šiame orlaivyje įmontuotas sovietų gamybos *Ivchenko AI-25TL* dviejų varančiųjų velenų turbo-ventiliatorinis variklis, kuris generuoja iki 17 kN trauką. Lyginant su *L-29*, *L-39* buvo daug greičiau surenkamas, turėjo galingesnį variklį, atnaujintą avioniką bei visiškai kitokią konstrukciją. *L-29* turėjo T formos uodegą, o *L-39* turėjo įprastą klasikinę uodegą. Abu orlaiviai buvo dviviečiai, tačiau matomumas pilotui, skrendančiam naujuoju modeliu, buvo geresnis. Pirminis mokomasis *L-39* variantas buvo perdarytas – pastiprinti sparnai, važiuoklė, atsirado galimybė pritaisyti kulkosvaidį, raketas ir bombas. Orlaivis *L-39* gaminamas skirtingų konfigūracijų arba variantų. Tai yra *L-39 C* – standartinis mokomasis orlaivis, vėliau Slovakijos karinių oro pajėgų perdarytas ir pavadintas *L-39 CM*. Kitas ukrainiečių perdarytas *L-39* orlaivis buvo pavadintas *L-39 M1*, šis orlaivis turėjo *AI-25TLSh* variklį. Dar viena buvusios Čekoslovakijos karinių pajėgų modifikacija – tai *L-39V*, šio orlaivio paskirtis buvo oro taikinių tempimas. *L-39 ZO* – tai mokomasis lengvasis atakos lėktuvas, kurio paskirtis buvo apmokyti naudotis ginkluote skrydžių metu, dar vėliau šis orlaivis buvo perdarytas ir pervadintas *L-39 ZA*. *L-39 ZA* turėjo 23 mm, dviejų vamzdžių kulkosvaidį, prie šio orlaivio buvo montuojamos oras – oras (angl. *air to air*) *K13* arba *R60* raketos. Naujausia *L-39* konfigūracija pavadinimu *L-39 NG* ( angl. *new generation*)

planuojama išleisti 2018 m. Ši atnaujinta versija turės amerikiečių gamybos *FJ44-4M* variklį bei visiškai atnaujint avioniką (angl. *glass cockpit*) (Aero L-39 Albatros advanced trainer 2017).

Šiandien orlaivis *L-39* yra naudojamas daugelyje karinė aviaciją turinčių šalių tokių kaip: Afganistanas, Bulgarija, Čekija, JAV, Latvija, Estija, Lietuva ir kitos. Lietuvos karinės oro pajėgos šiuo metu eksploatuoja keturis *L-39* orlaivius. Trys iš jų yra *C* konfigūracijos (11 pav.), kurio techninės charakteristikos 1 lentelėje ir vienas *ZA* konfigūracijos (12 pav), kurio techninės charakteristikos nurodytos 2 lentelėje.



**11 pav.** Orlaivis Aero L-39 C (Airliners...2016)



**12 pav.** Orlaivis Aero L -39 ZA (Lengvasis atakos lėktuvas L-39 ZA...2015)

**1 lentelė.** Orlaivio Aero L-39C techninė charakteristika (*L-39 Albatros...*)

|                                                            |                     |
|------------------------------------------------------------|---------------------|
| Sparno mojis                                               | 9,46 m              |
| Ilgis                                                      | 12,32 m             |
| Aukštis                                                    | 4,72 m              |
| Sparno plotas                                              | 18,8 m <sup>2</sup> |
| Tuščio orlaivio svoris                                     | 3450 kg             |
| Degalų talpa (be papildomų bakų)                           | 980 kg              |
| Degalų talpa (su dviem 350 l ant sparnų kabinamais bakais) | 1524 kg             |
| Degalų sunaudojimas                                        | 560 litrų per val.  |
| Maksimalus skrydis horizonte                               | 700 km/h            |
| Maksimalus greitis (angl. <i>never exceed speed</i> )      | 910 km/h            |
| Smukos greitis (su išskleistais užsparniais)               | 168 km/h            |
| Maksimalus aukštėjimo greitis                              | 22 m/s              |
| Maksimalus skrydžio nuotolis (su 10 % rezervo)             | 1000 km             |
| Maksimalus atstumas (su papildomais dviem 360 l bakais)    | 1600 km             |
| Maksimalus skrydžio laikas (be papildomų bakų)             | 3 val               |
| Įsibėgėjimo kilti atstumas (jūros lygyje)                  | 540 m               |
| Riedėjimo atstumas nutūpus (jūros lygyje)                  | 590 m               |
| Maksimalios perkrovų ribos                                 | +8/-4 G             |

Orlaivis *Aero L -39 ZA* yra visiškai mūšiui pritaikytas atakos orlaivis. Šis orlaivis turi 4 taškus bombų, raketų ar papildomų bakų kabinimui, taip pat sustiprintą važiuoklę ir sparnus. Orlaivis turi įmontuotą 23 mm kulkosvaidį *GS-23*, gali gabenti nevaldomas sovietų gamybos *oras – žemė* raketas – *S5*, *oras – oras* raketas – *R – 3S* bei aviacines bombas sveriančias nuo 50 iki 500 kg.

**2 lentelė.** Orlaivio *Aero L -39 ZA* techninė charakteristika (*Aero Vodochođy* 1990)

|               |                     |
|---------------|---------------------|
| Sparno mojis  | 9,46 m              |
| Ilgis         | 12,32 m             |
| Aukštis       | 4,72 m              |
| Sparno plotas | 18,8 m <sup>2</sup> |

2 lentelės tesinys

|                                                                          |                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Maksimalus kilimo svoris                                                 | 5600 kg                                          |
| Maksimalus tūpimo svoris                                                 | 4800 kg                                          |
| Minimalus greitis                                                        | 200 km/h                                         |
| Minimalus greitis (su ginkluote*)                                        | 220 km/h                                         |
| Maksimalus skrydis horizonte                                             | 700 km/h                                         |
| Maksimalus greitis (angl. <i>never exceed speed</i> )                    | 910 km/h                                         |
| Maksimalus greitis (angl. <i>never exceed speed</i> ) su pilna ginkluote | 865 km/h                                         |
| Maksimalus Macho greitis (be ginkluotės)                                 | 0,80                                             |
| Maksimalus skrydžio nuotolis (su ginkluote)                              | 0,75                                             |
| Maksimalus skrydžio aukštis (be ginkluotės)                              | 11,5 km                                          |
| Maksimalus skrydžio aukštis (su ginkluote)                               | 7,5 km                                           |
| Masės centro ribos                                                       | 17,5 – 25,5 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos |
| Maksimalus greitis su išskleista važiuokle ir užsparniais 44°            | 310 km/h                                         |
| Minimalus greitis atidengti ugnį su GS-23 kulkosvaidžiu                  | 400 km/h                                         |
| Kulkosvaidžio dėtuve (vykdant užduotį)                                   | 150 šovinių                                      |
| Kulkosvaidžio dėtuve (pilotams mokytis)                                  | 100 šovinių                                      |
| Minimalus greitis išmesti aviacinę bombą (50-500 kg)                     | 400 km/h                                         |
| Minimalus S5 M raketos paleidimo greitis                                 | 350 km/h                                         |
| Maksimalus ginkluotės pakrovimas                                         | 500 kg                                           |
| Įgula (mokomieji skrydžiai)                                              | 1 (2)                                            |

\*Ginkluotė – tai maksimalus galimas gabenti ginkluotės kiekis (svoris) – 500 kg.

### 3. TAIKOMA METODIKA

Šiame darbo skyriuje aptariama kokiais metodais atliekamas orlaivio *L-39* sparno profilio ir viso orlaivio tyrimas. Tyrimams naudosime kompiuterines programas *JavaFoil*, *Xfoil* ir *Xflr5*. Šių programų veikimo metodikos aprašytos tolesniuose skyreliuose.

#### 3.1 Kompiuterinės programos *Xfoil* veikimo metodika

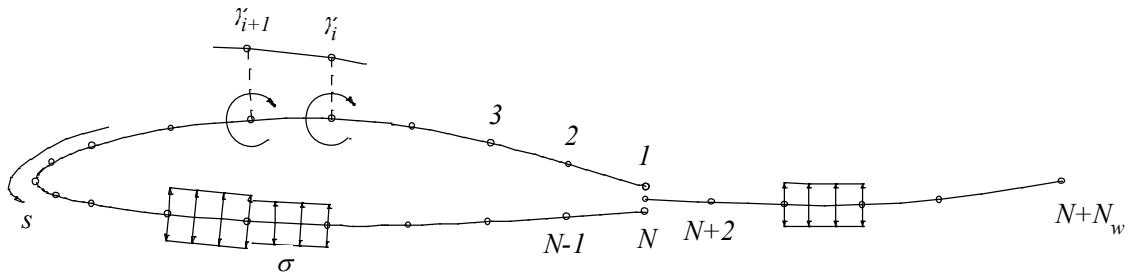
*Xfoil* yra interaktyvioji programa, skirta izoliuotų sparno profilių kūrimui ir analizei iki garso greičio. Ji paprogramiais, valdomais iš meniu, atlieka įvairias funkcijas, pvz.:

- Tam tikro profilio analizė klampiajame (arba neklampiajame) sraute, įvertinant:
  - laisvą arba fiksuotą laminarinį-turbulencinį virsmą,
  - laminarinio atitrūkimo burbulus,
  - ribotą srauto atitrūkimą prie galinės briaunos,
  - spūdumo įtakos pataisas.
- Profilio kūrimas ir modifikavimas interaktyviai nurodant greičio kitimą profilio paviršiuje. Programoje yra dvi sintezės galimybės:
  - visiškai atvirkštinio uždavinio sprendimas konforminio atvaizdavimo metodu,
  - mišraus atvirkštinio uždavinio sprendimas taikant papildytą atkarpų metodą.
- Profilio modifikavimas, interaktyviai nurodant naujus geometrinius parametrus:
  - naują maksimalų storį ir / arba gaubtumą,
  - naują priekinės briaunos spindulį,
  - naują užpakalinės briaunos storį,
  - naują vidurio liniją,
  - užsparnio atlenkimą,
  - profilio kontūro keitimą naudojant žymeklį.

Pradiniai duomenys: aptekėjimo sąlygos (atakos kampas ir Reinoldso skaičius) ir profilio geometrija, arba reikalavimai, keliami profilio savybėms.

Profilio kontūras ir pėdsako trajektorija sudalinami tiesiomis atkarpomis. Kiekvienoje profilio atkarpoje yra išilgai atkarpos tiesiškai kintantis sukuringumas. Kiekvienoje profilio ir pėdsako atkarpoje yra pastovaus intensyvumo šaltiniai. Esant pirmam priartėjimui šaltinių intensyvumas yra lygus nuliui. Kituose priartėjimuose šaltinių srautu modeliuojamas pasienio sluoksnio ir pėdsako

išstūmimo storis. Kiekvienos juostos šaltinių intensyvumas  $\sigma_i$  yra skirtingas (13 pav.). Anglų kalba šis metodas vadinamas *panel method*.



**13 pav.** Analizuojamas profilio modelis (Drela 1989)

Programoje *Xfoil* yra du atvirkštinio uždavinio sprendimo metodai: visiškai atvirkštinis metodas ir iš dalies atvirkštinis metodas. Pagal visiškai atvirkštinį metodą apskaičiuojama visa profilio geometrija iš tam tikro greičio kitimo profilio paviršiuje, taikant konforminį atvaizdavimą. Pagal iš dalies atvirkštinį metodą taikomas neklampiojo srauto atkarpų metodas, tačiau dalis profilio koordinačių laikomos nežinomomis.

Srauto klampumas profilio paviršiuje ir pėdsake įvertinamas integralinėmis pasienio sluoksnio lygtimis. Laminarinio turbulencinio virsmo vietai nustatyti taikomas  $e^n$  kriterijus. Viso klampiojo sprendinio (profilio paviršiuje ir pėdsake) sąveika su išoriniu potencialiniu srautu modeliuojama srauto išpūtimu. Taip galima patikimai skaičiuoti ir riboto srauto atitrūkimo vietas. Profilio pasipriešinimas nustatomas iš judesio kiekio nuostolių aerodinaminiam pėdsake. Profilis projektuojamas pagal konforminio atvaizdavimo metodą, kuriame iš pageidaujamo greičio kitimo apskaičiuojama profilio forma. Kai žinoma profilio forma, skaičiuojamas slėgio pasiskirstymas profilio paviršiaus potencialiniame sraute prie pasirinkto atakos kampo. Tam naudojamas ypatybių metodo skaitinis variantas, t. y. atkarpų metodas.

Profilio aptekėjimas gaunamas sumuojant laisvąjį lygiagretųjį srautą,  $\gamma$  intensyvumo sūkurių sluoksnio profilio paviršiuje srautą ir  $\sigma$  intensyvumo šaltinių sluoksnio profilio paviršiuje ir pėdsake srautą. Tokio srauto tėkmės funkcija užrašoma (3.1) formule:

$$\Psi(x, y) = u_{\infty}y - v_{\infty}x + \frac{1}{2\pi} \int \gamma(s) \ln r(s; x, y) ds + \frac{1}{2\pi} \int \sigma(s) \theta(s; x, y) ds \quad (3.1)$$

čia  $s$  – koordinatė išilgai sūkurių ir šaltinių sluoksnio;  $r$  – vektoriaus, esančio tarp taško  $s$  ir lauko taško  $x, y$ , modulis;  $\theta$  – vektoriaus kampas, o  $u = V \cos \alpha$ ,  $v = V \sin \alpha$  – laisvojo srauto greičio

komponentai. Iš sąlygos, kad visuose profilio kontūro mazguose tėkmės linijos reikšmė būtų pastovi ir lygi  $\Psi_0$ , gaunama tiesinė lygčių sistema:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \gamma_j - \Psi_0 = -u_{\infty} y_i + v_{\infty} x_i - \sum_{j=1}^{N+N_w-1} b_{ij} \sigma_j ; 1 \leq i \leq N \quad (3.2)$$

Kai profilių mazgų koordinatės  $x_i, y_i$  ir pėdsako mazgų koordinatės yra žinomos, matricų  $a_{ij}$  ir  $b_{ij}$  elementai yra apibrėžti. Šią lygčių sistemą papildžius Kutos (Kutta) ir Žukovskio galinės briaunos sąlyga:

$$\gamma_1 + \gamma_N = 0, \quad (3.3)$$

gaunama tiesinė  $(N+1) \times (N+1)$  lygčių sistema, iš kurios galima rasti  $\gamma_i$  reikšmes profilio  $N$  mazguose ir tėkmės funkcijos  $\Psi_0$  reikšmę. Analizuojant profilį, lygčių sistema išsprendžiama dviem atakos kampams  $0^\circ$  ir  $90^\circ$ . Tada sūkuringumo intensyvumą profilio kontūro mazguose bet kokiam atakos kampui  $\alpha$  galima gauti tiesiogiai:

$$\gamma_i = \gamma_{0i} \cos \alpha + \gamma_{90i} \sin \alpha + \sum_{j=1}^{N+N_w-1} b'_{ij} \sigma_j \quad 1 \leq i \leq N, \quad (3.4)$$

čia  $\gamma_{0i}$  ir  $\gamma_{90i}$  – sūkuringumo kitimas, atitinkantis  $0$  ir  $90^\circ$  atakos kampus,  $b'_{ij} = -a_{ij}^{-1} b_{ij}$  – šaltinių įtakos koeficientų matrica. Kai sūkuringumo lygtyje šaltinių intensyvumas lygus nuliui ( $\sigma_l = 0$ ), iš jos galima tiesiogiai gauti sprendinį neklampiajam srautui, esant bet kuriam atakos kampui. Klampiajame sraute šaltinių intensyvumas iš anksto nežinomas, todėl sūkuringumo lygtį reikia spręsti priartėjimo būdu kartu su pasienio sluoksnio lygtimis.

Slėgio pasiskirstymas profilio paviršiuje ir Reinoldso skaičius yra pradiniai duomenys pasienio sluoksniui skaičiuoti. Pasienio sluoksnio skaičiavimas pradedamas nuo priekinio kritinio taško atskirai viršutiniame ir apatiniame paviršiuje. Kritiniame taške prasideda laminarinis pasienio sluoksnis. Pasienio sluoksnio parametrų kitimas skaičiuojamas integraliniu metodu. Pasienio sluoksnio integralinės lygtys sprendžiamos taikant skaitinį Rungės ir Kutos metodą, automatiškai parenkant integravimo žingsnio ilgį. Skaičiuojami šie pasienio sluoksnio parametrai profilio paviršiuje: išstūmimo storis  $\delta^*$ , formos parametras  $H$  ir trinties koeficientas  $c_f$ .

Skaičiuojant laminarinį pasienio sluoksnį, kiekviename žingsnyje kartu tikrinamas ir laminarinio pasienio sluoksnio stabilumas. Kai Reinoldso skaičius profilio stygos atžvilgiu yra mažesnis už  $3 \cdot 10^6$ , mažos turbulencijos užbėgančiame sraute glotnaus profilio paviršiuje laminarinio pasienio sluoksnio stabilumui didžiausią įtaką turi slėgio gradientas.

Kai slėgio gradientas yra neigiamas, t. y. kai greitis profilio paviršiuje didėja, laminarinis pasienio sluoksnis išlieka stabilus. Slėgiui pradėjus didėti, tai yra išorinio srauto greičiui pradėjus mažėti, laminarinis pasienio sluoksnis tampa nestabilus. Čia skaičiuojamas Tolmino (Tolmien) ir Šlichtingo (Schlichting) bangų amplitudės didėjimo eksponentės laipsnis. Vėliau, kai  $H = 4$ , laminarinis pasienio sluoksnis atitrūksta arba virsta turbulenciniu, kai trikdžių amplitudės didėjimo laipsnis pasiekia kritinę ribą.

Laminarinio pasienio sluoksnio arba laminarinio šlyties sluoksnio stabilumas įvertinamas pagal trikdžių eksponentiškai didėjančios amplitudės koeficientą:

$$n = \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = -\alpha_i^*(x_2 - x_1) \quad (3.5)$$

Kritinė  $n$  reikšmė nustatoma iš eksperimentinių rezultatų. Todėl šis metodas ir vadinamas pusiau empiriniu.

Jeigu laminarinis pasienio sluoksnis atitrūksta nuo profilio paviršiaus, nespėjęs virsti turbulenciniu, susidaro laminarinis šlyties sluoksnis, kuris taip pat yra nestabilus. Kai trikdžių stiprėjimo laipsnis pasiekia kritinę ribą, jis virsta turbulenciniu šlyties sluoksniu. Turbulencinis šlyties sluoksnis perduoda išorinio srauto energiją link profilio paviršiaus. Šlyties sluoksnis vėl prisijungia prie profilio paviršiaus. Susidaro vadinamasis laminarinio atitrūkimo burbulas. Nuo turbulencinio pakartotinio prisijungimo arba nuo laminarinio-turbulencinio virsmo vietos, jeigu laminarinis pasienio sluoksnis neatitrūksta nuo profilio paviršiaus, skaičiuojami turbulencinio pasienio sluoksnio parametrai: storis, formos parametras ir trinties koeficientas. Kartais turbulencinis pasienio sluoksnis atitrūksta nuo profilio paviršiaus, nepasiekęs užpakalinės briaunos. Tokiu atveju nuo atitrūkimo vietos skaičiuojamas turbulencinis šlyties sluoksnis. Kadangi pasienio sluoksnio parametrai turi įtakos išoriniam srautui, tai skaičiuojama priartėjimų būdu.

Žinant, kaip kinta slėgis ir pasienio sluoksnio parametrai profilio paviršiuje, galima apskaičiuoti integralines profilio charakteristikas: keliamosios jėgos koeficientą, momento koeficientą ir pasipriešinimo koeficientą. Papildomas parametras, apibūdinantis profilio aptekėjimo ypatybes yra laminarinio-turbulencinio virsmo vieta profilio viršutiniame ir apatiniame paviršiuje. (Drela 1989)

### 3.2 Kompiuterinės programos *Xflr5* veikimo metodika

*Xflr5* – tai *Xfoil* pagrindu sukurta kompiuterinė programa skirta analizuoti sparno profilius, sparnus ir orlaivius, kai Reinoldso skaičius yra sąlyginai mažas. Ši programa turi vartotojui pritaikytą patogią aplinką (angl. *User friendly interface*). Su šia kompiuterine programa galima:

1. Analizuoti sparno profilius taip pat, kaip ir *Xfoil* kompiuterine programa, kuri taiko tiesioginį ir atvirkštinį uždavinio sprendimo metodą.
2. Modeliuoti sparno profilį, sparną ar visą orlaivį. Vėliau jį tirti taikant kilimo linijos teoriją (angl. *Lifting line theory*), sukuriu tinklelio metodą (angl. *Vortex Lattice Method*) arba 3 D panelių metodą (angl. *3D Panel method*) (*Xflr5*...2016).

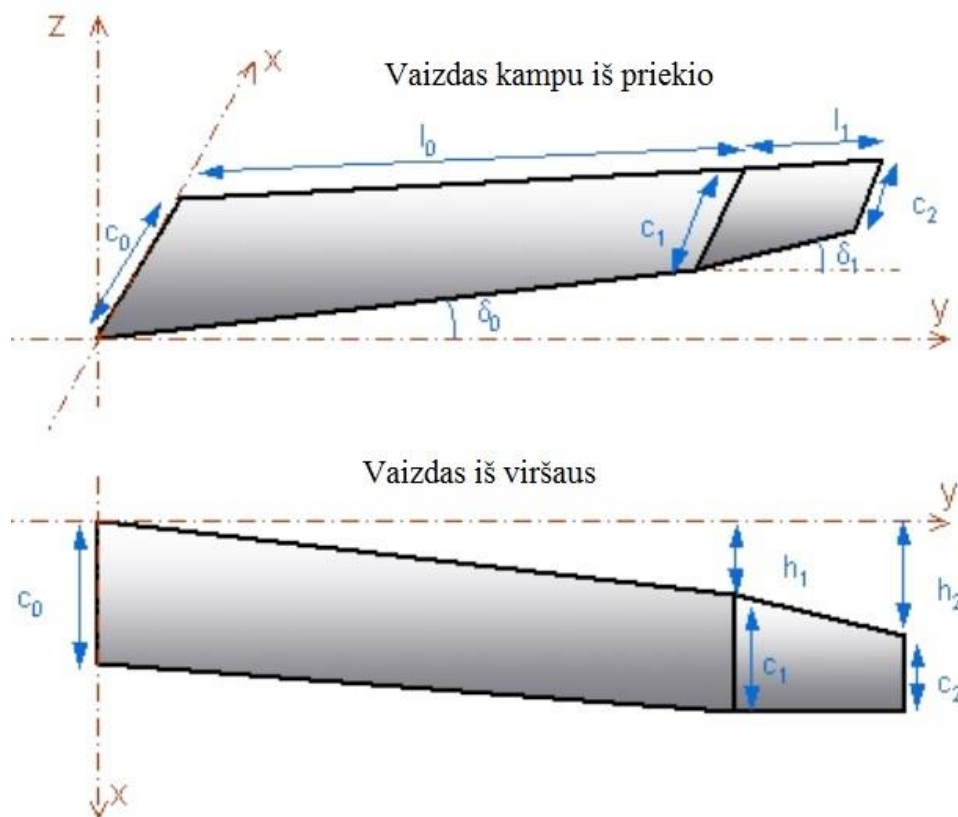
Pagrindiniai tikslai, kuriant šią programą, buvo sukurti programą, kuri būtų patogi ir lengvai prieinama vartotojui ir originalaus *Fortran* kodo išvertimas į *C/C++* programavimo kalbą. Šis darbas buvo atliekamas pagal mokslininkų Marko Drellos ir Haroldo Jungreno (Harold Youngren) mokslinius darbus, kuriuose buvo aprašomi pagrindiniai mažo greičio ir mažai klampaus srauto aerodinaminiai dėsniai. Algoritmai naudojami *Xflr5* programoje yra tokie patys, kaip ir *Xfoil* programoje, išskyrus patį vertimą iš *Fortran* kodo į *C/C++* programavimo kalbą. Yra pastebėta atvejų, kai programa *Xfoil* ir *Xflr5* rezultatai nesutampa. Šie nesutapimai atsiranda tik dėl jau anksčiau minėto vertimo (*Xflr5 Guidelines* 2014). Tokie atvejai yra labai reti, bet kadangi tikimybė yra, savo darbe sparno profilį tirsiu *Xfoil* programa, o visą orlaivį ir sparną *Xflr5* programa. Orlaivio ar sparno tyrimo funkcija atsirado tik 2.0 *Xflr5* versijoje, mokslininkui Matju Šereriui pasiūlius. Šis mokslininkas *Matlab* kompiuterine programa parašė kodą naudodamasis netiesinės keliamosios jėgos linijos teorija (angl. *Non-linear Lifting Line Theory*). Šis kodas buvo skirtas skaičiuoti viso sparno, o ne tik profilio aerodinamines charakteristikas, kai Reinoldso skaičius yra mažas. Vėliau programos *Xflr5* kodas buvo dar karta pakeistas, atsirado galimybė skaičiuoti sukūriu tinklelio metodu (angl. *Vortice Lattice Method*). Šis metodas galėjo analizuoti sudėtingesnių geometrinių formų sparnus, nei prieš tai minėtas netiesinės keliamosios jėgos linijos metodas.

2007 m. kovo 31 d. *Xflr5* kompiuterinė programa tapo atviro kodo (angl. *Open Source*). Dar vėliau pasirodė 3, 4, 5 ir 6 programos versijos. 3.0 versijoje atsirado galimybė analizuoti orlaivius su uodega, tai yra programa analizavo tiek aukštumos vairo tiek stabilizatoriaus aerodinamines charakteristikas. 4.0 versijoje jau buvo galima tirti ir modeliuoti orlaivio liemenį. 5-toji programos versija nepasiūlė jokių naujų funkcijų, tačiau programos kodas buvo parašytas *Qt4* platforma. Tai buvo padaryta tam, kad *Xflr5* taptų prieinama *MAC*, *Unix* ir *Linux* operacinių sistemų vartotojams. Paskutinioji 6 versija, su kuria šiame darbe bus modeliuojamas ir tiriamas orlaivis *Aero L-39*, pasirodė 2010 metų rugsėjį. Ši versija leidžia analizuoti orlaivio stabilumą ir valdomumą, taip pat

3D panelių metodas gali būti taikomas tiriant visą orlaivį, tai yra su sparnais, liemeniu ir uodega. *Xflr5* v6.0 pasikeitimai (*Xflr5* Guidelines 2014):

1. Stabilumo ir valdomumo analizavimas.
2. Grupės sparnų ar sparnų profilių analizavimas.
3. 3D panelių metodas (angl. 3D panel method) veikia skirtingai atskiriems sparnam ir visam orlaiviui, taip pagerinamas tyrimų tikslumas.

Naudodami programą *Xflr5* analizuosime sparno ir viso orlaivio aerodinamines charakteristikas. Tam, kad programa galėtų atlikti analizę, turėsime nurodyti sparno ir viso orlaivio geometrines charakteristikas. Į *Xflr5* programą įvedamos sparno geometrinės charakteristikos parodytos (14 pav.).



**14 pav.** Sparno geometrinės charakteristikos (*Xflr5* Guidelines 2014)

Čia  $l_0$  – sparno ilgis iki stygos susiaurėjimo,  $l_1$  – sparno dailies po stygos susiaurėjimo ilgis,  $c_0$  – stygos ilgis prie sparno šaknies,  $c_1$  – stygos ilgis prieš stygos susiaurėjimą,  $c_2$  – stygos ilgis sparno ties sparno galu,  $\delta_0$  – sparno strėliškumo kampas iki stygos susiaurėjimo,  $\delta_1$  – sparno strėliškumo kampas po stygos susiaurėjimo,  $h_1$  – stygos sutrumpėjimas iki sparno siaurėjimo,  $h_2$  – stygos susiaurėjimas sparno galutinėje dalyje.

Visas orlaivio liemu bus modeliuojamas įvedant liemens geometrines charakteristikas, kurios yra žinomos, į kompiuterinę programą *Xflr5*. Orlaivio liemens geometrines charakteristikas galima įvesti naudojant tekstinį dokumentą, kuris trumpinamas .txt. Šiame tekstiniame dokumente (15 pav.) bus nurodomi taškai 3D koordinačių sistemoje. Vėliau šis tekstinis dokumentas yra importuojamas į programą. Programa apdoroja įvestus duomenis ir vizualiai atvaizduoja liemenį pagal nurodytas geometrines charakteristikas.

|             |                               |
|-------------|-------------------------------|
| Body_Name   | Kūno pavadinimas              |
| ...         |                               |
| FRAME       | Koordinačių ašys              |
| x_1 y_2 z_1 |                               |
| ...         | Čia rašomos taškų koordinatės |
| x_n y_n z_n |                               |
|             | Čia vietoje n rašome skaičių  |
| OFFSET      | Čia vietoje o rašome skaičių  |
| X_o Y_o Z_o |                               |
|             |                               |
| BODYTYPE    | Čia rašome 1 arba 2           |
| 1 or 2      |                               |

**15 pav.** Tekstinis dokumentas, su kūno kordinatėmis (*Xflr5* Guidelines 2014)

Šiame dokumente, antroje eilutėje, įrašomas kūno pavadinimas. Trečioje eilutėje, pažymėtoje daugtaškiu, stulpeliu rašomos kūno taškų koordinatės. Vėliau eilutėje, kuri užrašyta  $x_n$ ,  $y_n$  ir  $z_n$ , vietoje  $n$  rašome skaičius. Skaičius  $n$  parodo, kiek taškų nurodys kūno arba orlaivio liemens kraštus. Tokių taškų gali būti daugiau nei du, todėl reikia nurodyti tikslų jų skaičių. Žemiau žodžio *OFFSET* esančioje eilutėje vietoje mažosios raidės  $o$  rašome skaičių. Šis skaičius nurodo objekto kraštus. Kūno kraštas – tai toliausiai nuo kordinačių ašies centro atitolęs taškas. Galiausiai eilutėje, esančioje žemiau žodžio *BODYTYPE*, įrašome skaičių 1 arba 2. Skaičius 1 reiškia, kad kūnas bus importuotas ir sudarytas iš plačių panelių, skaičius 2 reiškia, kad kūnas bus importuotas *B-Splines* metodu. Pagrindiniai skirtumai taip šių importavimo tipų yra:

1. Plačių panelių tipas yra labiau pritaikytas teoriniam analizavimui. Programoje importuotas profilis nebus labai tolygus dėl didelių tarpų tarp panelių. Šis metodas skirtas ištirti aerodinamines charakteristikas, kai jos yra nežinomos.

2. B-Splines tipas yra skirtas kūnui ar profiliui kurti. Jei programos naudotojas žino, kokias aerodinamines charakteristikas nori gauti ir jam reikia sukurti kūną ar profilį šis metodas yra tinkamiausias.

### 3.3 Kompiuterinės programos *JavaFoil* veikimo metodika

*JavaFoil* yra kompiuterinė programa, skirta tirti sparno profilius. Ši programa sukurta mokslininko Martino Heperle. Pradžioje mokslininkas, naudodamasis C programavimo kalba, sukūrė kompiuterinę programą *CalcFoil*. Vėliau mokslininkui kilo idėja šią programą perrašyti *Java* programavimo kalba. *JavaFoil* turi patogią naudotojui aplinką ir yra labai paprasta. Ši programa veikia dviem pagrindiniais metodais (Heperle 2014):

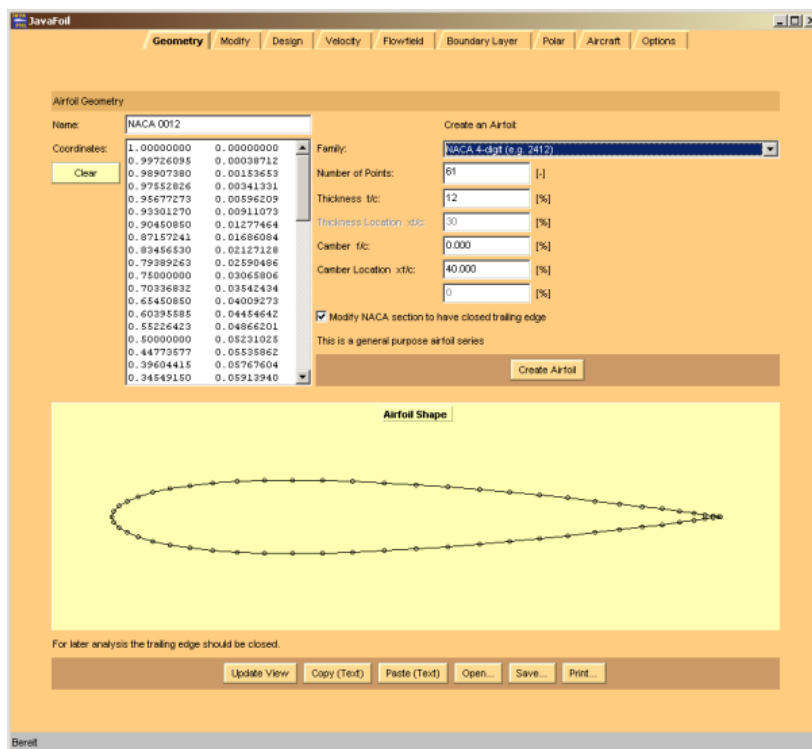
1. Potencialaus srauto analizė. Taikomas panelių metodas, kai sukūrių pasiskirstymas kinta tiesiškai. Programa apskaičiuoja lokalaus srauto parametrus esant pasirinktam atakos kampui, iš šių parametrų galima gauti keliamosios jėgos koeficientą esant tam tikram atakos kampui, kai Reynoldso skaičius yra pastovus, taip pat momento koeficiento priklausomybę nuo atakos kampo ir kitus aerodinaminius parametrus.
2. Pasienio sluoksnio analizė. Tiriamas viršutinis ir apatinis profilio paviršius pradedant nuo sąstingio taško. Programa sprendžia diferencialines lygtis ir apskaičiuoja įvairius pasienio sluoksnio parametrus, naudodama integralinį metodą (angl. Integral Method). Uždavinio sprendimo lygtis ir kriterijus aprašė mokslininkas Eppleris (Eppler, Somers 1980;1978). Iš pasienio sluoksnio parametrų gaunamas pasipriešinimo koeficientas.

Analizuodama programa tiria profilį 1-u ir 2-u metodu esant skirtingiems atakos kampams. Vėliau iš gautų rezultatų gaunama visa profilio poliarė, kai pasirinktas vienas Reynoldso skaičius. Ši programa leidžia modifikuoti sparno profilio geometriją, taip pat yra galimybė pridėti užsparnius ar priešsparnius. Programa yra pranašesnė už *Xfoil* ar *Xflr5* kompiuterinę programą, nes su *JavaFoil* galima tirti profilius, sudarytus iš skirtingų elementų, tokius kaip plyšinis sparno profilis, profilis su plyšiniu priešsparniu ar profilis su plyšiniu užsparniu. Šiame darbe tiriama plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio *Aero L-39* sparno profilio aerodinaminėms charakteristikoms.

Programos kūrėjas apibrėžia programos naudojimosi apribojimus, programa turi paklaidas, todėl pasitikėti vien tik programos gautais rezultatai negalima, patartina atlikti praktinius bandymus vėjo tuneliuose.

*JavaFoil* yra vieno lango (angl. *single window*) kompiuterinė programą. Programos aplinka sudaro tik vienas langas, kuriame yra 9 kortelės (16 pav.). Programa parašyta su pasaulyje gerai žinoma programavimo kalba *Java*, todėl norint naudotis programa būtina turėti *Java* atkuriančia

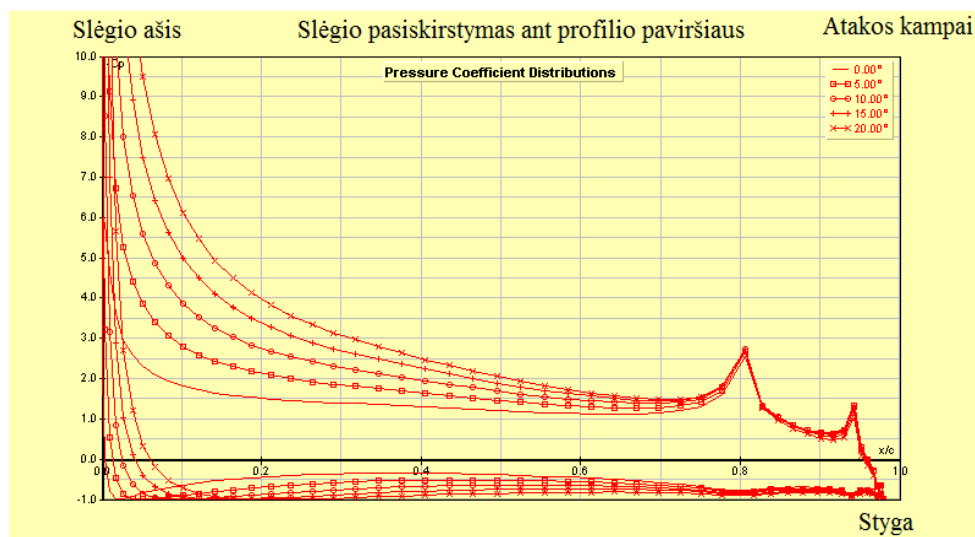
programinę įrangą, žinoma kaip *Java Player*. Šią programą galima paleisti per interneto naršyklę, kas leidžia šia programa naudotis *Linux*, *MAC* ar *Unix* operacinių sistemų naudotojams. Kitas būdas paleisti programą tai instaliuoti ją į savo namų kompiuterį.



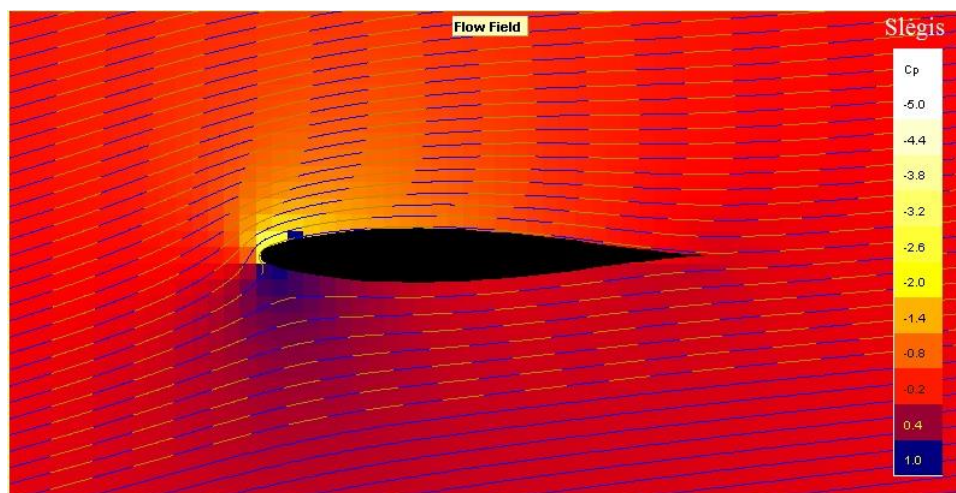
16 pav. Kompiuterinės programos *JavaFoil* aplinka (Martin Heperle 2014)

Pirmoji kortelė, pavadinimu *Geometry*, vaizduoja pasirinktą sparno profilį, kairėje pusėje laukeliuose parodytos sparno profilio taškų koordinatės. Dešinėje kortelės pusėje sparno profilį galima modifikuoti – keisti profilio storį, taškų skaičių bei maksimalaus storio vietą. Antroji kortelė, pavadinimu *Modify*, taip pat kaip ir pirmoji kortelė leidžia keisti profilį sudarančių taškų, skaičių profilio storį, maksimalaus storumo vietą. Taip pat šitoje kortelėje galima pasirinkti užsparnių atlenkimo kampą bei užsparnio stygos ilgį. Trečioji kortelė, pavadinimu *Design*, šioje kortelėje galima sukurti sparno profilį pagal norimą slėgio pasiskirstymą virš sparno profilio. Ši kortelė skirta naujiems sparno profiliams kurti. Ketvirtoji kortelė pavadinimu *Velocity*, šioje kortelėje galima tirti slėgio, srauto greičio ar Macho greičio pasiskirstymą ant profilio paviršiaus. 17 pav. pavaizduotas orlaivio *Aero L-39* sparno profilis, ištirtas esant skirtingiems atakos kampams ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ) *Velocity* kortelėje. Penktoji kortelė, pavadinimu *Flowfield*, vizualiai vaizduoja srauto greičio vektorius arba slėgio pasiskirstymą aplink sparno profilį. 18 pav. pavaizduotas orlaivio *Aero L-39* sparno profilis ištirtas *Flowfield* kortelėje. Šeštoji kortelė, pavadinimu *Boundary Layer*, rodo pasienio sluoksnio parametrus iš šių parametrų galima nustatyti pasipriešinimo koeficientą. Septintoji kortelė pavadinimu *Polar*, vaizduoja pasirinkto profilio poliarę esant skirtingiems

Reinoldso skaičiams. Taip pat šioje kortelėje galima gauti įvairius grafikus, tokius kaip keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, sukimo momento priklausomybė nuo atakos kampo ir keliamosios jėgos koeficiento reikšmės virš ir po sparno profilio. Aštuntoje kortelėje, pavadinimu *Aircraft*, galima, taip pat kaip ir pirmoje, gauti sparno profilio aerodinamines charakteristikas, kai pasirinktas vienas atakos kampas. Skirtumas tarp 7-tos ir 8-tos kortelės yra tai, kad 8 – toje galima nurodyti orlaivio sparno apkrovimą, kurio matavimo vienetas kilogramas į kvadratinį metrą –  $\text{kg/m}^2$ , programa apskaičiuoja aerodinaminius parametrus esant skirtingoms sparno apkrovoms. Paskutinioji – devintoji kortelė, pavadinimu *Options*, šioje kortelėje galima keisti programos specifikacijas, tokias kaip kalba, matavimo vienetai ir programos aplinka.



**17 pav.** Slėgio pasiskirstymas virš orlaivio L-39 sparno profilio, pavaizduotas grafike



**18 pav.** Slėgio pasiskirstymas virš orlaivio L-39 sparno profilio, pavaizduotas vizualiai

## 4. PRIEŠSPARNIŲ ĮTAKA ORLAIVIO *L-39* SPARNO PROFILIO AERODINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS

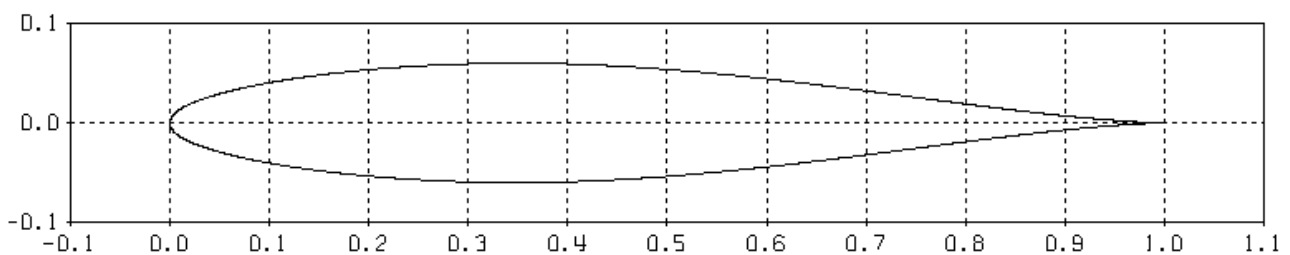
Šioje darbo dalyje tiriama, kaip pasikeičia orlaivio *Aero L-39* sparno profilio aerodinaminės charakteristikos, pridėjus plyšinį ir atlenkiamos noselės priešsparnį. Tyrimai atliekami naudojant kompiuterines programas *Xfoil* ir *JavaFoil*. Rezultatai susisteminti ir pateikti grafiškai naudojant *MS Excel* kompiuterinę programą.

### 4.1 Orlaivio *Aero L-39* sparno profilio aerodinaminis tyrimas

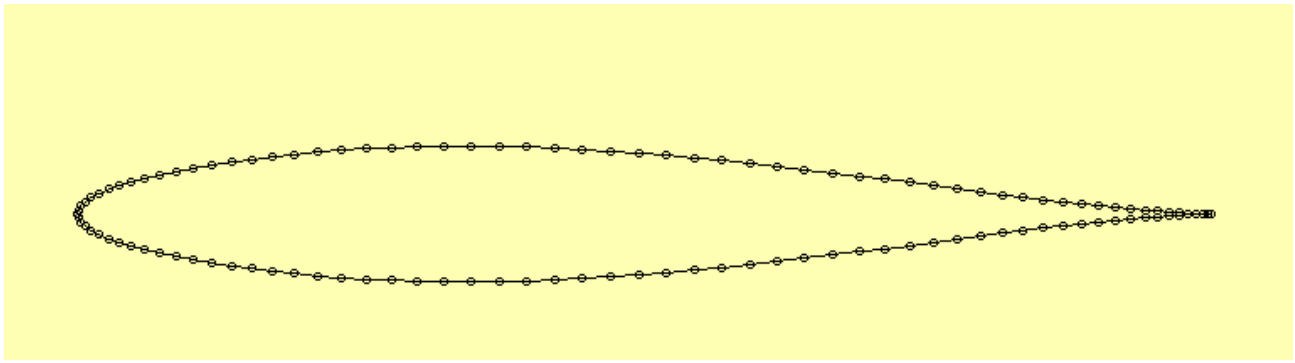
Tam, kad galėtume suprasti, kaip pasikeičia orlaivio *Aero L-39* sparno profilio aerodinaminės charakteristikos pridėjus atlenkiamos noselės ir plyšinį priešsparnį, visų pirma, turime ištirti orlaivio sparno profilio aerodinamines charakteristikas be išskleistų užsparnių ir priešsparnių. Aerodinaminėms charakteristikoms nustatyti bus reikalingi du grafikai, tai yra keliamosios jėgos  $C_l$  priklausomybė nuo atakos kampo  $\alpha$  ir poliarė. Poliarė – tai keliamosios jėgos  $C_l$  priklausomybė nuo pasipriešinimo koeficiento  $C_d$ . Pradiniai duomenys, kurių reikia norint ištirti sparno profilio aerodinaminės charakteristikas, yra šie:

1. Sparno profilis.
2. Reinoldso skaičius.
3. Atakos kampo ribos.

Pasirinkome orlaivio *L-39* NACA 64A012 sparno profilį. Reinoldso skaičių apskaičiuojame turėdami vidutinę sparno stygą, kuri yra 2,15 m. ir pasirinkdami greitį – 220 km/h. tai yra normalus tūpimo ir kilimo greitis (*Aero Vodochody*, 1998). Apskaičiuotas Reinoldso skaičius 9231365 (*Reynolds number calculator...2017*). Atakos kampo ribos  $1^\circ - 18^\circ$ . 19 ir 20 pav. atvaizduotas orlaivio *L-39* sparno profilis *Xfoil* ir *JavaFoil* aplinkose.



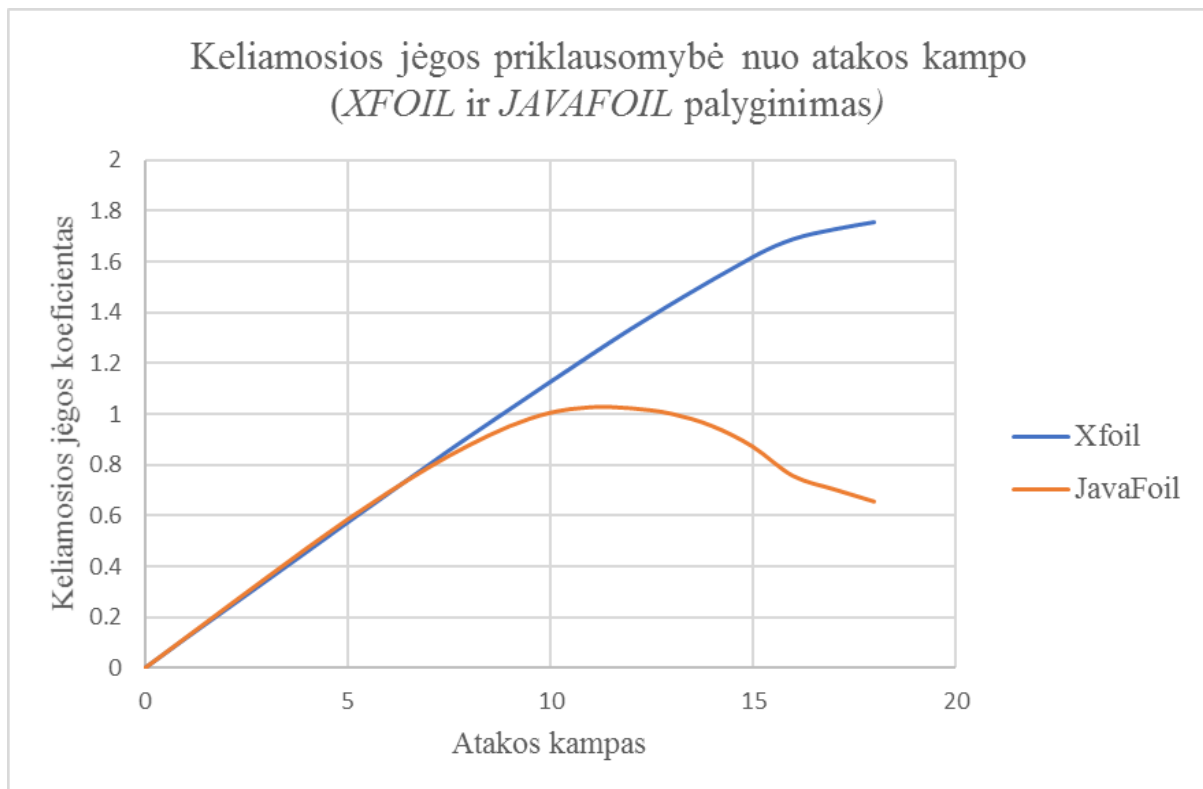
**19 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis kompiuterinės programos *Xfoil* aplinkoje



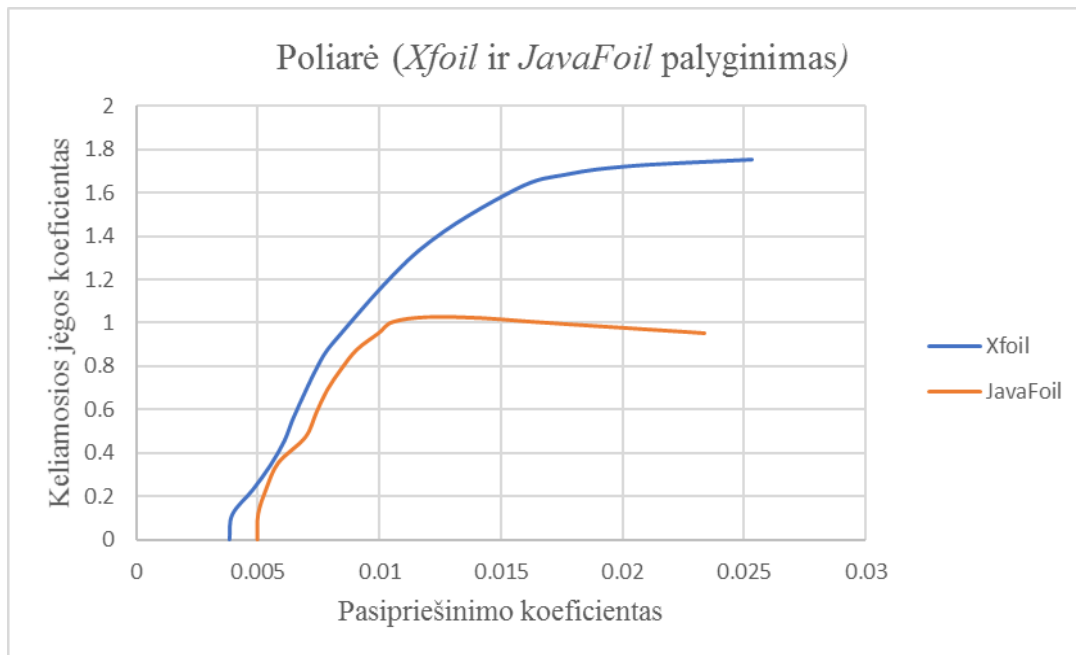
**20 pav.** Orlaivio L-39 sparno profilis kompiuterinės programos *JavaFoil* aplinkoje

Orlaivio L-39 sparno profiliui nubrėžti kompiuterinėse programose *Xfoil* ir *JavaFoil* buvo pasirinktas 121 taškas. Toks taškų skaičius pasirinktas tam, kad šio tyrimo rezultatai būtų tikslesni.

Atikus tyrimą kompiuterinėmis programomis *Xfoil* ir *JavaFoil* gauti rezultatai pavaizduoti 21 ir 22 pav. 21 paveiksle pateiktas grafikas – keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo. 22 paveiksle pateiktas grafikas – poliarė. Poliarė – tai keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo pasipriešinimo koeficiento.



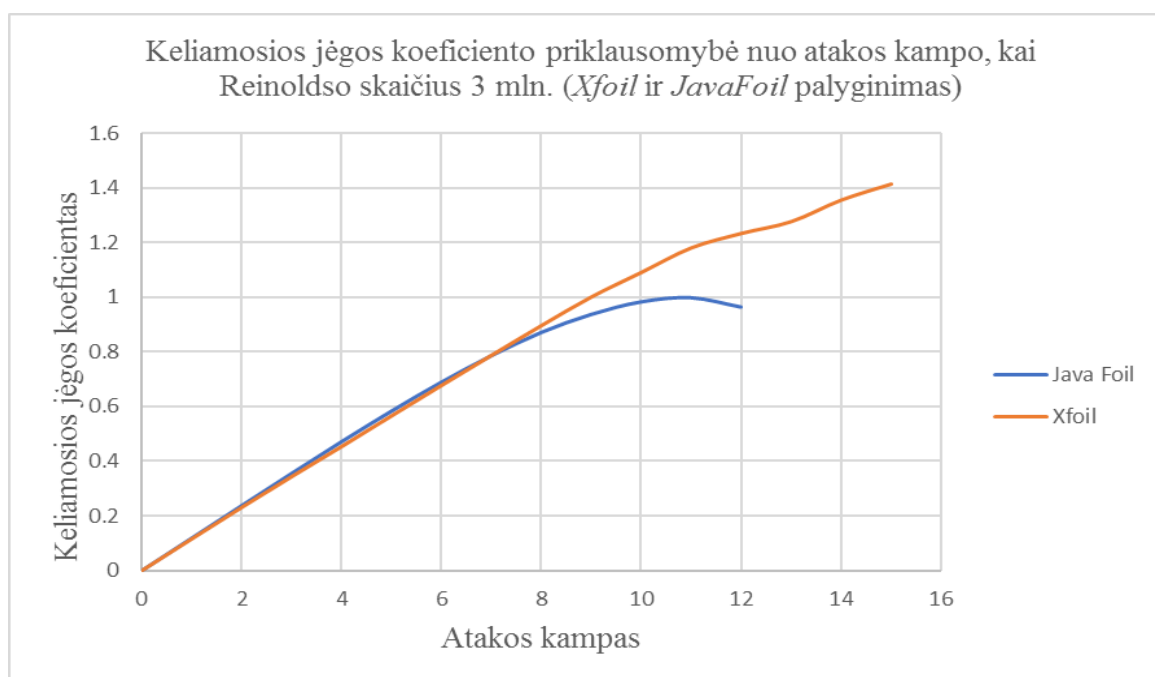
**21 pav.** Aerodinaminių charakteristikų, gautų *JavaFoil* ir *Xfoil* programomis palyginimas



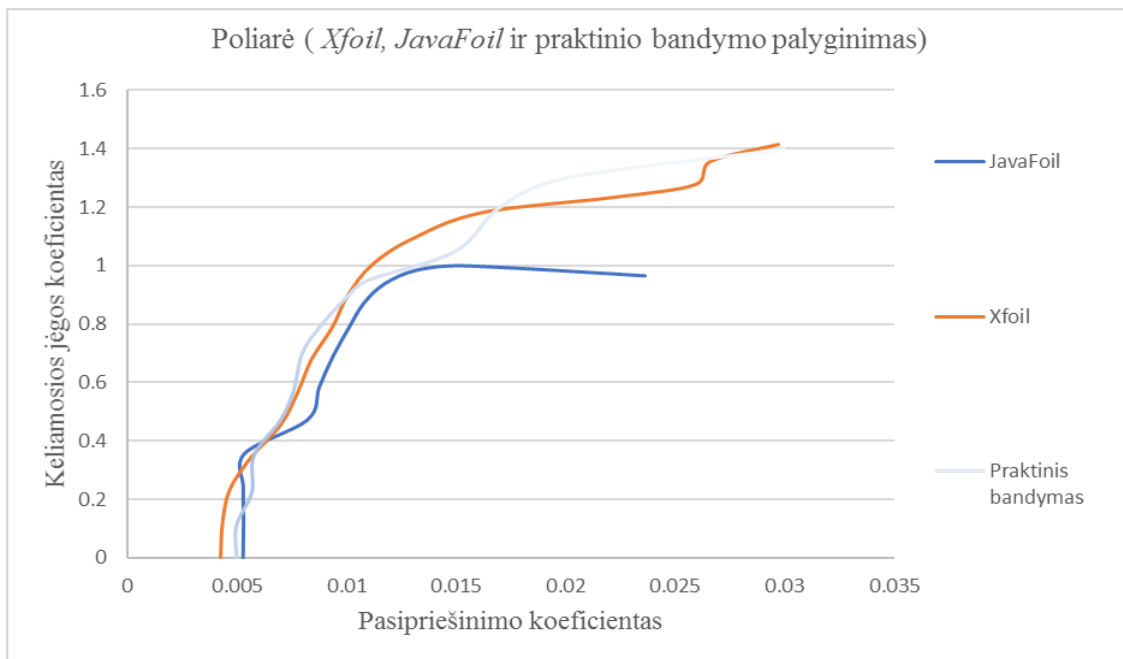
**22 pav.** Aerodinaminių charakteristikų gautų *JavaFoil* ir *Xfoil* programomis palyginimas

Kompiuterinėmis programomis *Xfoil* ir *JavaFoil* ištyrus orlaivio *L-39* sparno profilį, gautas maksimalus keliamosios jėgos koeficientas – 1,029 (*Javafoil*) arba 1,7549 (*Xfoil*), kritinis atakos kampas  $11^\circ$  (*JavaFoil*) arba  $18^\circ$  (*Xfoil*).

Tokį pat tyrimą naudodamiesi *Xfoil* ir *JavaFoil* kompiuterinėmis programomis atliekame pasirinkdami Reinoldso skaičių 3 000 000 (23 ir 24 pav.). Šis tyrimas atliekamas tam, kad galėtumėme palyginti rezultatus su praktiniu bandymu oro tunelyje.

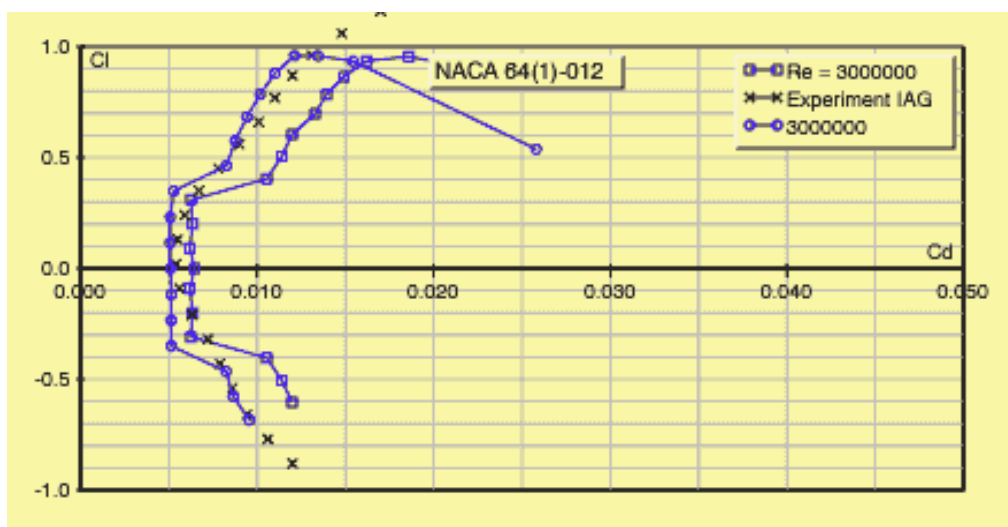


**23 pav.** Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai Reinoldso skaičius 3 mln.



**24 pav.** *JavaFoil*, *Xfoil* ir praktinio bandymo palyginimas

23 ir 24 paveikslai – tai grafikai, kuriuose pavaizduotos gautos aerodinaminės charakteristikos. Šiuose paveiksluose pavaizduotos *Xfoil*, *JavaFoil* ir praktinio bandymo kreivės, kai Reinoldso skaičius yra 3 000 000. Praktinio bandymo kreivę nubrėžėmė pagal mokslininko Martino Heperle atliktą tyrimą (Heperle 2016). Šiame tyrime buvo tirtas NACA 64A012 sparno profilis. Tokį pat profilį tyrėme ir mes. Mokslininkas pasirinko 3 000 000 Reinoldso skaičių, taip pat profilį jungiančius taškus išdėstė taip, kai daugiausia jų būtų sukoncentruota ties sparno profilio priekine ir galine briauna. Tyrimą atliko *JavaFoil* kompiuterine programa ir gautus duomenis palygino su praktinio tyrimo oro tunelyje gautais rezultatais. Mokslininkas pateikė grafiką (25 pav.) kuriame pavaizdavo gautus tyrimo rezultatus.



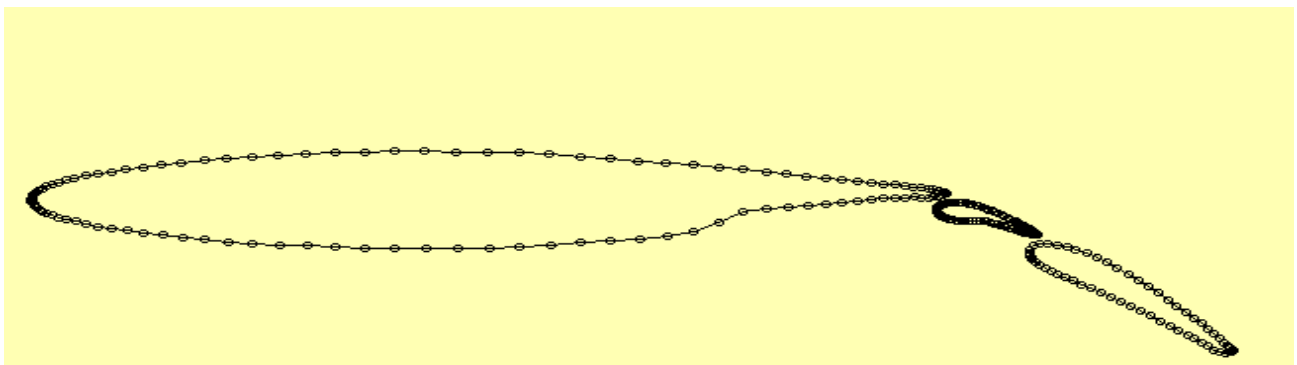
**25 pav.** Martino Heperle tyrimas (Heperle 2016)

Čia pirmoji  $Re = 3\,000\,000$  kreivė, gauta tiriant profilį, kai profilį jungiantys taškai yra sukoncentruoti ties sparno profilio galine briauna. Antroji kreivė, pavadinimu *Experiment*, žymi praktinio tyrimo oro tunelyje gautus, duomenis ir trečioji, pavadinimu  $3\,000\,000$ , tai profilis, kurio taškai išdėstyti kosinusu (angl. *Cosine*).

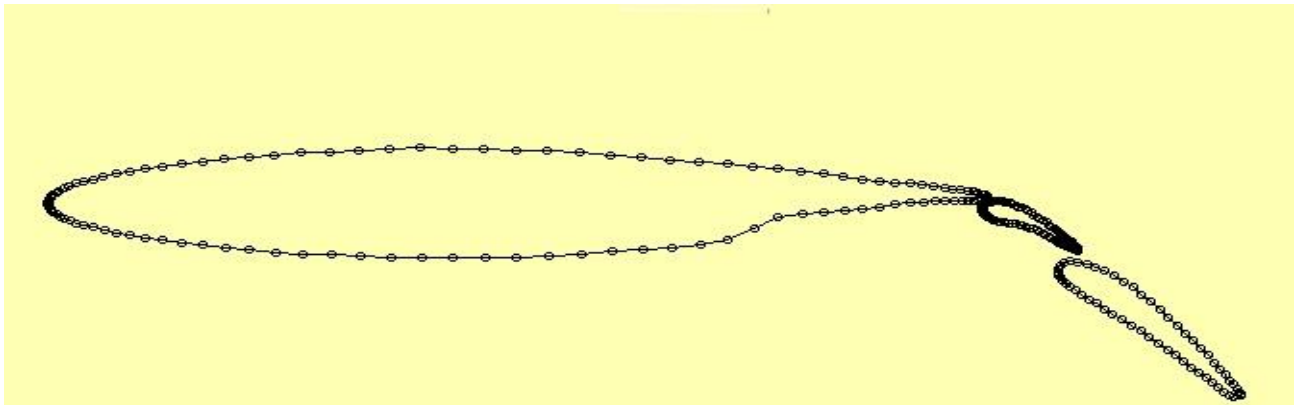
Iš 24 paveikslo matyti, kad *JavaFoil* gauti rezultatai yra patenkinami iki tam tikro keliamosios jėgos koeficiento. 24 paveiksle, kuris vaizduoja šiame darbe atlikta tyrimą, *JavaFoil* ir praktinio bandymo kreivės yra artimos arba koreliuoja iki tam tikro keliamosios jėgos koeficiento. Mokslininkas Martinas Heperle savo tyrime (Heperle 2016) teigia, kad *JavaFoil* netinkamas nustatinėti maksimaliam keliamosios jėgos koeficientui. *JavaFoil* ištirtos aerodinaminės charakteristikos yra tikslios iki tam tikro keliamosios jėgos koeficiento. Šią tendenciją pastebime ir šiame darbe atliktame tyrime (21 ir 22 pav.) Iš 21 ir 24 paveikslų matyti, kad *Xfoil* kompiuterinė programa apskaičiuoja didesnę keliamosios jėgos koeficientą, nei *JavaFoil*. Iš 24 paveikslo matyti, kad *Xfoil* tyrimo rezultatai esant dideliems arti kritiniams atakos kampams yra tikslesni, nei *JavaFoil* tyrimo rezultatai. Šis rezultatų nesutapimas atsiranda dėl skirtingų skaičiavimo metodų. Kompiuterinė programa *JavaFoil*, priešingai nei programa *Xfoil*, į savo skaičiavimų algoritmą neįtraukia pasienio sluoksnio įtakos išoriniam srautui.

#### 4.2 Orlaivio Aero L-39 sparno profilio su išskleistais užsparniais aerodinaminis tyrimas

Orlaivis Aero L-39 turi dviejų plyšių užsparnius (angl. *Double slotted flap*). Šie užsparniai išsiskleidžia  $25^\circ$  kilimui ir  $44^\circ$  tūpimui. Šioje darbo dalyje tiriamos orlaivio sparno profilio aerodinaminės charakteristikos, kai užsparniai yra kilimo ir tūpimo padėtyje. Tyrimą atliksime *JavaFoil* kompiuterine programa, nes ši programa gali tirti profilius sudarytus iš kelių elementų. 26 ir 27 paveiksle pavaizduoti orlaivio L-39 sparno profiliai, kai užsparniai išskleisti  $25$  ir  $44$  laipsniais. Šie profiliai pavaizduoti kompiuterinės programos *JavaFoil* aplinkoje.



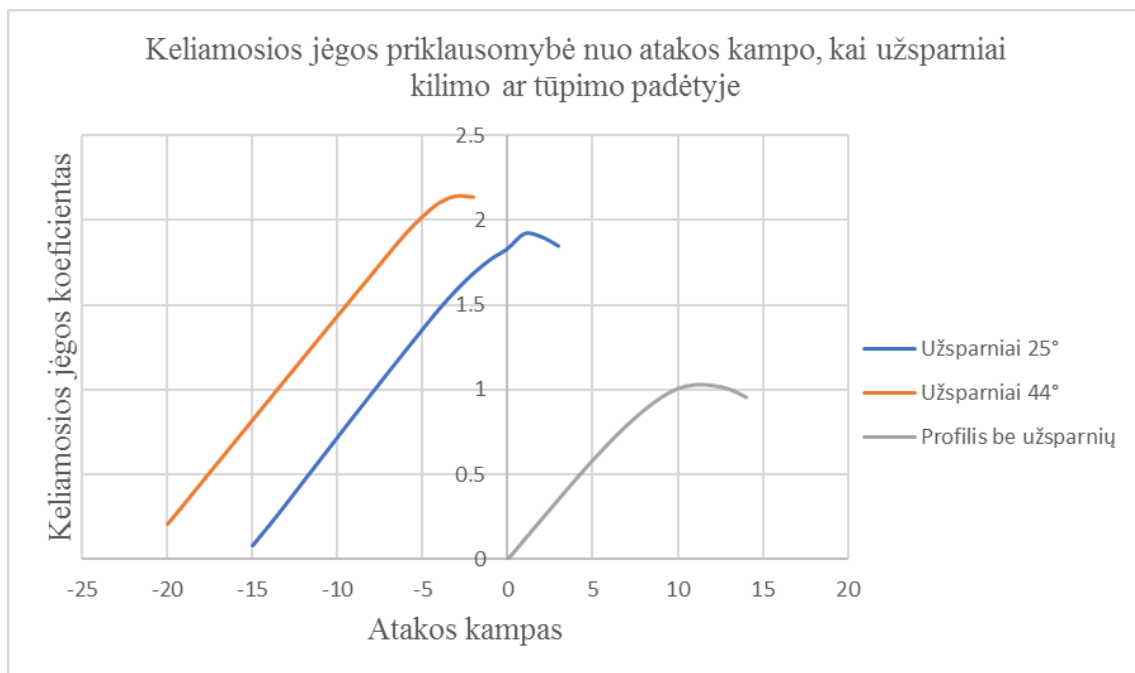
**26 pav.** Orlaivio L-39 sparno profilis, kai užsparniai išskleisti  $25^\circ$  –ių laipsnių kampų.



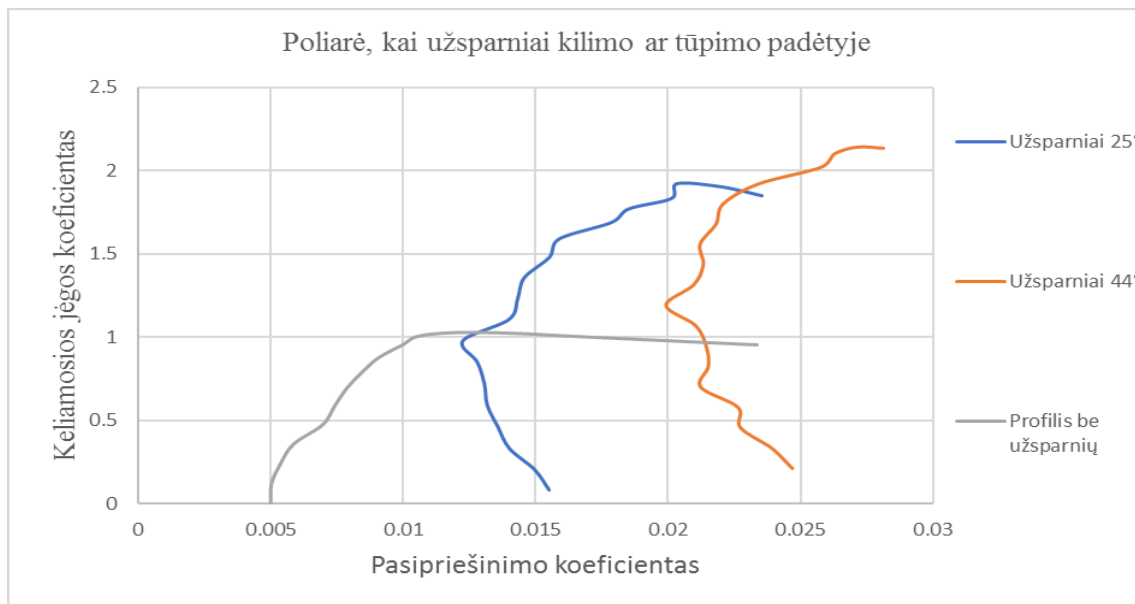
**27 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis, kai užsparniai iškleisti 44 – ių laipsnių kampu.

Kiekvienas orlaivio *L-39* sparno profilio elementas – tai yra profilis, užsparnio priešsparnis ir užsparnis, nubrėžtas apibrėžus 121 tašką. Toks taškų skaičius buvo pasirinktas tam, kad tyrimo rezultatai būtų tikslesni.

28 ir 29 paveiksle pavaizduoti grafikai, kurie gauti ištyrus orlaivio *L-39* sparno profilį kompiuterine programa *JavaFoil*, kai užsparniai išksleisti 25-ių ir 44-ių laipsnių kampu. 28 paveiksle pateiktas grafikas, kuriame pavaizduota keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje. 29 paveiksle atvaizduotas grafikas – poliarė, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje. Poliarė – tai grafikas, kuris vaizduoja keliamosios jėgos koeficiento priklausomybę nuo pasipriešinimo koeficiento.



**28 pav.** Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai užsparniai kilimo ar tūpimo padėtyje



**29 pav.** Poliarė, kai užsparniai kilimo ar tūpimo padėtyje

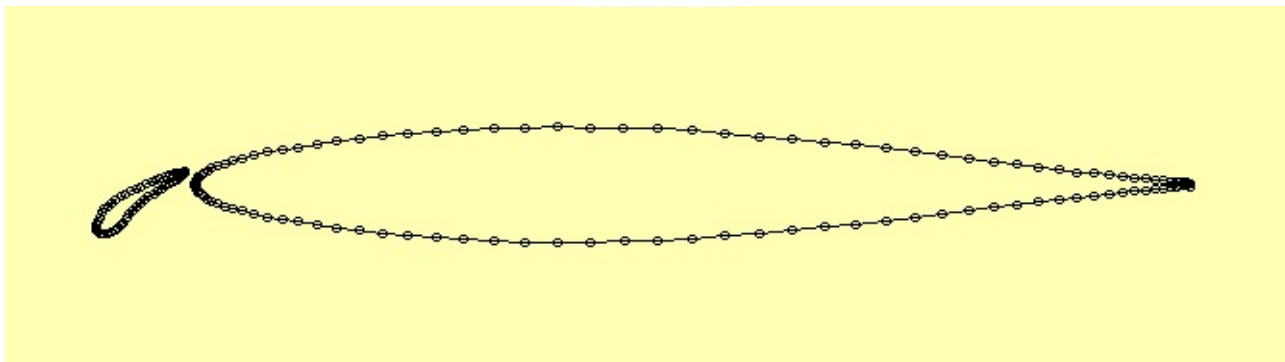
Atlikus tyrimą gautos orlaivio *L-39* sparno profilio aerodinaminės charakteristikos, kurios pavaizduotos 28 ir 29 paveiksluose. Iš šių grafikų, matyti, kad keliamosios jėgos koeficientas, kai užsparniai yra tūpimo padėtyje, yra didesnis. Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai užsparniai yra kilimo padėtyje, yra 1,924. Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai užsparniai yra tūpimo padėtyje, yra 2,143. Taigi, pagal kompiuterinės programos *JavaFoil* pateiktus duomenis, jei iš neutralios sparno profilio padėties išskleisime užsparnius 25-iais laipsniais, keliamosios jėgos koeficientas padidėja 87 %, bet kritinis atakos kampas sumažėja per 10°. Jei iš 25-ių laipsnių užsparnių padėties užsparnius nuleisime iki 44-ių laipsnių padėties keliamosios jėgos koeficientas padidėja 11 %, bet kritinis atakos kampas sumažėja per 4°. Keliamosios jėgos koeficientas išskleidus užsparnius nuo neutralios padėties iki tūpimo padėties padidėja 108 %, bet kritinis atakos kampas sumažėja per 14°.

#### 4.3 Orlaivio *Aero L-39* sparno profilio su plyšiniu priešsparniu aerodinaminis tyrimas

Šioje darbo dalyje tiriamos orlaivio *Aero L-39* sparno profilio su plyšiniu priešsparniu aerodinaminės charakteristikos. Tyrimas atliekamas kompiuterine programa *JavaFoil*, nes ši programa, kitaip nei programa *Xfoil*, gali tirti profilius, sudarytus iš keleto atskirų elementų. Kompiuterinė programa *Xfoil* profilių, sudarytų iš atskirtų elementų, tirti negali. Pirmoje tyrimo dalyje tiriamas sparno profilis, kai užsparniai yra sutraukti, o antroje dalyje, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje.

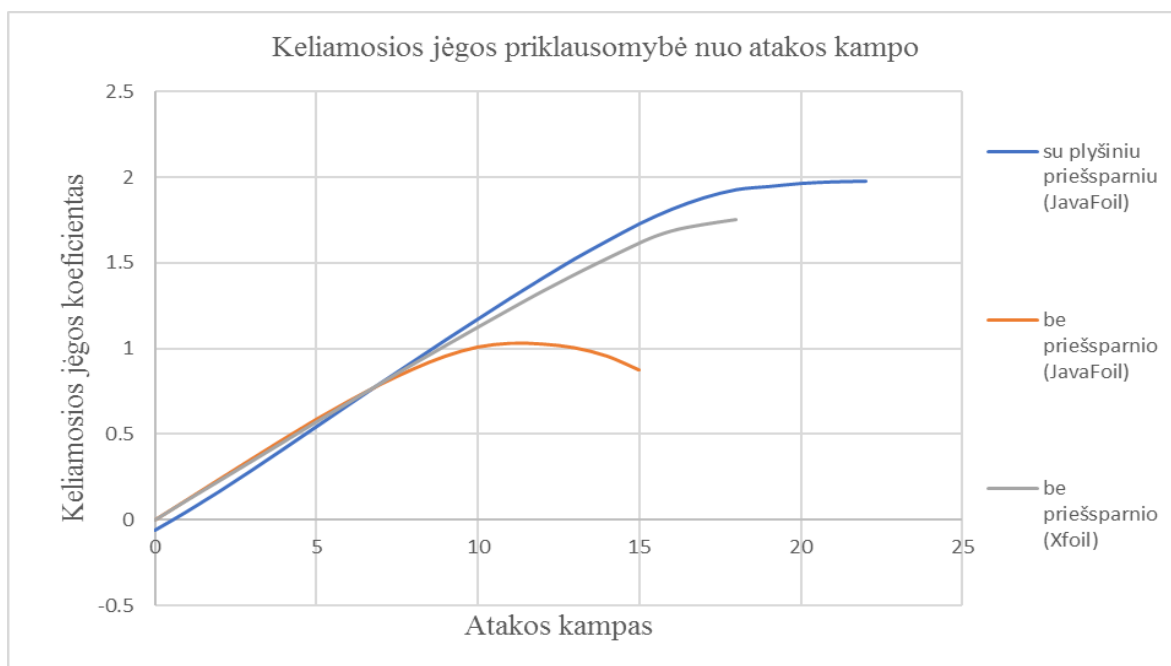
30 paveiksle atvaizduotas orlaivio *L-39* sparno profilis su plyšiniu priešsparniu kompiuterinės programos *JavaFoil* aplinkoje. Kiekvienas elementas, tai yra profilis ir priešsparnis,

buvo apibrėžtas pasirinkus 121 tašką. Toks taškų skaičius pasirinktas tam, kad tyrimo rezultatai būtų tikslesni.

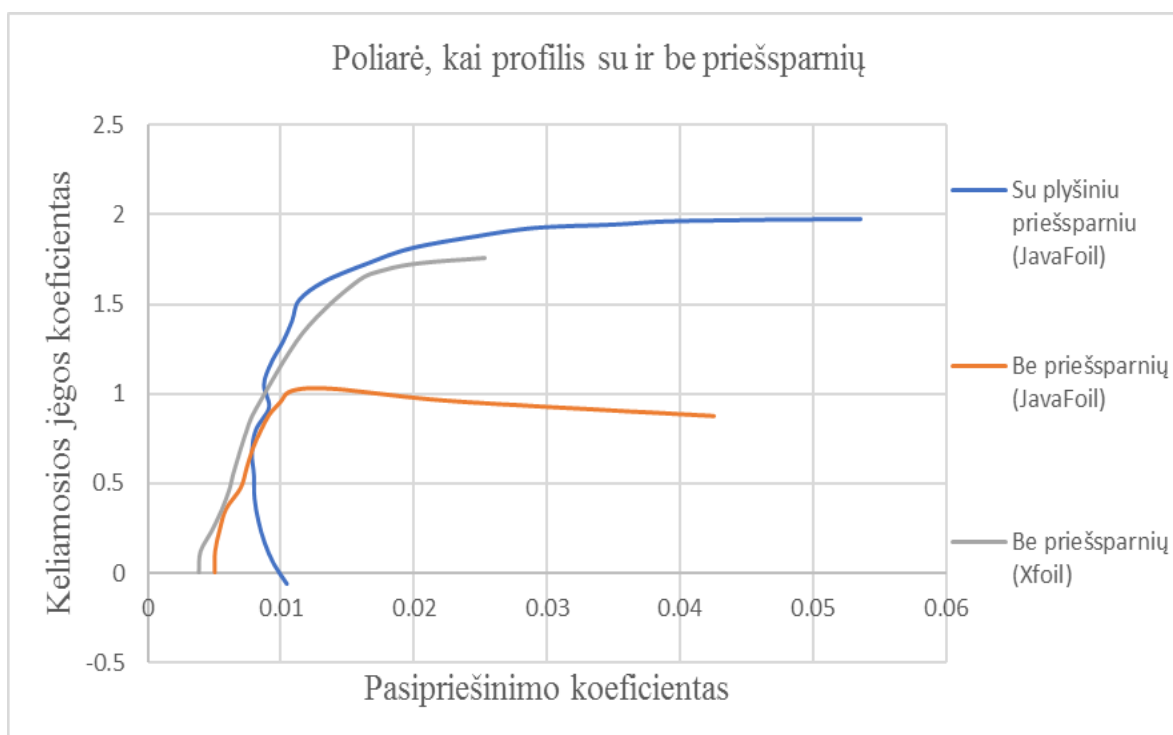


**30 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis su plyšiniu priešsparniu

31 ir 32 paveiksluose pavaizduoti tyrimo rezultatai, gauti ištyrus orlaivio *L-39* sparno profilį su plyšiniu priešsparniu. 31 paveiksle parodyta keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo. Šiame grafike matomos trys kreivės: mėlyna – profilis su priešsparniu (tyrimas atliktas kompiuterine programa *JavaFoil*), raudona – profilis be priešsparnio (tyrimas atliktas kompiuterine programa *JavaFoil*) ir pilka – profilis be priešsparnio (tyrimas atliktas *Xfoil* kompiuterine programa). 32 paveiksle pateiktas grafikas – poliarė. Šiame grafike taip pat matomos trys kreivės: mėlyna – profilis su priešsparniu (tyrimas atliktas kompiuterine programa *JavaFoil*), raudona – profilis be priešsparnio (tyrimas atliktas kompiuterine programa *JavaFoil*) ir pilka profilis be priešsparnio (tyrimas atliktas *Xfoil* kompiuterine programa).



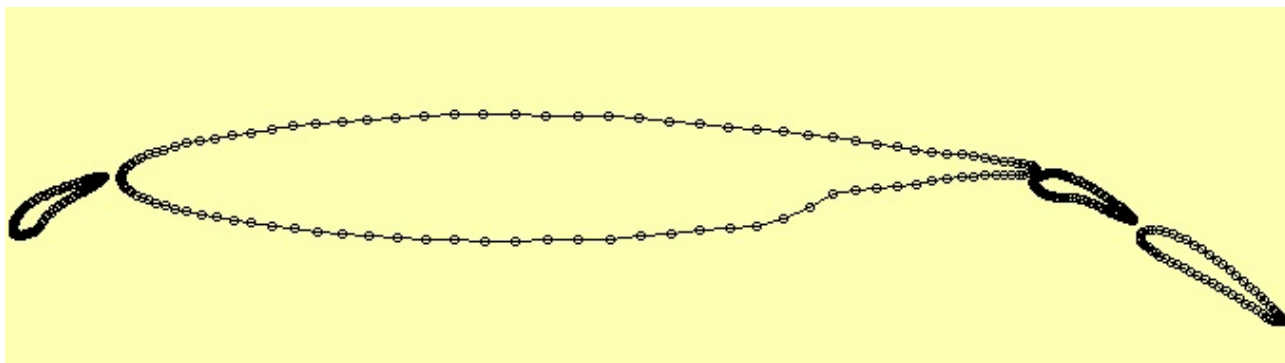
**31 pav.** Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai profilis su plyšiniu priešsparniu



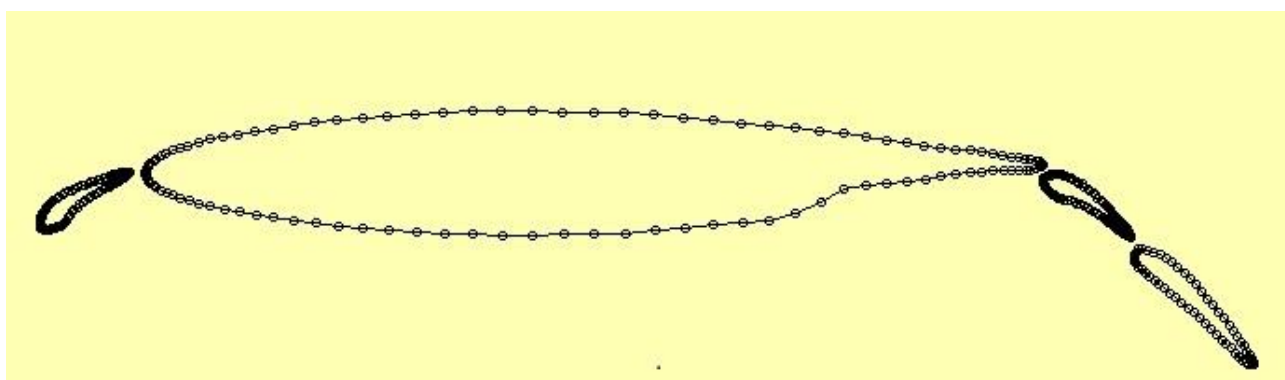
**32 pav.** Poliarė, kai profilis su ir be plyšinių priešsparnių

Iš 31 paveiksle gauto grafiko matyti, kad plyšinis priešsparnis padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą. Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas, kai profilis yra be priešsparnio, yra 1,029 (tyrimas atliktas *JavaFoil* kompiuterine programa). Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas, kai profilis yra su plyšiniu priešsparniu, 1,975. Keliamosios jėgos koeficientas pridėjus plyšinį priešsparnį padidėja 91 %. Kritinis atakos kampas, kai profilis yra be priešsparnio, gautas  $11^\circ$  (tyrimas atliktas *JavaFoil* kompiuterine programa), kai profilis yra su priešsparniu –  $22^\circ$  (tyrimas atliktas *JavaFoil* kompiuterine programa). *Xfoil* ir *JavaFoil* gautų rezultatų tarpusavyje nelyginsime, nes šios programos skaičiuoja skirtingais algoritmais. *Xfoil* kompiuterine programa gauta kreivė įdėta tam kad *Xfoil* skaičiuoja tiksliau nei *JavaFoil*, kai atakos kampas yra arti kritinio. Kompiuterinė programa *JavaFoil* neskaiciuoja pasienio sluoksnio įtakos išoriniam srautui.

Toliau naudodamiesi kompiuterine programa *JavaFoil* atliekame tyrimą, kai orlaivio *L-39* sparno profilis yra su išskleistais užsparniais tūpimui ar kilimui ir plyšiniu priešsparniu. 33 ir 34 paveiksluose pavaizduotas orlaivio *L-39* sparno profilis su plyšiniu priešsparniu, kai užsparniai išskleisti  $25^\circ$  tūpimui ir  $44^\circ$  kylimui.

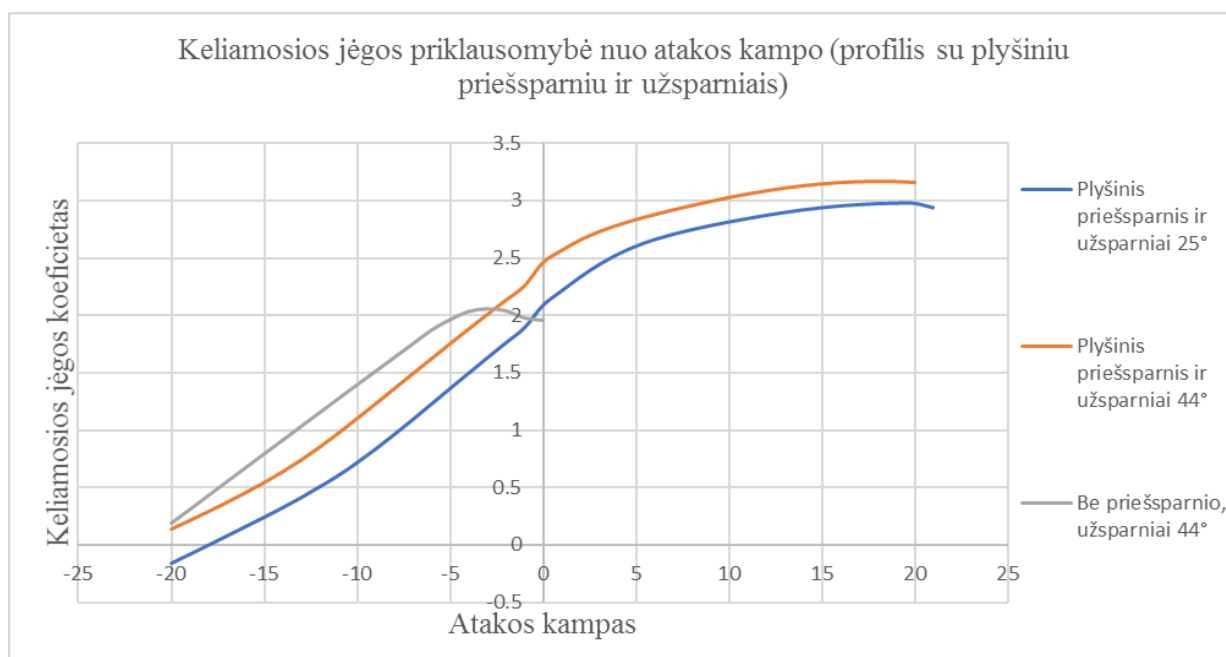


**33 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais kilimo padėtyje

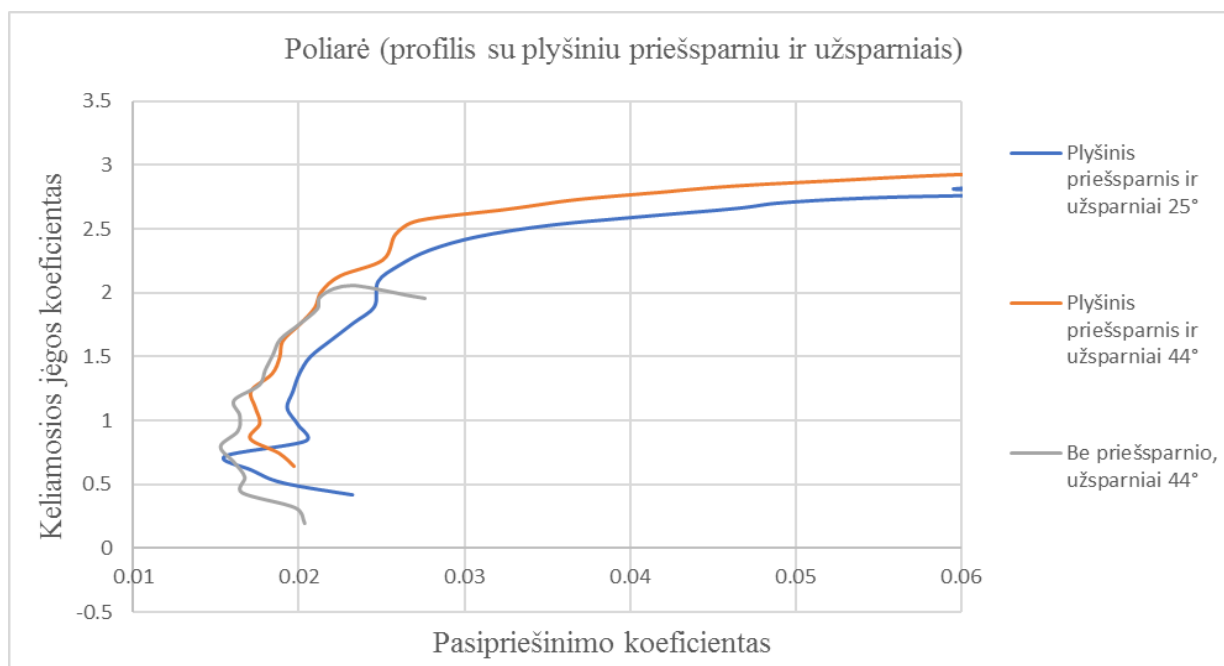


**34 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais tūpimo padėtyje

33 ir 34 paveiksluose esantiems elementams tai yra priešsparniui, profiliui ir užsparniui nubrėžti buvo pasirinktas 121 taškas, toks taškų skaičius pasirinktas, kad tyrimo rezultatai būtų tikslesni.



**35 pav.** Profilio su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo



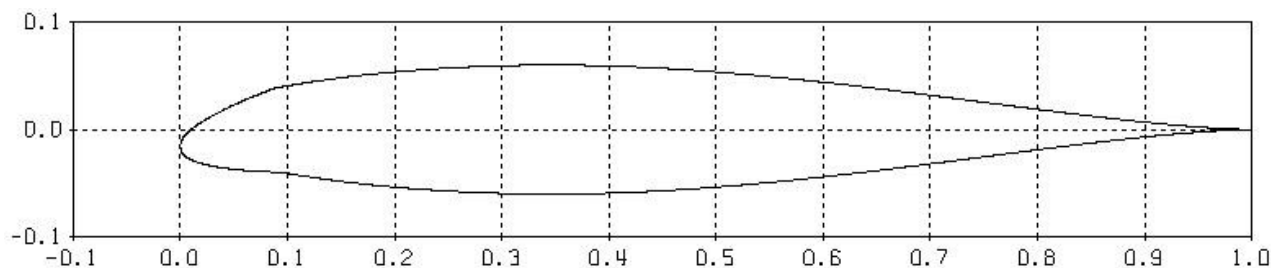
**36 pav.** Profilio su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais poliarė

35 ir 36 paveiksluose pavaizduoti grafikai, gauti ištyrus orlaivio *L-39* sparno profilį su plyšiniu priešsparniu ir užsparniais kilimo ar tūpimo padėtyje. Iš šių grafikų matyti, kad profilis su išskleistais užsparniais ir plyšiniu priešsparniu turi didesnę keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą, nei profilis tik su išskleistais užsparniais. Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas, kai profilis yra tik su išskleistais užsparniais (44-ių laipsnių kampu) – 2,059, kritinis atakos kampas –  $-3^\circ$ , profilio su išskleistais užsparniais (44-ių laipsnių kampu) ir plyšiniu priešsparniu maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 3,167, kritinis atakos kampas –  $17^\circ$ . Taigi pagal kompiuterinės programos *JavaFoil* pateiktus duomenis, jei prie sparno profilio su išskleistais užsparniais (44-ių laipsnių kampu) pridėsime plyšinį priešsparnį, tai maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidės 53 %, kritinis atakos kampas padidės  $16^\circ$ . Jei prie sparno profilio su išskleistais užsparniais (25-ių laipsnių kampu) pridėsime plyšinį priešsparnį maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidės 56 % ir kritinis atakos kampas padidės  $18^\circ$ .

#### 4.4 Orlaivio *L-39* sparno profilio su atlenkiamos noselės priešsparniu aerodinaminis tyrimas

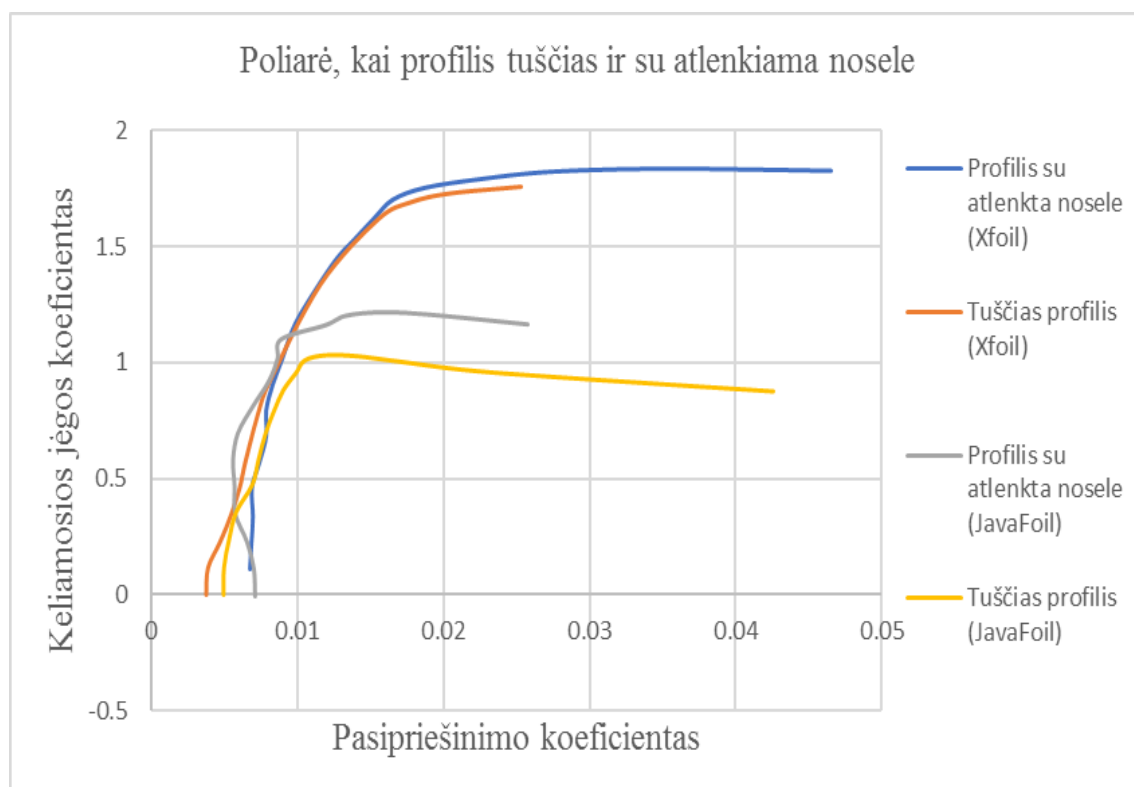
Šioje darbo dalyje tiriamas orlaivio *Aero L-39* sparno profilis su atlenkiamos noselės priešsparniu. Tyrimas atliekamas *Xfoil* ir *JavaFoil* kompiuterinėms programomis. Pirmoje tyrimo dalyje tiriamas profilis su atlenkiama nosele ir sutrauktais užsparniais, antroje dalyje – profilis su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais. Profilis su atlenkiama nosele (be užsparnių) tiriamas *Xfoil* ir *JavaFoil* kompiuterinėmis programomis, profilis su atlenkiama nosele ir užsparniais tiriamas *JavaFoil* kompiuterine programa.

37 paveiksle pavaizduotas orlaivio *L-39* sparno profilis su atlenkiama nosele kompiuterinės programos *Xfoil* aplinkoje. Atlenktos noselės ilgis 10 % nuo vidutinė aerodinaminės stygos, atlenkimo kampas  $10^\circ$ , Reinoldso skaičius toks pat, kaip ir prieš tai atliktuose tyrimuose – 9 231 365.

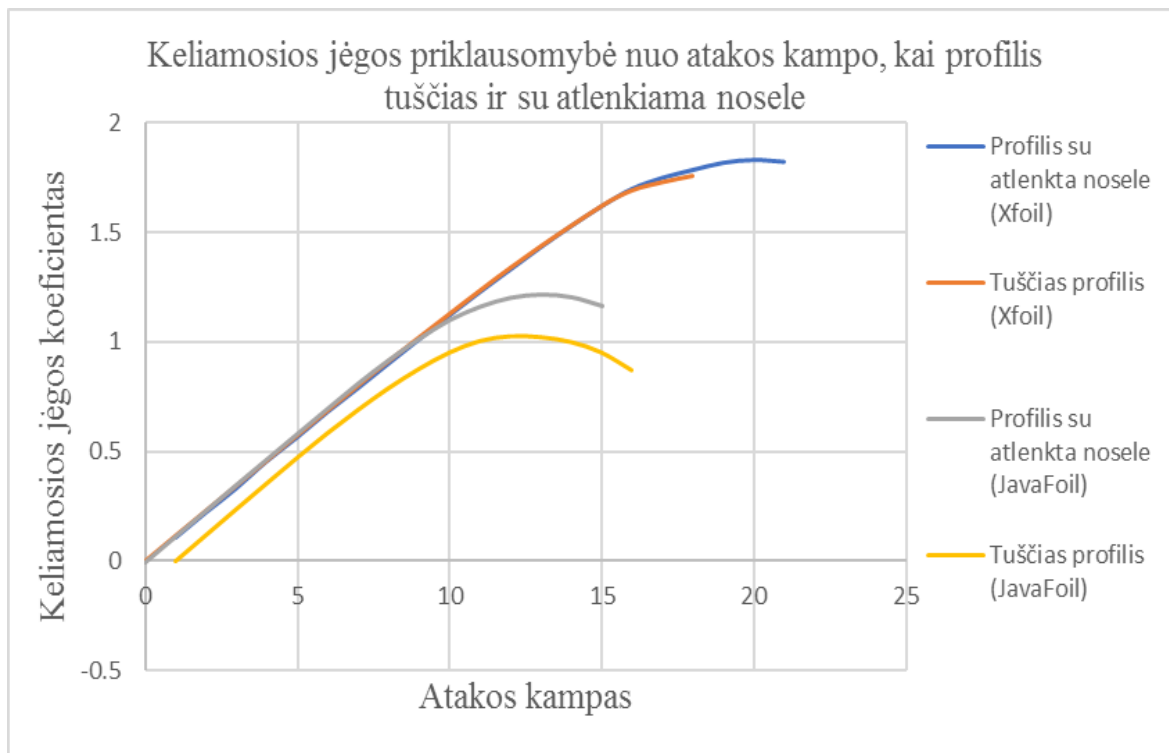


**37 pav.** Orlaivio *L-39* sparno profilis su atlenkiama nosele

38 ir 39 paveiksluose pateikti grafikai, kurie vaizduoja orlaivio *L-39* profilio su atlenkiama nosele aerodinamines charakteristikas. Šiuose grafikuose matyti programų *Xfoil* ir *JavaFoil* pateikti duomenys, kai sparno profilis yra su atlenkiama nosele ir be priešsparnių ir užsparnių.



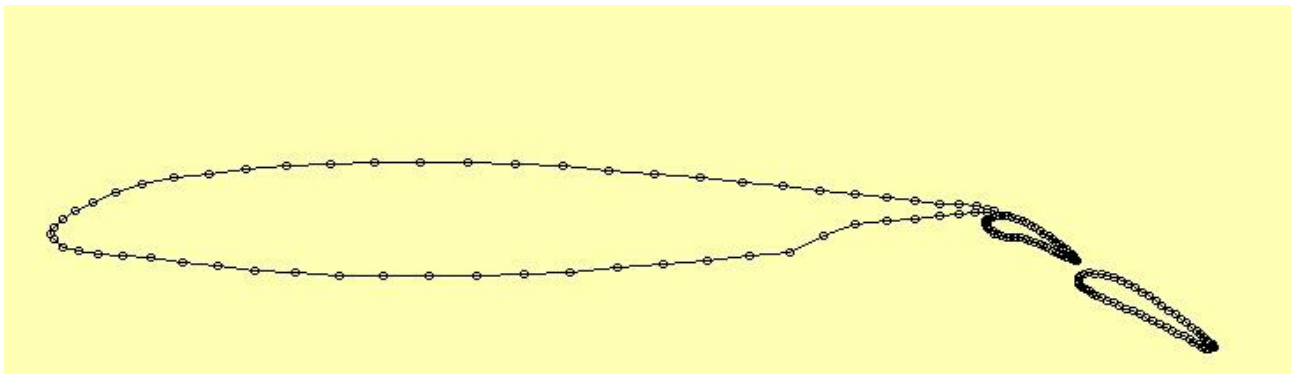
**38 pav.** Profilio su atlenkiama nosele poliarė



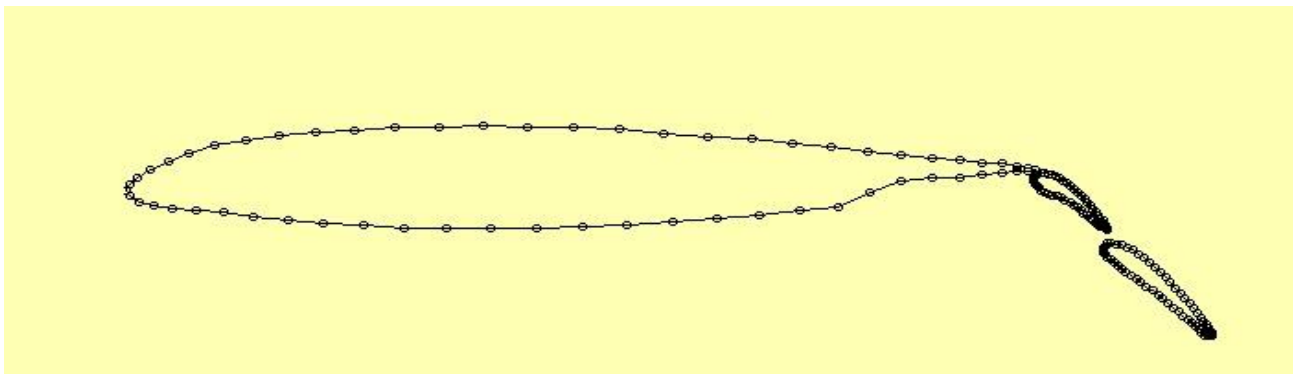
**39 pav.** Profilio su atlenkiama nosele keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo

Iš 39 paveiksle pavaizduoto grafiko matyti, kad atlenkiama noselė nežymiai padidina keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą. Pagal kompiuterinės programos *Xfoil* pateiktus duomenis, maksimalus keliamosios jėgos koeficientas: tuščio profilio – 1,7549, profilio su atlenkiama nosele – 1,8235. Kritinis atakos kampas: tuščio profilio – 18°, profilio su atlenkiama nosele 21°. Pagal kompiuterinės programos *JavaFoil* pateiktus duomenis, maksimalus keliamosios jėgos koeficientas: tuščio profilio – 1,029, profilio su atlenkiama nosele 1,218. Kritinis atakos kampas: tuščio profilio – 11°, profilio su atlenkiama nosele – 13°. Taigi, jei orlaivio *L-39* tuščio profilio noselė, kurios ilgis 10 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos atsilenktų 10°, tai maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėtų 5 % (pagal kompiuterinę programą *Xfoil*) arba 17 % (pagal kompiuterinę programą *JavaFoil*). Kritinis atakos kampas padidėtų per 3° (pagal kompiuterinę programą *Xfoil* ir *JavaFoil*).

Toliau, naudodamiesi kompiuterine programa *JavaFoil*, sumodeliuojame orlaivio *L-39* sparno profilį su atlenkiama nosele ir dviejų plyšių užsparniais, atliekame šio profilio aerodinaminių charakteristikų tyrimą. 40 ir 41 paveiksluose pavaizduotas orlaivio *L-39* sparno profilis su atlenkta nosele ir užsparniais išskleistais, 25-į (40 pav.) ir 44 – į (41 pav.) laipsnių kampu programos *JavaFoil* aplinkoje.

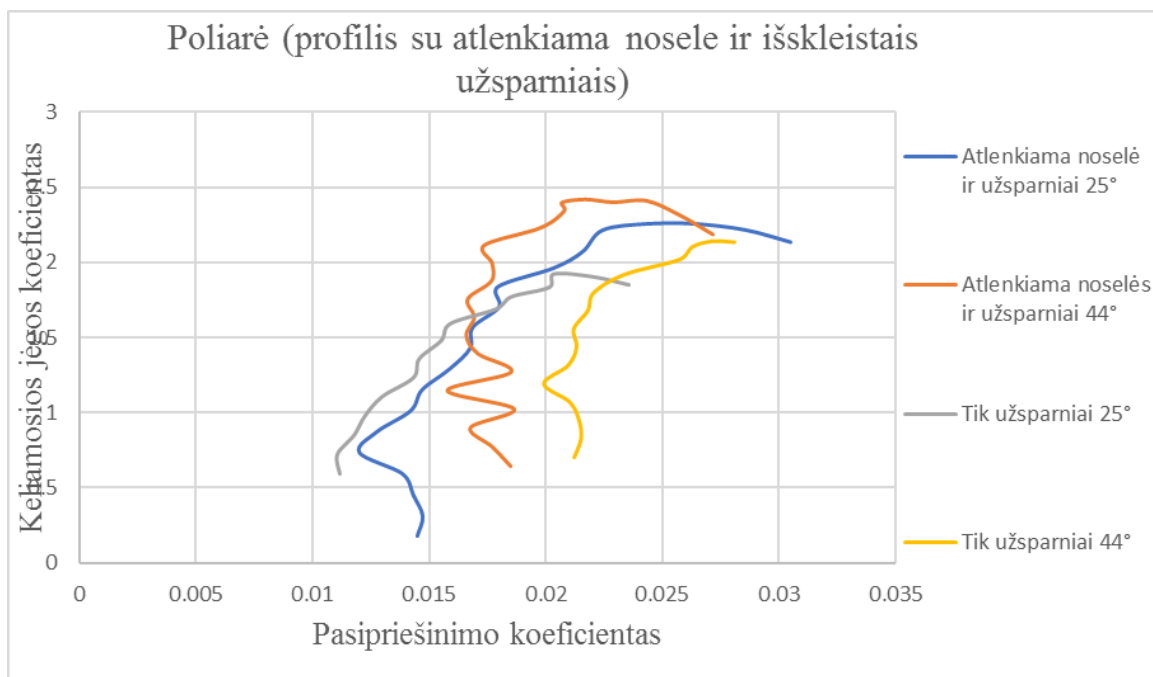


**40 pav.** Profilis su atlenkiama nosele ir užsparniais išskleistais kilimui

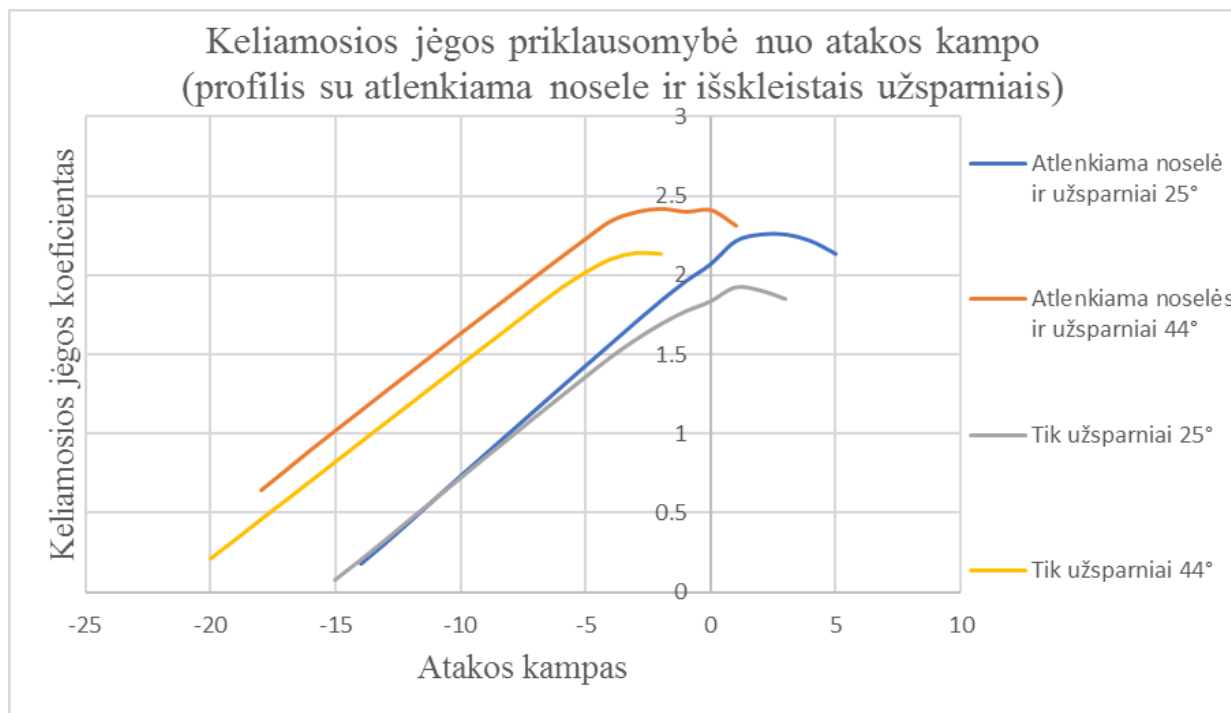


**41 pav.** Profilis su atlenkiama nosele ir užsparniais išskleistais tūpimui

40 ir 41 paveiksluose pavaizduotuose profiliuose atlenktos noselės ilgis 10 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos, atlenkimo kampas  $10^\circ$ . Užsparnių ilgis 25 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos.



**42 pav.** Profilio su atlenkiama nosele ir išskleistais užsparniais poliarė



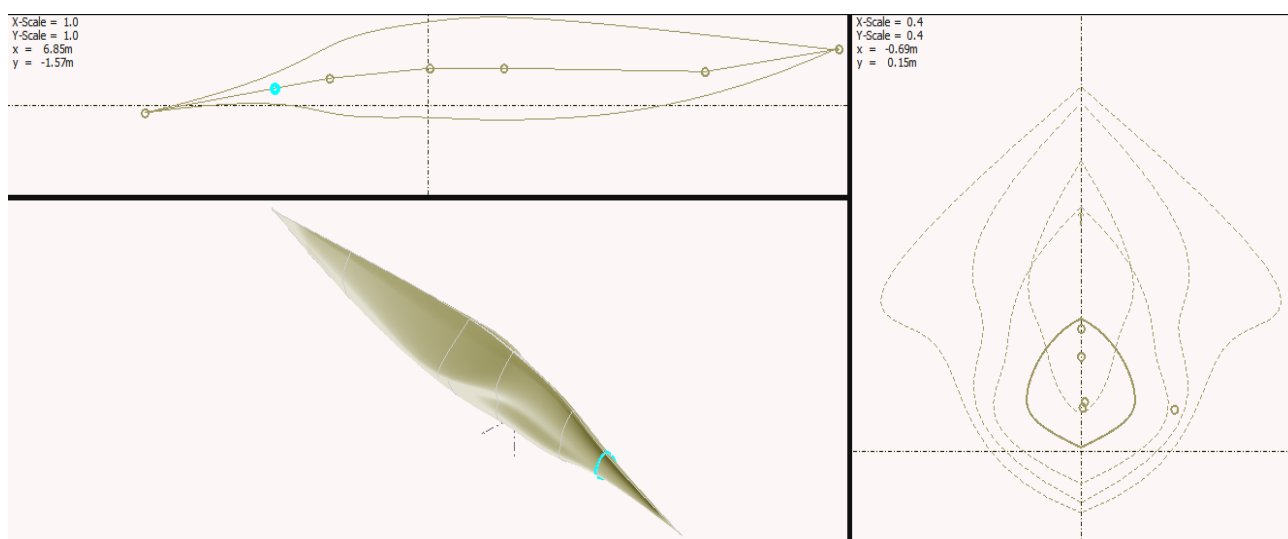
**43 pav.** Profilio su atlenkiama nosele ir užsparniais keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo

42 ir 43 paveiksluose pavaizduoti aerodinaminių charakteristikų, gautų ištyrus orlaivio *L-39* sparno profilį su atlenkta nosele ir išskleistais užsparniais kilimui ir tūpimui. 42 paveikslo grafikas – poliarė, 43 paveikslo grafikas – keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo. Taip pat šiuose grafikuose palyginimui pavaizduotos sparno profilio tik su užsparniais aerodinaminių charakteristikų kreivės.

Iš 43 paveiksle pavaizduoto grafiko matyti, kai atlenkiamos noselės priešsparnis nežymiai padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą sparno profiliui su išskleistais užsparniais. Sparno profilio tik su išskleistais užsparniais (25-ių laipsnių kampu) maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 1,924, kritinis atakos kampas – 1°, tokio pat profilio, tik su atlenkiama nosele, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 2,253, kritinis atakos kampas – 3°. Taigi pagal kompiuterinės programos *JavaFoil* pateiktus duomenis prie orlaivio *L-39* sparno profilio su išskleistais užsparniais (25-ių laipsniu kampu) pridėjus atlenkiamos noselės priešsparnį, maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėtų 17 %, kritinis atakos kampas padidėtų per 2°. Sparno profilio tik su išskleistais užsparniais (44-ių laipsnių kampu) maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 2,059, kritinis atakos kampas – -3°, tokio pat profilio, tik su atlenkiama nosele, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 2,422, kritinis atakos kampas – -2°. Taigi pagal kompiuterinės programos *JavaFoil* pateiktus duomenis prie orlaivio *L-39* sparno profilio su išskleistais užsparniais (44-ių laipsniu kampu) pridėjus atlenkiamos noselės priešsparnį, maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėtų – 18 %, kritinis atakos kampas padidėtų per 1°.

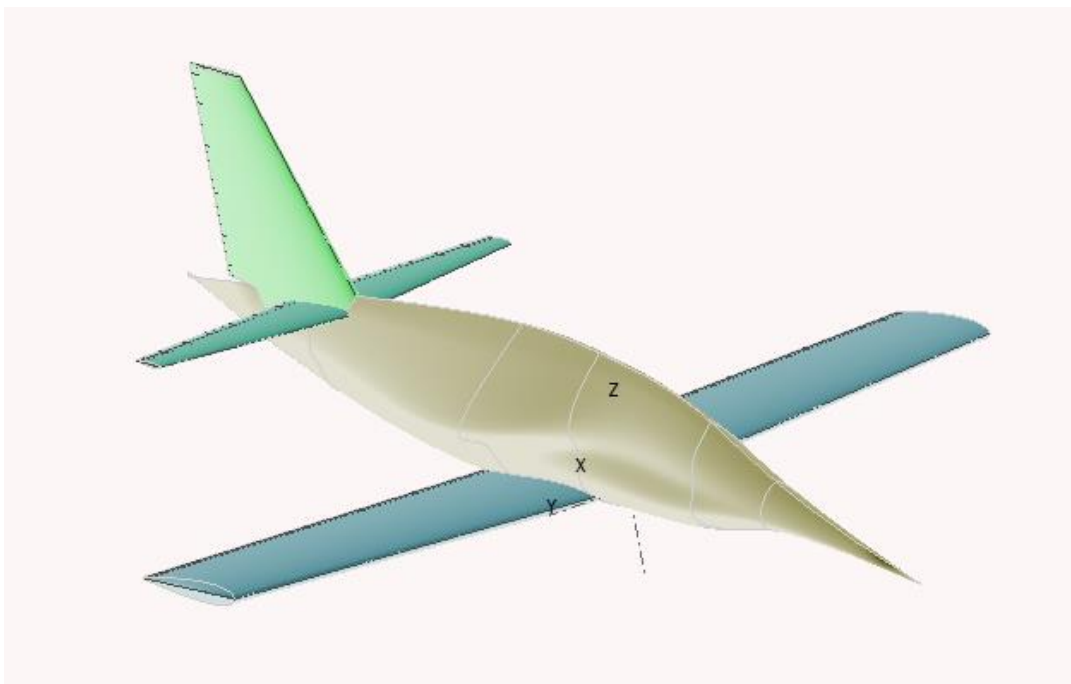
## 5. PRIEŠSPARNIŲ ĮTAKA ORLAIVIO L-39 AERODINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS

Šioje darbo dalyje tiriama plyšinio ir atlenkiamos noselės priešsparnio įtaka orlaivio L-39 aerodinaminėms charakteristikoms. Tyrimas atliekamas kompiuterine programa *Xflr5*. Ši programa tirdama viso orlaivio aerodinamines charakteristikas naudoja sparno profilio poliarių duomenis, kuriuos gauna ištyrus nurodytą profilį. Programa sparno profilį tiria ir gauna profilių poliares pagal kompiuterinės programos *Xfoil* algoritmą, dėl to ši programa negali tirti sparno profilio sudarytų iš atskirų elementų. Kadangi šiame darbe tiriamas sparno profilis, sudarytas iš atskirų elementų, tai yra plyšinio užsparnio ir plyšinio priešsparnio, šių profilių poliares gausime atlikdami tyrimą kompiuterine programa *JavaFoil*. Gautas poliares importuosime į programą *Xflr5* ir atliksime viso orlaivio aerodinaminių charakteristikų tyrimą. Tam, kad galėtume ištirti priešsparnių įtaką visam orlaiviui visų pirmą reikia sumodeliuoti orlaivį *Xflr5* programoje. 44 paveikslas vaizduoja orlaivio L-39 sumodeliuotą liemenį kompiuterinės programos *Xflr5* aplinkoje. Šiame paveiksle pavaizduotas orlaivio vaizdas iš šono su pažymėtais pjūviais, vaizdas iš priekio, kai matomos visos pjūvių plokštumos (jų yra 7-nios) ir viso sumodeliuoto liemens 3D vaizdas.



**44 pav.** Orlaivio L-39 liemens modeliavimas kompiuterinės programos *Xflr5* aplinkoje

Sumodeliuotas orlaivis bus tiriamas, kai sparnai yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų. Vėliau atliksime tokį pat orlaivio tyrimą tik su išskleistais užsparniais, bei plyšiniu ir atlenkiamos noselės priešsparniu (45 pav.).



**45 pav.** Orlaivis L-39, sumodeliuotas kompiuterinės programos *Xflr5* aplinkoje

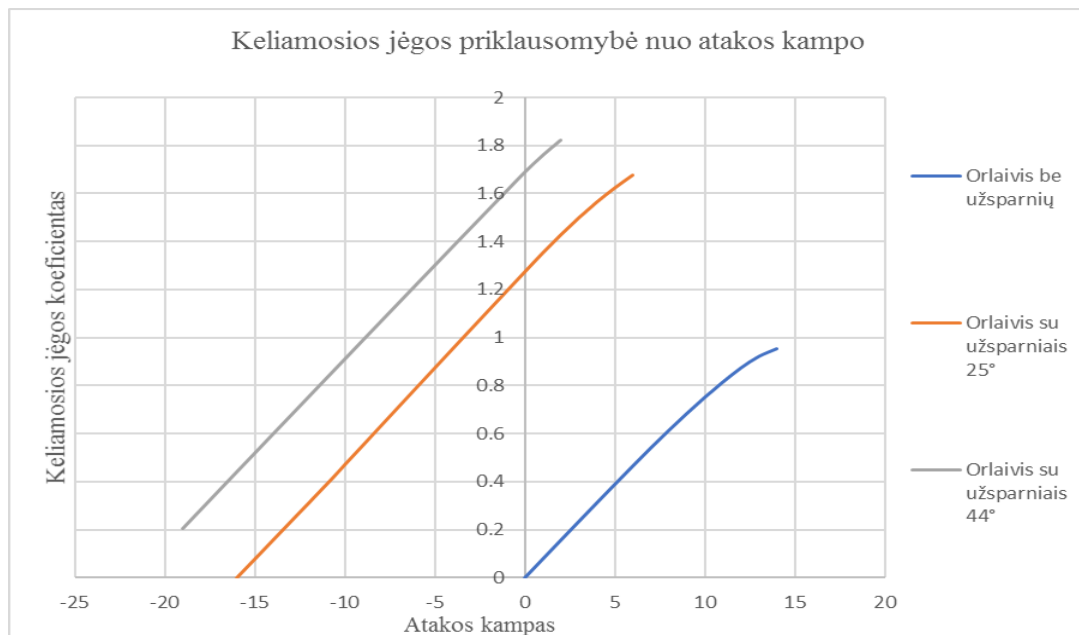
Tyrimui, kai sparno profilis yra be priešsparnių ir užsparnių, atlikti naudosime poliarės, gautas ištyrus orlaivio sparno profilį kompiuterine programa *JavaFoil*. Tai daroma tam, kad galėtume tiksliai palyginti, kaip keičiasi orlaivio aerodinaminės charakteristikos, kai prie orlaivio yra pritaissomi plyšiniai arba atlenkiamos noselės priešsparniai. 45 paveikslas vaizduoja sumodeliuotą orlaivį kompiuterinės programos *Xflr5* aplinkoje. Rezultatus apdorosime ir juos pateiksime grafiškai naudodami kompiuterines programas *Notepad++* ir *MS Excel*.

### 5.1 Orlaivio L-39 aerodinamins tyrimas

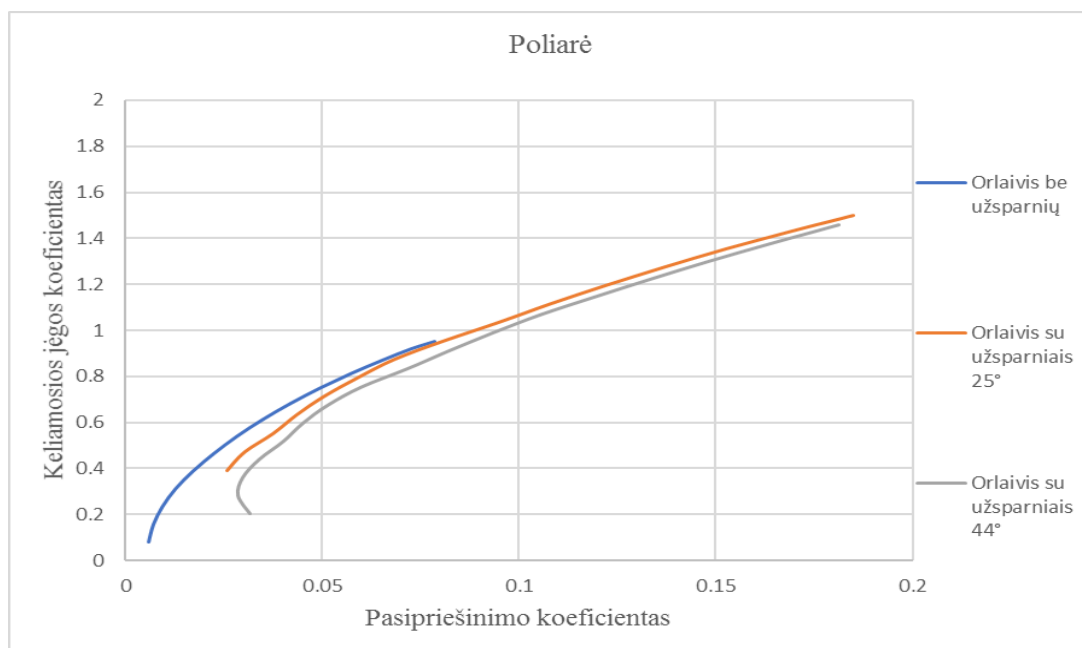
Šioje darbo dalyje bus tiriamos orlaivio aerodinaminės charakteristikos, kai orlaivis yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų. Tam, kad galėtume ištirti viso orlaivio aerodinamines charakteristikas, programa turi apskaičiuoti arba į ją turi būti įkeltos sparno profilio aerodinaminės charakteristikos. Šias charakteristikas apskaičiuosime naudodamiesi kompiuterine programa *JavaFoil* ir jas importuosime į kompiuterinę programą *Xflr5*. Kompiuterinė programa *Xflr5* apskaičiuos viso orlaivio aerodinamines charakteristikas, kai sparnai yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų. Kad programa *Xflr5* skaičiuotų viso orlaivio aerodinamines charakteristikas, į šią programą buvo įkeltos 6 skirtingos poliarės, kurios gautos esant skirtingam Reinoldso skaičiui. Pasirinkti Reinoldso skaičiai: 1 mln., 2 mln., 3 mln., 9 mln., 30 mln. ir 40 mln. Toks platus Reinoldso skaičių spektras reikalingas tam, kad programa galėtų tiksliai įvertinti net tik sparno, bet ir uodegos ir liemens įtaką orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms. Uodegos ir stabilizatoriaus profilis buvo pasirinktas toks pat, kaip ir orlaivio sparno profilis NACA 64012. Gautos orlaivio

charakteristikos bus lyginamos su orlaivio, kurio sparnai yra su plyšiniu ar atlenkiamos noselės priešsparniu aerodinaminėmis charakteristikomis, kurias gausime vėlesnėje darbo eigoje.

46 paveikslėlo grafikas – orlaivio keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra be užsparnių ar užsparniai yra kilimo (išskleisti 25-ių laipsnių kampu) ar tūpimo (išskleisti 44-ių laipsnių kampu) padėtyse. 47 paveikslėlo grafikas – poliarė, kai orlaivis yra be užsparnių ar užsparniai yra kilimo (išskleisti 25-ių laipsnių kampu) ar tūpimo (išskleisti 44-ių laipsnių kampu) padėtyse.



**46 pav.** Orlaivio L-39 keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai užsparniai yra išskleisti

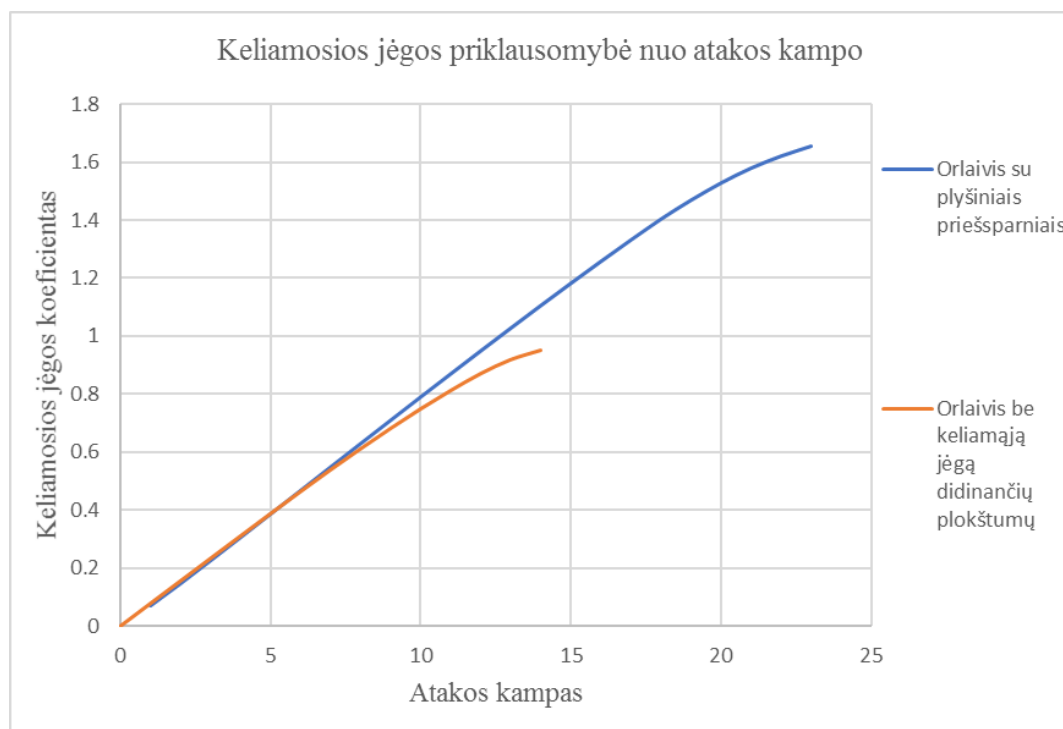


**47 pav.** Orlaivio L-39 poliarė, kai užsparniai yra kilimo ar tūpimo padėtyje

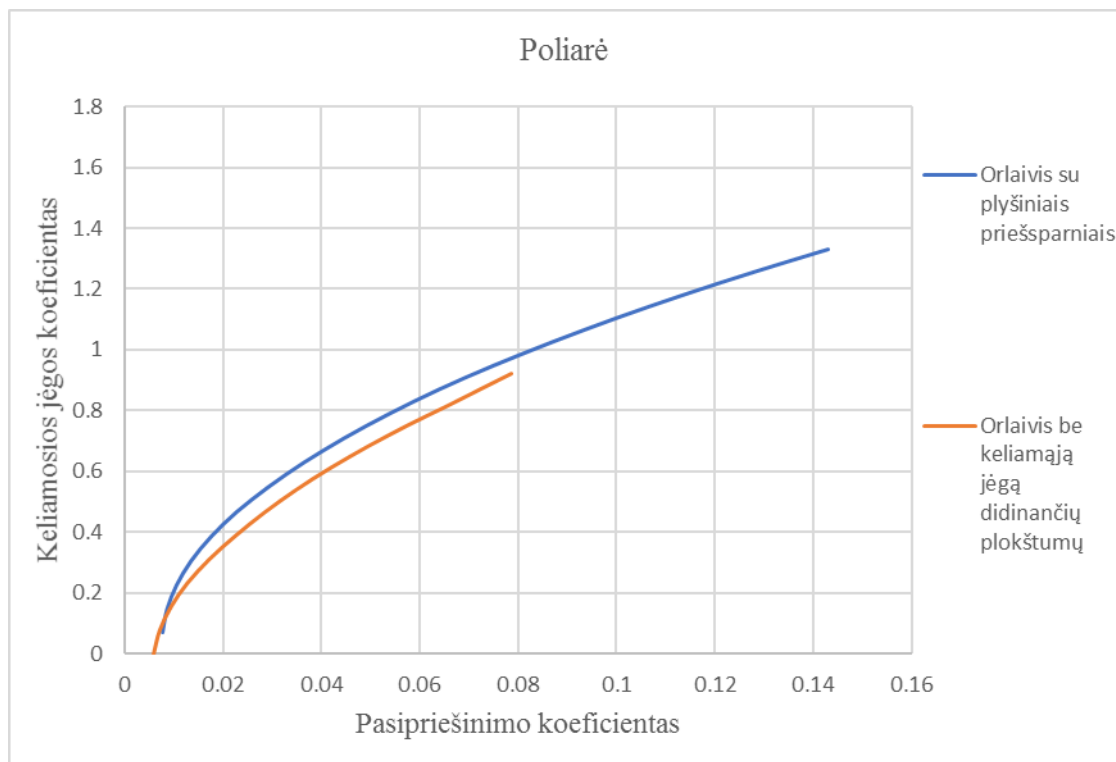
Iš 46 ir 47 paveikslų matyti, kad užsparniai padidina keliamosios jėgos koeficientą, bet sumažina kritinį atakos kampą. Pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra neišskleidęs užsparnių, – 0,95, kai orlaivis išskleidęs užsparnius kilimui (25-ių laipsnių kampu) – 1,68, ir kai orlaivis išskleidęs užsparnius tūpimui (44-ių laipsnių kampu) – 1,82. Kritinis atakos kampas, kai orlaivis yra neišskleidęs užsparnių, –  $14^\circ$ , kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius kilimui –  $6^\circ$ , ir kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius tūpimui –  $2^\circ$ . Taigi jei iš neutralios padėties išskleisime užsparnius į kilimo padėtį, keliamosios jėgos koeficientas padidės 77 %, bet kritinis atakos kampas sumažės per  $8^\circ$ . Jei iš kilimo padėties išskleisime užsparnius į tūpimo padėtį, tai maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidės 8 %, bet kritinis atakos kampas sumažės per  $4^\circ$ . Jei iš neutralios padėties išskleisime užsparnius į tūpimo padėtį, tai maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidės 92 %, bet kritinis atakos kampas sumažės per  $12^\circ$ .

## 5.2 Plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio *L-39* aerodinaminėms charakteristikoms

Šioje darbo dalyje bus tiriama, kaip pasikeičia orlaivio *L-39* aerodinaminės charakteristikos pridėjus plyšinį priešsparnį. Tyrimą atliksime kompiuterine programa *Xflr5*. Į šią programą importuosime orlaivio sparno profilio su plyšiniu priešsparniu poliares, kurias gausime ištyrus profilį kompiuterine programa *JavaFoil*. Tyrimui atlikti reikės 6-ių skirtingų orlaivio sparno profilio poliarių, kai Reinoldso skaičius – 1 mln., 2 mln., 3 mln., 9 mln., 30 mln. ir 40 mln. (48, 49 pav.).



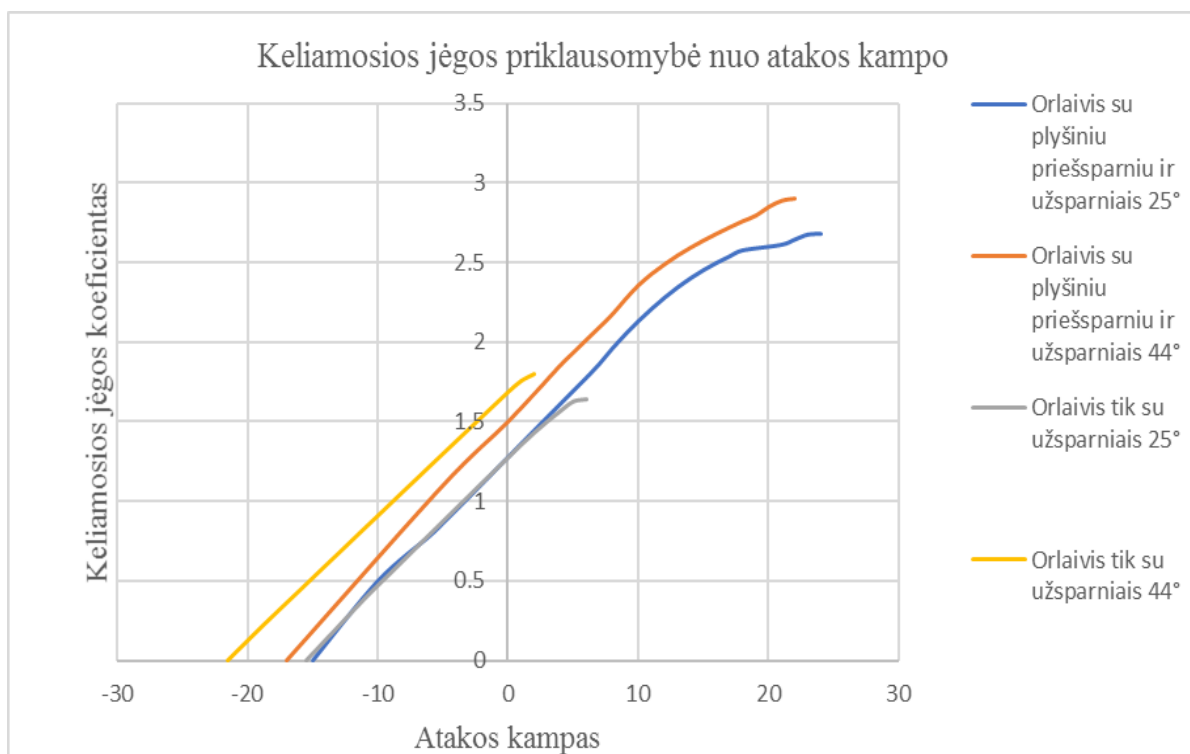
**48 pav.** Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais



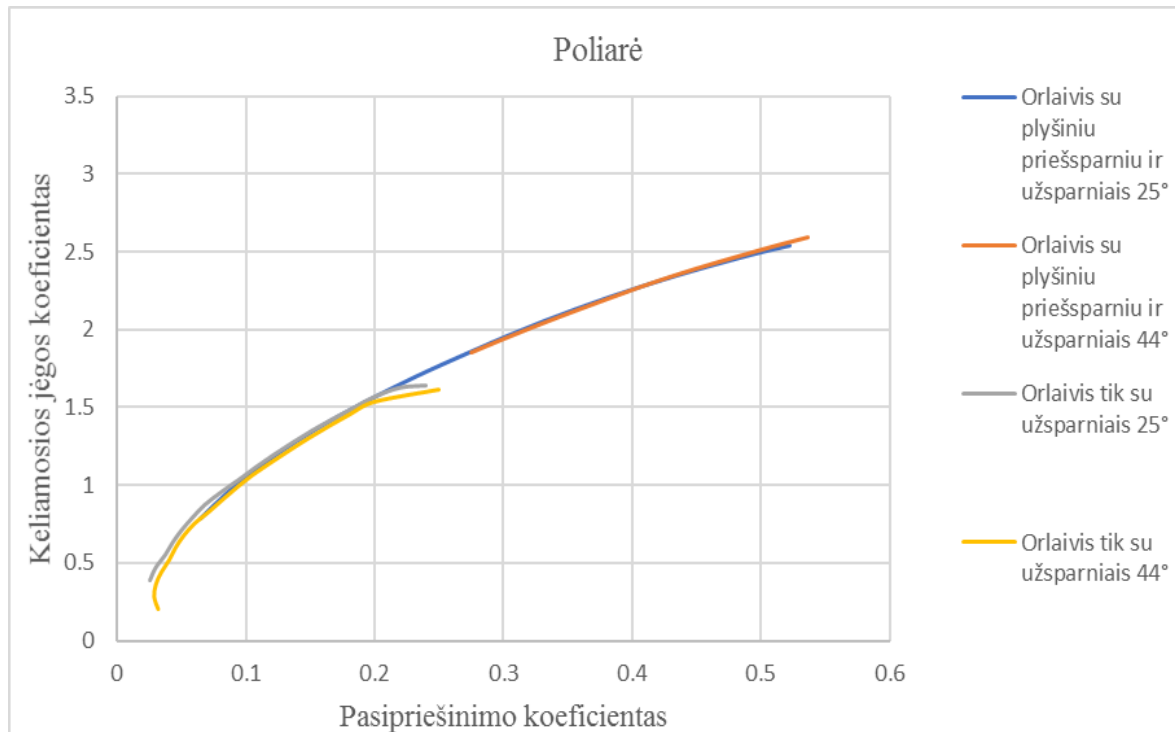
**49 pav.** Poliarė, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais

48 ir 49 paveikslo grafikai gauti ištyrus orlaivio *L-39* aerodinamines charakteristikas, kai prie šio orlaivio sparno buvo pridėtas plyšinis priešsparnis. 48 paveikslo grafikas – keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo ir 49 paveikslo grafikas – poliarė. Iš šių grafikų matyti, kad priešsparniai padidina keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą. Pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų, – 0,95, kritinis atakos kampas  $14^\circ$ . Kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas – 1,66, kritinis atakos kampas  $23^\circ$ . Taigi jei orlaivis skrydžio metu išskleistų ar prie jo būtų primontuotas plyšinis priešsparnis maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėtų 75 % ir kritinis atakos kampas padidėtų per  $9^\circ$ .

Toliau atliekame tokį pat tyrimą, tik plyšinį priešsparnį pridėsime prie sparno profilio, kuris yra išskleidęs užsparnius kilimui (25-ių laipsnių kampui) ar tūpimui (44-ių laipsnių kampui). Šio tyrimo tikslas – įvertinti ar priešsparniai išlieka tokie pat efektyvūs, kai orlaivis skrydžio metu išskleidžia užsparnius. 50 ir 51 paveikslo grafikai gauti ištyrus orlaivio *L-39* aerodinamines charakteristikas, kai prie orlaivio sparno primontuoti plyšiniai priešsparniai ir išskleisti užsparniai kilimui ar tūpimui.



**50 pav.** Orlaivio L-39 keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir išskleistais užsparniais



**51 pav.** Orlaivio L-39 poliarė, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir išskleistais užsparniais

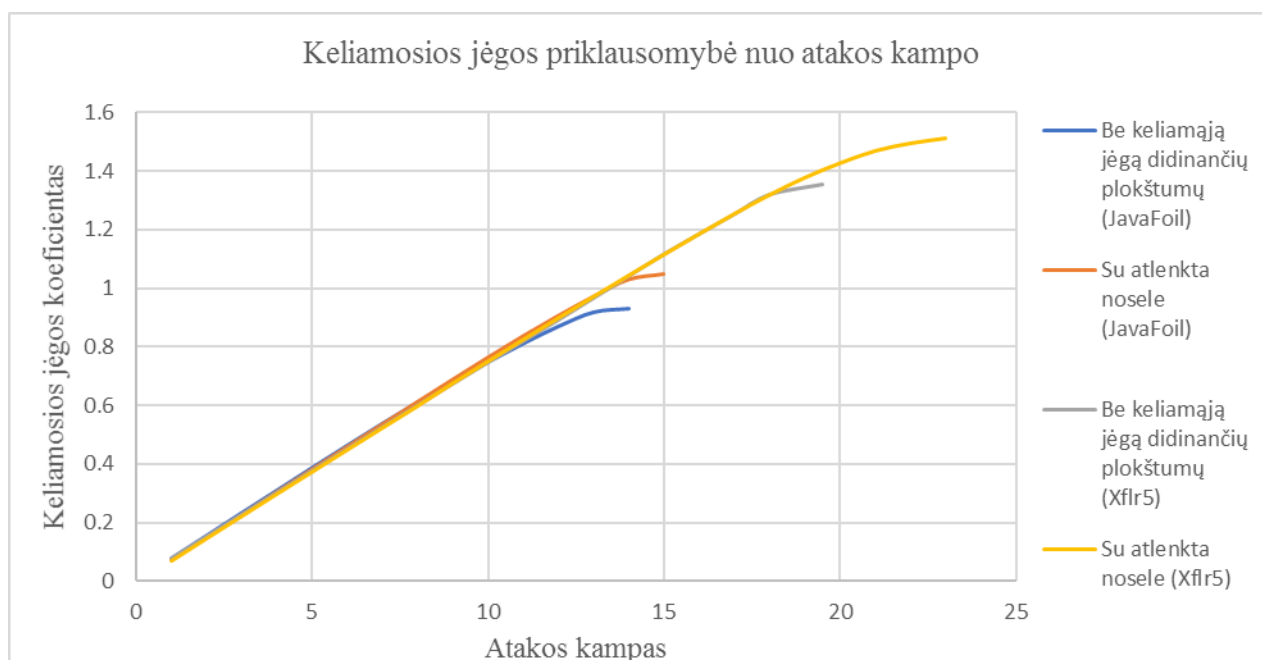
Iš 50 ir 51 paveikslo matyti, kad plyšinis priešsparnis padidina orlaivio maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą, kai yra išskleisti užsparniai. Pagal

kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir užsparniai yra išskleisti kilimui (25-ių laipsnių kampu) – 2,68, kritinis atakos kampas – 24°. Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra su plyšiniais priešsparniais ir užsparniai yra išskleisti tūpimui (44-ių laipsnių kampu) – 2,9, kritinis atakos kampas – 22°. Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra tik su užsparniais, išskleistais kilimui (25-ių laipsnių kampu) – 1,68, kritinis atakos kampas – 6°. Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, kai orlaivis yra tik su užsparniais išskleistais tūpimui 1,82, kritinis atakos kampas – 2°. Taigi jei prie sparno su išskleistais užsparniais kilimui pridėtume plyšinius priešsparnius, tai maksimalus orlaivio keliamosios jėgos koeficientas padidėtų 63 % ir kritinis atakos kampas padidėtų per 18°. Jei prie sparno su išskleistais užsparniais tūpimui pridėtume plyšinius priešsparnius, tai maksimalus orlaivio keliamosios jėgos koeficientas padidėtų 60 % ir kritinis atakos kampas padidėtų per 20°.

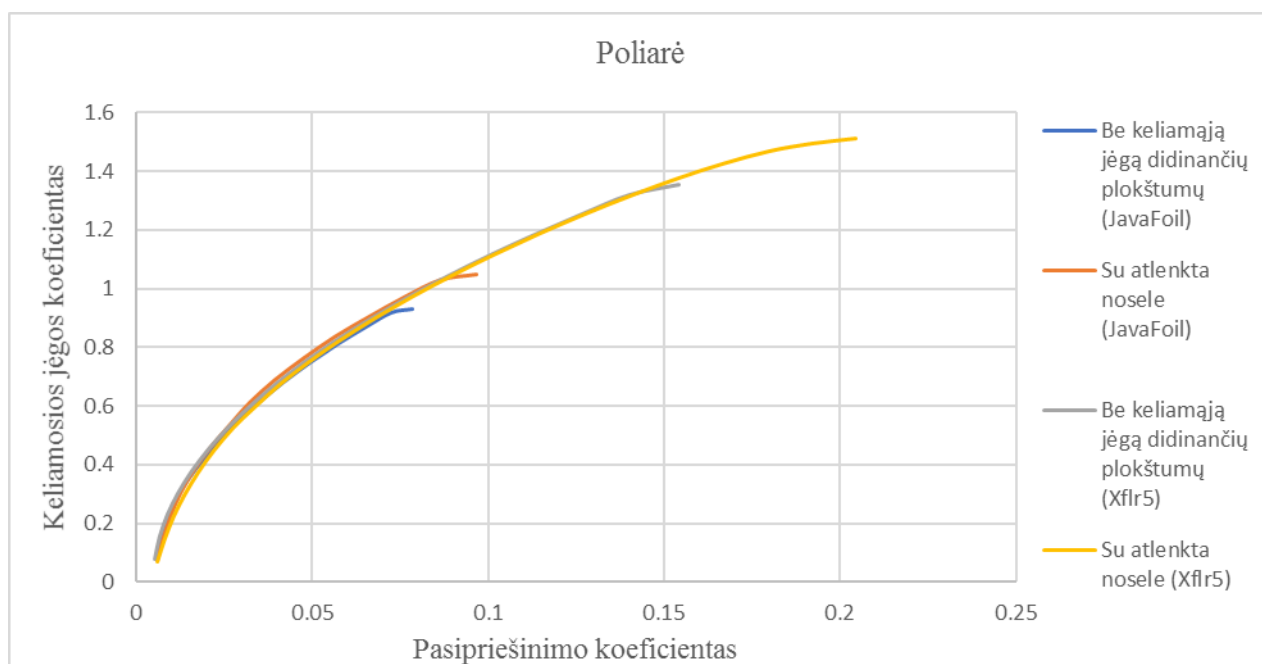
### 5.3 Atlenkiamos noselės įtaka orlaivio *L-39* aerodinaminėms charakteristikoms

Šioje darbo dalyje bus tiriama atlenkiamos noselės įtaką orlaivio *L-39* aerodinaminėms charakteristikoms. Tyrimą atliksime dviem būdais tai yra naudosime kelių kompiuterinių programų – *Xflr5* ir *JavaFoil* poliares. Pradžioje ištirsime orlaivio *L-39* sparno profilį kompiuterinėmis programomis *Xflr5* ir *JavaFoil*. Turėdami orlaivio sparno profilio poliares apskaičiuotas dviem skirtingais būdais (*Xflr5* ir *JavaFoil*), ištirsime viso orlaivio aerodinamines charakteristikas, kai sparno profilio poliarės yra apskaičiuotos su kompiuterine programa *Xflr5* arba *JavaFoil*. Vienu atveju poliares importuosime iš kompiuterinės programos *JavaFoil*, kitu atveju kompiuterinė programa *Xflr5* apskaičiuos sparno profilio su atlenkiama nosele aerodinamines charakteristikas, kurias panaudos viso orlaivio aerodinaminėms charakteristikoms tirti. Gauti rezultatai parodys, kaip pasikeičia orlaivio aerodinaminės charakteristikos, kai orlaivio sparnas pakeičiamas į sparną su atlenkiama nosele. Atlenkto noselės ilgis 10 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos ir atlenkimo kampas 10°. Pasirinkti Reinoldso skaičiai – 1 mln., 2 mln., 3 mln., 9 mln., 30 mln., ir 40 mln.

52 ir 53 paveiksluose pateikti aerodinaminių charakteristikų grafikai, gauti ištyrus orlaivį *L-39* su atlenkiama nosele. 52 paveiksle pavaizduota keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele arba be jos (ištirta pagal kompiuterinių programų *Xflr5* arba *JavaFoil* sparno profilio poliares). 53 paveikslo grafikas – poliarė (keliamosios jėgos priklausomybė nuo pasipriešinimo koeficiento), kai orlaivis yra su atlenkiama nosele arba be jos (ištirta pagal kompiuterinių programų *Xflr5* arba *JavaFoil* poliares).



**52 pav.** Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir be jos (apskaičiuota pagal *JavaFoil* ir *Xflr5* sparno profilio poliares)



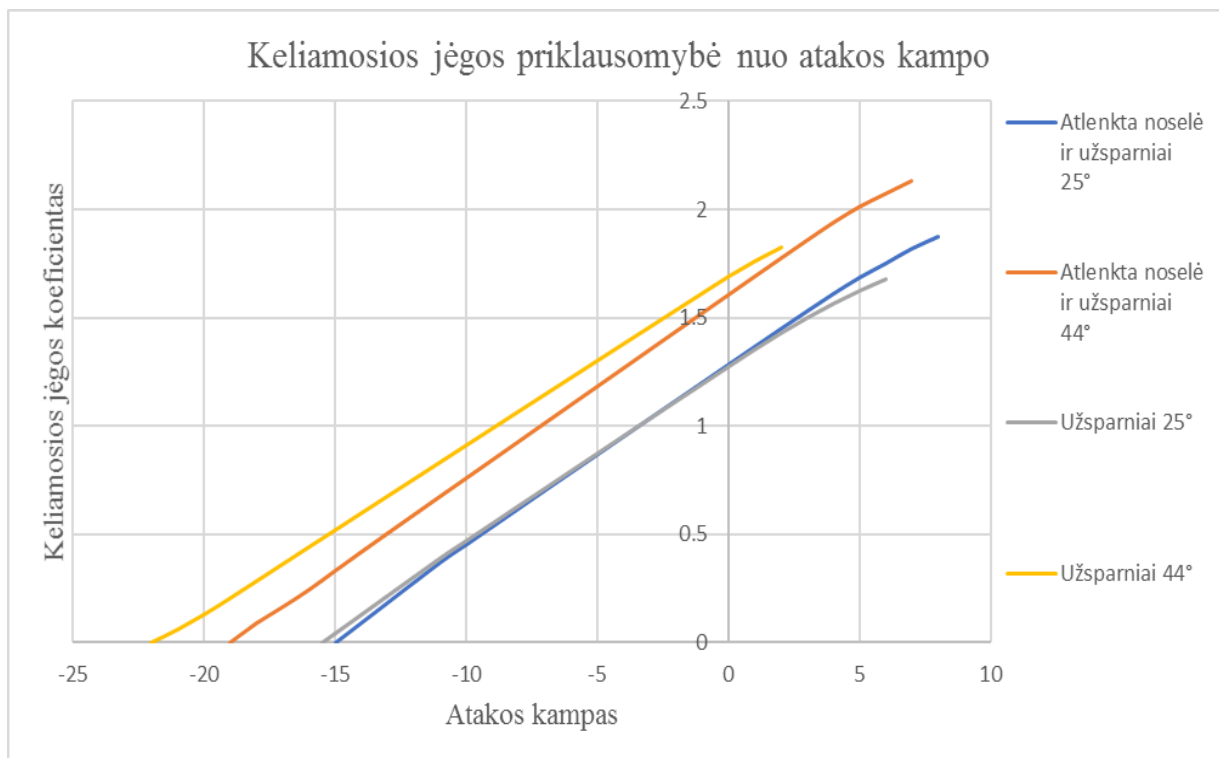
**53 pav.** Poliarė, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir be jos (apskaičiuota pagal *JavaFoil* ir *Xflr5* sparno profilio poliares)

Iš 52 ir 53 paveikslų matyti, kad pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis, kai vienu atveju poliarės importuotos iš kompiuterinės programos *JavaFoil*, kitu atveju apskaičiuotos kompiuterine programa *Xflr5*, atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą. Pagal kompiuterinės programos *Xflr5*

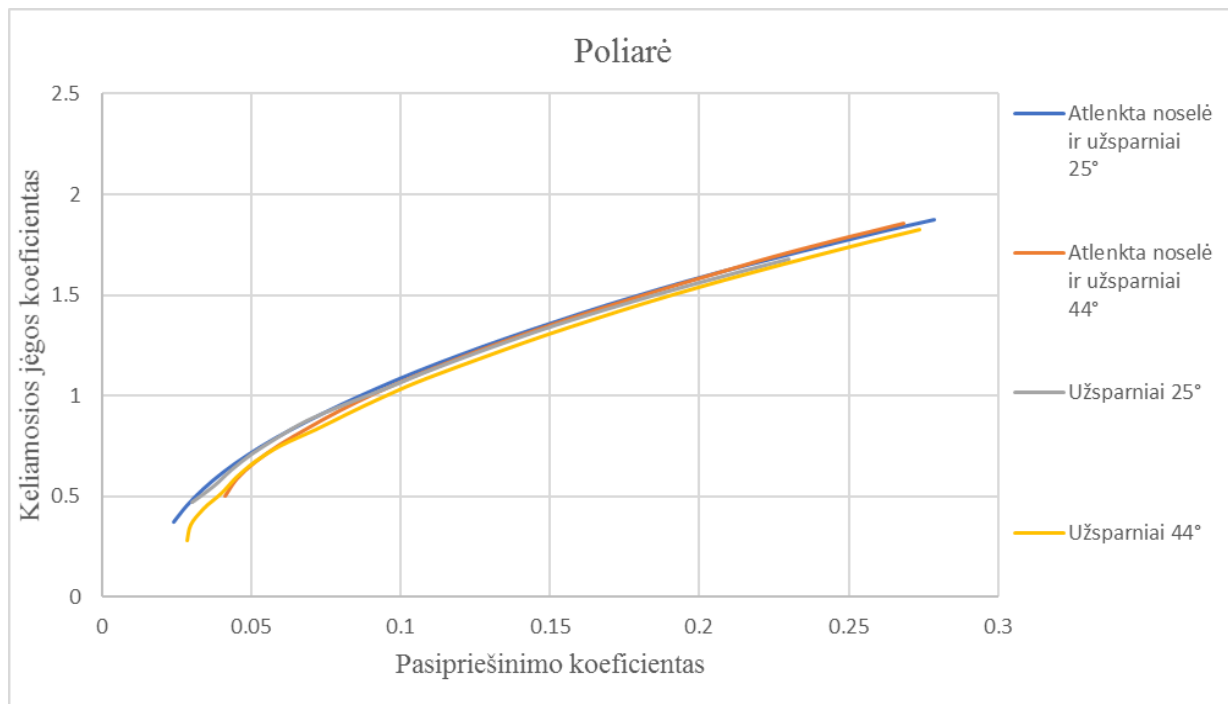
pateiktus duomenis, kai sparno profilio su atlenkiama nosele poliarės buvo importuotos iš kompiuterinės programos *JavaFoil*, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas – 1,05, 15°. Tokio pat tyrimo, tik kai orlaivio sparnas yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas – 0,93, 13°. Pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis, kai sparno profilio su atlenkiama nosele poliarės buvo apskaičiuotas programa *Xflr5*, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas – 1,51, 22°. Tokio pat tyrimo, tik kai orlaivis yra be keliamąją jėgą didinančių plokštumų, maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas – 1,36, 20°. Taigi, pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis, kai sparno profilio su atlenkiama nosele poliarės yra importuotos iš kompiuterinės programos *JavaFoil*, atlenkiamos noselės priešsparniai padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 13 % ir kritinį atakos kampą per 2°. Pagal kompiuterinės programos *Xflr5* pateiktus duomenis, kai sparno profilio su atlenkiama nosele poliarės yra apskaičiuotos programa *Xflr5*, atlenkiamos noselės priešsparniai padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 11 % ir kritinį atakos kampą per 2°.

Toliau atliekame tokį pat orlaivio tyrimą, tik šiuo atveju tirsime atlenkiamos noselės įtaką orlaiviui *L-39*, kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius kilimui ar tūpimui. Šio tyrimo tikslas – įvertinti atlenkiamos noselės efektyvumą, kai yra išskleisti užsparniai. Tyrimą atliksime kompiuterine programa *Xflr5*. Kadangi orlaivis *L-39* turi dviejų plyšių užsparnius į programą *Xflr5*, turėsime importuoti sparno profilio su atlenkta nosele ir išskleistais užsparniais poliares, nes programa *Xflr5* negali skaičiuoti profilių, kurie sudaryti iš atskirų elementų poliarių. Šias poliares gausime ištyrus orlaivio sparno profilį su atlenkta nosele iš išskleistais užsparniais tūpimui (44-ių laipsnių kampu) arba kilimui (25 laipsnių kampu) naudodamiesi kompiuterine programa *JavaFoil*. Atlenktos noselės ilgis 10 % nuo vidutinės aerodinaminės stygos, atlenkimo kampas 10°. Orlaivio sparno profilio poliarėms gauti, naudojantis kompiuterine programa *JavaFoil*, buvo pasirinkti Reinoldso skaičiai – 1 mln., 2 mln., 3 mln., 9 mln., 30 mln. ir 40 mln.

54 ir 55 paveikslo grafikai, gauti ištyrus orlaivį *L-39* su atlenkiamos noselės priešsparniu ir išskleistais užsparniais tūpimui (44-ių laipsnių kampu) ar kilimui (25-ių laipsnių kampu). 54 paveikslo grafikas – keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, 55 paveikslo grafikas poliarė.



**54 pav.** Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo, kai orlaivis yra su atlenkiama nosele ir užsparniais



**55 pav.** Poliarė, kai orlaivis yra su atlenkiamos noselės priešsparniais ir išskleistais užsparniais

Iš 54 ir 55 paveikslo matyti, kad atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą, kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius kilimui (25-ių laipsnių kampų) ar tūpimui (44-ių laipsnių kampų). Pagal kompiuterinės programos *Xflr5*

pateiktus duomenis maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas, kai sparnas yra su atlenkiama nosele ir užsparniai yra kilimo padėtyje – 1,88, 8°. Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas, kai sparnas yra su atlenkiama nosele ir užsparniai yra tūpimo padėtyje – 2,13, 7°. Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas, kai sparnas yra be priešsparnio, bet su išskleistais užsparniais kilimui – 1,68, 6°. Maksimalus gautas keliamosios jėgos koeficientas ir kritinis atakos kampas, kai sparnas yra be priešsparnio, bet su išskleistais užsparniais tūpimui – 1,82, 2°. Taigi atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą, kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius kilimui 12 % ir kritinį atakos kampą per 2°. Kai orlaivis yra išskleidęs užsparnius tūpimui, atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą 17 % ir kritinį atakos kampą per 5°.

## 6. PRIEŠSPARNIŲ ĮTAKA ORLAIVIO L-39 SKRYDŽIO PROCEDŪROMS

Šiame skyriuje bus aptariama 4 ir 5 šio darbo skyriuose gautų aerodinaminių charakteristikų duomenis. Įvertinsime kokią įtaką turi atlenkiama noselė ir plyšiniai priešsparniai orlaivio L-39 skrydžio procedūroms. Orlaivio L-39 skrydžio procedūros, kurias įvertinsime šiame skyriuje:

1. tūpimas,
2. kilimas,
3. atšauktas kilimas (dėl variklio gedimo).

Tūpimas: minimalus orlaivio greitis tūptinėje, kai orlaivis yra praskridęs išlyginimo tašką – 180 km/h, vidutinis atstumas, kurio reikia norint visiškai sustabdyti orlaivį palietus žemę – 800 m, kai orlaivio svoris 4700 kg. Kilimas: vidutinis riedėjimo atstumas norint pakilti yra 650 m, kai orlaivio svoris 4700 kg, atsiplėšimo nuo tako greitis 160 km/h. Atšauktas kilimas: atstumas, kurio reikia visiškai sustabdyti orlaivį, kai orlaivio greitis iki 130 km/h, 820 m (*Aero Vodochody* 1990).

Iš tyrimų aprašytų 4 ir 5 šio darbo skyriuose, matyti, kad atlenkiama noselė ir plyšinis priešsparnis padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą, nepaisant to, ar orlaivis yra išskleidęs užsparnius tūpimui ar kilimui. Iš 5 skyriuje aprašytų tyrimų atlenkiama noselė padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą:

- 13 %, 2°,
- 12 %, 2° (kai užsparniai išskleisti 25-ių laipsnių kampu kilimui),
- 17 %, 5° (kai užsparniai išskleisti 44-ių laipsnių kampu tūpimui).

Plyšiniai priešsparniai padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą ir kritinį atakos kampą:

- 75 %, 9°,
- 63 %, 18° (kai užsparniai išskleisti 25-ių laipsnių kampu kilimui),
- 60 %, 20° (kai užsparniai išskleisti 44-ių laipsnių kampu tūpimui).

*Atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio L-39 riedėjimo nutūpus atstumui:*

Atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 17 % (kai užsparniai išskleisti tūpimui). Pagal toliau esančią 6.1 formulę, žinodami, kaip pasikeičia keliamosios jėgos koeficientas, galima nustatyti, kaip pasikeičia orlaivio greitis:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad 6.1$$

čia  $L$  – keliamoji jėga,  $\rho$  – oro tankis,  $v$  – srauto, aptekančio orlaivį greitis,  $S$  – sparno plotas,  $C_L$  – keliamosios jėgos koeficientas.

Orlaiviui tūptinėje svarbu išlaikyti vienodą keliamąją jėgą, žinodami, kad atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalųjį keliamosios jėgos koeficientą 17 %, naudodamiesi 6.1 formule apskaičiuojame, kiek sumažėja srauto (orlaivio) greitis išlaikant tą pačią keliamąją jėgą.

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{v^2}{1,17} S 1,17 C_L$$

Gauname, kad srauto greitis pakeltas kvadratu  $v^2$  sumažėja 1,17 karto, tuomet srauto greitis sumažėja  $\sqrt{1,17} = 1,082$  karto. Jei orlaivio greitis tūptinėje po išlyginimo taško – 180 km/h, tai pritaikius atlenkiamos noselės priešsparnį šis greitis sumažėtų iki 167 km/h. Orlaivio tūpimo atstumą, kai orlaivis tūptinėje skrenda 167 km/h greičiu, apskaičiuojame pagal formules 6.2 ir 6.3:

$$s = \frac{v_{pr} - v_{gal}}{2} t \quad 6.2$$

$$a = \frac{v_{pr} - v_{gal}}{t} \quad 6.3$$

čia  $s$  – orlaivio nuriestas kelias,  $v_{pr}$  – pradinis greitis,  $v_{gal}$  – galutinis greitis (šis greitis lygūs 0, nes orlaivis visiškai sustoja),  $a$  – stabdymo pagreitis,  $t$  – laikas.

Naudodamiesi 6.2 ir 6.3 formulėmis apskaičiuojame orlaivio stabdymo pagreitį, kuris yra 1,56 m/s<sup>2</sup>. Žinodami stabdymo pagreitį pagal 6.3 formulę apskaičiuojame kiek laiko orlaiviui reikia norint pilnai sustoti palietus žemę 167 km/h greičiu. Žinodami orlaivio stabdymo laiką, pagal 6.2 formulę apskaičiuojame, kiek kelio nuriestų orlaivis iki visiško sustojimo. Naudodamas atlenkiamos noselės priešsparnį orlaiviui pilnai sustoti nutūpus reikės 693 metrų. Toliau taikant tokį pat skaičiavimo metodą, naudodami 6.1, 6.2 ir 6.3 formules, apskaičiuojame plyšinio priešsparo įtaką orlaivio riedėjimo nutūpus atstumui. Plyšinis priešsparnis padidina orlaivio maksimalųjį keliamosios jėgos koeficientą 60 %. Jei maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėja 60 %, tai pagal 6.1 formulę orlaivio tūpimo greitis, kuris yra 180 km/h, sumažėja iki 142 km/h. Žinodami, koku greičiu su plyšiniais priešsparniais orlaivis gali artėti tūpti, naudodamiesi 6.2 ir 6.3 formulėmis apskaičiuojame, kokio atstumo reikės norint visiškai sustabdyti orlaivį. Naudojant plyšinį

priešsparnį orlaiviui visiškai sustoti nutūpus reikės 500 m. Taigi atlenkiamos noselės priešsparnis sumažina riedėjimo nutūpus atstumą 14 % tai yra iki 693 m., o plyšinis priešsparnis 36 %, tai yra iki 500 m.

*Atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio L-39 riedėjimo kilti atstumui:*

Atlenkiamos noselės priešsparnis padidina maksimalų keliamosios jėgos koeficientą (kai užsparniai yra išskleisti kilimui) – 12 %. Greitis, kada orlaivis, neturintis atlenkiamos noselės priešsparnio, gali pradėti kilti – 160 km/h. Šiam greičiui pasiekti orlaiviui vidutiniškai reikia 650 m. Pagal 6.1 formulę apskaičiuojame greitį, kada, orlaivis su atlenkiamos noselės priešsparniu gali pradėti kilti. Gauname, kad orlaivis su atlenkiamos noselės priešsparniu gali pradėti kilimą riedėdamas 151 km/h. Toliau naudodamiesi 6.2, 6.3 formulėmis ir žinodami atstumą, kurio reikia orlaiviui norint pasiekti 160 km/h greitį apskaičiuojame, kokiu vidutiniu pagreičiu įsibėgėja orlaivis. Gauname, kad orlaivio vidutinis pagreitis  $1,52 \text{ m/s}^2$ . Toliau žinodami greitėjimosi pagreitį naudodamiesi 6.3 formule apskaičiuojame, kiek laiko orlaiviui reikės, norint pasiekti 151 km/h greitį. Žinodami šį laiką naudodamiesi 6.2 formule apskaičiuojame, kokio atstumo orlaiviui reikės norint pasiekti kilimo greitį. Gauname, kad orlaiviui su atlenkiamos noselės priešsparniu norint pasiekti kilimo greitį reikės riedėti 585 m. Toliau analogišku principu naudodamiesi 6.1, 6.2 ir 6.3 formulėmis apskaičiuojame plyšinio priešsparnio įtaką orlaivio riedėjimo kilti atstumui. Plyšinis priešsparnis padidina orlaivio (su išskleistais užsparniais kilimui) maksimalų keliamosios jėgos koeficientą – 63 %. Pagal 6.1 formulę apskaičiuojame, kad orlaivis kilimą pradėti galės, kai pasieks 125 km/h greitį. Žinodami vidutinį orlaivio pagreitį, kuris yra  $1,52 \text{ m/s}^2$ , pagal 6.3 formulę apskaičiuojame, kiek laiko reikės orlaiviui norint pasiekti 125 km/h greitį. Gauname, kad orlaiviui įsibėgėti iki 125 km/h reikės 23 sekundžių. Žinodami, kiek laiko reikės orlaiviui įsibėgėti iki 125 km/h, pagal 6.2 formulę apskaičiuojame, kokį kelią nuriedės orlaivis, kad pasiektų kilimo greitį. Gauname, kad orlaivio su plyšiniu priešsparniu įsibėgėjimo kilti atstumas yra 403 m. Taigi atlenkiamos noselės priešsparnis sumažina riedėjimo kilti atstumą 10 %, tai yra iki 585 m, o plyšinis priešsparnis 38 %, tai yra iki 403 m.

*Atlenkiamos noselės ir plyšinio priešsparnio įtaka orlaivio L-39 atšaukto kilimo (dėl variklio gedimo) procedūrai:*

Jei pradėjus kilimo taku kilimui variklis nustoja kurti trauką, yra vykdoma atšaukto kilimo procedūra. Jei orlaivio greitis buvo iki 130 km/h ir variklis nustojo kurti trauką, tuomet minamalus atstumas, nuo riedėjimo su visa trauka pradžios iki visiško sustojimo yra 820 m. (Aero Vodochody, 1990). Šioje dalyje bus skaičiuojame, kiek sutrumpėtų šis atstumas jei orlaivis turėtų atlenkiamos noselės ar plyšinius priešsparnius.

Atlenkiama noselė padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą 12 % (kai užsparniai išskleisti kilimui). Pagal 6.1 formulę jei maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėja 12 %, tai tam, kad keliamoji jėga išliktų nepakitusi, srauto (orlaivio) greitis gali sumažėti 1,058 karto. Jei orlaivis, atliekantis atšaukto kilimo procedūrą, turės atlenkiamos noselės priešsparnius, tai greitis, iki kurio šią procedūrą bus galima vykdyti, bus 123 km/h. Toliau pagal 6.2 ir 6.3 formules apskaičiuojame orlaivio įsibėgėjimo ir stabdymo pagreičius. Atlikę skaičiavimus gauname, kad orlaivio įsibėgėjimo pagreitis –  $1,52 \text{ m/s}^2$ , o stabdymo pagreitis  $1,56 \text{ m/s}^2$ . Toliau pagal 6.3 formulę apskaičiuojame, kiek laiko reikės orlaiviui įsibėgėti iki 130 km/h. Gauname, kad orlaiviui įsibėgėti reikės 22,5 s. Žinodami laiką, kurio orlaiviui reikės norint pasiekti 123 km/h greitį, pagal 6.2 formulę apskaičiuojame, kokio atstumo reikės orlaiviui norint pasiekti šį greitį. Atlikę skaičiavimą gauname, kod orlaiviui įsibėgėti iki 123 km/h. reikės nuriedėti 383 m. Toliau pagal 6.2 ir 6.3 formules apskaičiuojame, kiek laiko orlaiviui reikės stabdyti ir kokį atstumą orlaivis nuriedės nuo pradėjimo stabdyti iki visiško sustojimo. Atlikę skaičiavimus gauname, kad orlaivis stabdys 22 s ir nuo stabdymo pradžios iki visiško sustojimo nuriedės 374 m. Iš viso atlikdami atšaukto kilimo procedūrą orlaiviu, kuris turi atlenkiamos noselės priešsparnį, orlaivis nuriedės 757 m.

Toliau atliekame analogiškus skaičiavimus, tik šiuo atveju apskaičiuosime kokią įtaką atšaukto kilimo procedūrai turi plyšinis priešsparnis. Plyšinis priešsparnis padidina maksimalų orlaivio keliamosios jėgos koeficientą 63 % (kai užsparniai išskleisti kilimui). Pagal 6.1 formulę jei maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėja 63%, tai tam, kad keliamoji jėga išliktų nepakitusi, srauto (orlaivio) greitis gali sumažėti 1,28 karto. Jei orlaivis, atliekantis atšaukto kilimo procedūrą turės plyšinius priešsparnius, tai greitis, iki kurio ši procedūra bus vykdoma, – 102 km/h. Žinodami orlaivio įsibėgėjimo pagreitį, kuris yra  $1,52 \text{ m/s}^2$  ir stabdymo pagreitį, kuris yra  $1,56 \text{ m/s}^2$ , pagal 6.3 formulę apskaičiuojame, kiek laiko reikės orlaiviui įsibėgėti iki 102 km/h. Atlikę skaičiavimus gauname, kad orlaiviui reikės 18,6 s. tam, kad pasiektų 102 km/h greitį. Žinodami laiką, kurį riedės orlaivis iki 102 km/h pagal 6.2 formulę apskaičiuojame, kokį kelią orlaivis nuriedės iki pasieks 102 km/h greitį. Gauname, kad orlaiviui įsibėgėti iki 102 km/h reikės 263 m. Toliau žinodami orlaivio stabdymo pagreitį, pagal 6.3 formulę galime apskaičiuoti kiek laiko orlaivis stabdys iki sustojimo. Atlikę skaičiavimus gauname, kad orlaivis stabdys 18,2 s. Žinodami stabdymo laiką pagal 6.2 formulę galime apskaičiuoti, kokį kelią orlaivis nuriedės iki sustojimo. Gauname, kad orlaivis nuo stabdymo pradžios iki sustojimo nuriedės 258 m. Iš viso atlikdami atšaukto kilimo procedūrą orlaiviu, kuris turi plyšinius priešsparnius, orlaivis nuriedės 521 m. Taigi atlenkiamos noselės priešsparnis sumažina orlaivio riedėjimo atstumą vykdant atšaukto kilimo procedūrą 8 %, tai yra iki 757 m, o plyšinis priešsparnis – 35 %, tai yra iki 521 m.



# IŠVADOS

## 1. Šiame darbe atlikta literatūros analizė:

- Priešsparnių įtaką orlaivių aerodinaminėms charakteristikoms.
- Lengvasis šturmo lėktuvas *Aero L-39*.

## 2. Išanalizuoti aerodinaminių tyrimų metodai:

- Kompiuterinė programa XFOIL gali tirti sparno profilius, kurie yra sudaryti iš vieno elemento. Ši programa veikia sąveikaujančiu zoniniu metodu.
- Kompiuterinė programa JAVAFOIL gali tirti sparno profilius, kurie yra sudaryti iš keletos elementų. Ši programa veikia nesąveikaujančiu zoniniu metodu.
- Kompiuterinė programa XFLR5, tai interaktyvi programa, kuri gali tirti viso orlaivio aerodinamines charakteristikas. Ši programa veikia pagal keliamosios jėgos linijos metodą (angl. Lifting Line Theory).

## 3. Naudojant kompiuterines programas XFOIL ir JAVAFOIL ištirtas orlaivio *L-39* sparno profilis su atlenkiama nosele ir sparno profilis su plyšiniu priešsparniu:

- Atlenkiama noselė padidina maksimalųjį sparno profilio keliamosios jėgos koeficientą 5% (JAVAFOIL), 17 % (XFOIL) ir kritinį atakos kampą  $3^\circ$  (JAVAFOIL, XFOIL),
- Atlenkiama noselė padidina maksimalųjį sparno profilio su išskleistais užsparniais keliamosios jėgos koeficientą 17 % ir kritinį atakos kampą  $2^\circ$  (JAVAFOIL).
- Plyšinis priešsparnis padidina maksimalųjį sparno profilio keliamosios jėgos koeficientą 91 % ir kritinį atakos kampą  $11^\circ$  (JAVAFOIL).
- Plyšinis priešsparnis padidina maksimalųjį sparno profilio su išskleistais užsparniais keliamosios jėgos koeficientą 55 % ir kritinį atakos kampą  $17^\circ$  (JAVAFOIL).

## 4. Naudojant kompiuterinę programą XFLR5 sumodeliuotas orlaivis *L-39*, ištirtos šio orlaivio aerodinaminės charakteristikos, kai orlaivio sparnas yra su atlenkiama nosele ar plyšiniu priešsparniu:

- Plyšiniai priešsparniai padidina orlaivio *L-39* maksimalųjį keliamosios jėgos koeficientą 75 % ir kritinį atakos kampą  $9^\circ$ .
- Plyšiniai priešsparniai padidina orlaivio *L-39*, kai orlaivis yra su išskleistais užsparniais kylimui (25-ių laipsnių kampu), maksimalųjį keliamosios jėgos koeficientą 63 % ir kritinį atakos kampą  $18^\circ$ .

- Plyšiniai priešsparniai padidina orlaivio *L-39*, kai orlaivis yra su išskleistais užsparniais tūpimui (44-ių laipsnių kampu), maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 60 % ir kritinį atakos kampą 20°.
- Atlenkiamą noselę padidina orlaivio *L-39* maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 13 % ir kritinį atakos kampą 2° (duomenys gauti, kai sparno profilio poliarės importuotos iš kompiuterinės programos *JavaFoil*).
- Atlenkiamą noselę padidina orlaivio *L-39* maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 11 % ir kritinį atakos kampą 2° (duomenys gauti, kai sparno profilio poliarės apskaičiuotos kompiuterine programa *Xflr5*).
- Atlenkiamą noselę padidina orlaivio *L-39*, kai orlaivis yra su išskleistais užsparniais kylimui (25-ių laipsnių kampu), maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 12 % ir kritinį atakos kampą 2°.
- Atlenkiamą noselę padidina orlaivio *L-39*, kai orlaivis yra su išskleistais užsparniais tūpimui (44-ių laipsnių kampu), maksimalų keliamosios jėgos koeficientą 17 % ir kritinį atakos kampą 5°.

5. Įvertinta plyšinio ir atlenkiamos noselės priešsparnio įtaka orlaivio standartiniams procedūroms:

- Atlenkiamą noselę sumažina orlaivio riedėjimo atstumą nutūpus 14 %, tai yra nuo 800 m. iki 693 m. Plyšinis priešsparnis – 36 %, tai yra nuo 800 m. iki 500 m.
- Atlenkiamą noselę sumažina orlaivio riedėjimo kilti atstumą 10 %, tai yra nuo 650 m. iki 585 m. Plyšinis priešsparnis – 38 %, tai yra nuo 650 m. iki 403 m.
- Atlenkiamą noselę sumažina riedėjimo atstumą vykdant atšaukto kilimo procedūrą 8 %, tai yra nuo 820 m iki 757 m. Plyšinis priešsparnis 35 %, tai yra nuo 820 m iki 521 m.

## LITERATŪRA

- Lasauskas, E. 2008. *Skrydžio principai*. Vilnius: Technika.
- Lasauskas, E. 2010. *Skrydžio dinamika (konspektas)*. Vilnius: Technika.
- Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E. 1945. *Summary of airfoil data*. NACA TR 824.
- Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E. 1952. *Theory of wing sections, Including a Summary of Airfoil Data*.
- Airfoiltools. *Reynolds number calculator*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. vasario 23 d.] Prieiga per internetą: <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber>
- Airliners [interaktyvus]. 2016. [Žiūrėta 2017 m. sausio 31 d.] Prieiga per internetą: <http://www.airliners.net/photo/Baltic-Bees-Jet-Team/Aero-L-39C-Albatros/4087699/L>
- Bateson, R. 1971. *Fieseler Fi 156 Storch Aircraft Profile No. 228*. Windsor, Berkshire, UK: Profile Publications Ltd. ASIN: B000J443X2
- Brune, G. W., McMasters, J. H. 1989. *Computational aerodynamics applied to high-lift systems*. In: Henne PA, editor. *Applied computational aerodynamics, progress in aeronautics and astronautics*, Vol. 125. New York: AIAA, p. 389–433.
- Capbern, P. 1993. *High-lift research: application to the design of the ATR72 flap*. High-Lift System Aerodynamics, AGARD CP 515 p. 28-1–28-10.
- Charles, E. D. 1981. *Flight Theory and Aerodynamics : A Practical Guide for Operational Safety*. New York, United States.
- Drela, M. 1989. *An Integral Boundary Layer Formulation for Blunt Trailing Edges*. AIAA-89–2200.
- Drela, M. 1989. *XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*. In: Mueller, T. J. (Ed.), *Lecture Notes in Engineering, Lecture Notes in Engineering*. New York, pp. 1–12.
- Entsminger, A., Gallagher, D., Graf, W. 2004. *General Dynamics F – 16 Fighting Falcon*.
- Eppler, R. 1978.: *Turbulent Airfoils for General Aviation*, Journal of Aircraft, Vol. 15, No. 2.
- Eppler, R., Somers, D. M. 1980. *A Computer Program for the Design and Analysis of Low-Speed Airfoils*. NASA TM 80210.
- Gatlin G. M., McGhee R. J. 1997. *Experimental investigation of semispan model testing techniques*. J Aircraft;34(4):500–5
- Gatlin, G. M., McGhee R. J. 1996. *Study of semi-span model testing techniques*. AIAA Paper 96-2386.
- Greenman, R. M. 1998. *Two-dimensional high-lift aerodynamic optimization using neural networks*. NASA TM 112233.

- Greenman, R. M., Roth, K. R. 1999. *High-lift optimization design using neural networks on a multi-element airfoil*. J. Fluids. Eng;121:434–440.
- Greenman, R. M., Roth, K. R. 1999. *Minimizing computational data requirements for multi-element airfoils using neural networks*. J Aircraft;36(5):777–840
- Gustav, O. K., Prandtl, L. 1957. *Fundamentals of Hydro and Aeromechanics*. Courier Corporation. ISBN 978-0-486-60374-2.
- Heintz, C. 2009. *Anatomy of a STOL Aircraft. Designing a Modern Short Take-Off and Landing Aircraft*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. balandžio 6 d.] Prieiga per internetą: <http://www.zenithair.com/stolch801/design/design.html>
- Heperle, M. 2016. *Validation and Accuracy* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. vasario 28 d.] Prieiga per internetą: [http://www.mh-aerotools.de/airfoils/jf\\_validation.htm](http://www.mh-aerotools.de/airfoils/jf_validation.htm)
- Hepperle, M. 2014. *JavaFoil users guide*.
- Yip, L. P., Vijgen P. M. H. W., Hardin, J. D., Van Dam, C. P. 1993. *Inflight pressure distributions and skin-friction measurements on a subsonic transport high-lift wing section*. High-Lift System Aerodynamics, AGARD CP 515. p. 21-1–21-19.
- L-39 Albatros. Aero – Concept [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. vasario 2 d.] Prieiga per internetą: <http://www.aero-concept.com/fiches/39.html>
- Lachman, O. 1921. *Experiments with slotted wings*. Technical notes. National advisory committee for Aeronautics. Translated from *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*.
- Lietuvos kariuomenė. *Lengvasis atakos lėktuvas L-39 ZA*, 2015. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. vasario 2 d.] Prieiga per internetą: [http://www.lietuvoskariuomene.lt/lt/kariuomenes\\_struktura/karines\\_oro\\_pajegos/struktura\\_314/aviacijos\\_baze\\_2196/orlaiviai\\_3135/lengvasis\\_atakos\\_lektuvas\\_l-39\\_zs.html](http://www.lietuvoskariuomene.lt/lt/kariuomenes_struktura/karines_oro_pajegos/struktura_314/aviacijos_baze_2196/orlaiviai_3135/lengvasis_atakos_lektuvas_l-39_zs.html)
- MigFlug [interaktyvus]. [Žiūrėta 2017 m. sausio 25 d.] Prieiga per internetą: <http://www.migflug.com/en/jet-fighter-flights/flying-with-a-jet/l-29-albatros-in-slovakia.html>
- Military Factory. *Aero L-39 Albatros advanced trainer*, [interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2017 m. sausio 31 d.] Prieiga per internetą: [http://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft\\_id=436](http://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=436)
- Moens, F., Capbern, P. 1995. *Design and testing of leading edge high-lift devices for laminar flow wing applications*. High Lift and Separation Control, Royal Aeronautical Society, March. p. 7-1–7-13.
- Nield, B.N. 1995. *An overview of the Boeing 777 high-lift aerodynamic design*. Aeronaut J;99:361–71.

Olson, E. D. 2015. *Semi-Empirical Prediction of Aircraft Low-Speed Aerodynamic Characteristics*. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum.

Page, F. H. 1921. *Developments in aircraft design by the use of slotted wings*.

Parsons, D. 2006. *Airplane pictures* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2016 m. Gruodžio 17d.] Prieiga per internetą: <http://fairchild24.com/dh4.htm/>

Prandtl, L. 1952. *Essentials of fluid dynamics: With applications to hydraulics aeronautics, meteorology, and other subjects*.

Roskam, J. 1987. *Airplane Design – Preliminary calculation of aerodynamic, thrust and power characteristics*, part 6. Roskam Aviation and Engineering Corporation, ISBN 999074761X, 9789990747614.

Smith A. M. O. 1972. *Aerodynamics of high-lift airfoil systems*. Fluid Dynamics of Aircraft Stalling, AGARD CP 102. p. 10-1–10-27.

Smith A. M. O. 1975. *High-Lift Aerodynamics*. McDonnell Douglas Corporation, Long beach, California. *Journal of Aircraft* Vol. 12, No. 6, pages 501 – 530.

Technical documentation, 1990 L-39 ZA, *Aero Vodochody*.

Van Dam, C. P. 2002. *The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes*. Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California. *Progress in Aerospace Science* 38, pages 101 – 144.

Van Dam, C. P., Los, S. M., Miley, S., Roback, V. E., Yip, L. P., Bertelrud, A. 1997. *In-flight boundary-layer measurements on a high-lift system: slat*. *J. Aircraft*;34(6):748–56.

Wedderspoon, J. R. 1986. *The high lift development of the A320 aircraft*. ICAS Paper 86-2.3.2.

Xflr5 [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. vasario 10 d.] Prieiga per internetą: <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>

Xflr5 v6.02 *Guidelines* 2013. Xflr5 analysis of foils and wings operating at low Reynolds number.

Eppler, R. *Praktische Berechnung laminarer und turbulenter Absauge-Grenzschichten*, Ingenieur-Archiv.



## PRIEDAI

A1 priedas. Orlaivio L-39 sparno profilio be keliąmają jėgą didinančių plokštumų koordinatės (121 taškas).

| Nr. | X          | Y          | Nr. | X          | Y           |
|-----|------------|------------|-----|------------|-------------|
| 1   | 1          | 0          | 62  | 0.00046373 | -0.00305654 |
| 2   | 0.99689879 | 0.00003884 | 63  | 0.00240116 | -0.00689326 |
| 3   | 0.99258443 | 0.00014308 | 64  | 0.00618542 | -0.01089224 |
| 4   | 0.98706819 | 0.00032992 | 65  | 0.01169166 | -0.01471427 |
| 5   | 0.98036455 | 0.00061989 | 66  | 0.01870306 | -0.01831312 |
| 6   | 0.97249089 | 0.00102895 | 67  | 0.02705174 | -0.021776   |
| 7   | 0.96346765 | 0.00157431 | 68  | 0.0366387  | -0.02517786 |
| 8   | 0.95331828 | 0.00227298 | 69  | 0.04741533 | -0.0285167  |
| 9   | 0.94206902 | 0.00314009 | 70  | 0.059349   | -0.03175105 |
| 10  | 0.92974899 | 0.00419049 | 71  | 0.07240152 | -0.0348559  |
| 11  | 0.91638926 | 0.00542983 | 72  | 0.08652778 | -0.03783494 |
| 12  | 0.90202365 | 0.00686612 | 73  | 0.10168461 | -0.04068481 |
| 13  | 0.88668739 | 0.00849612 | 74  | 0.11782908 | -0.04339742 |
| 14  | 0.87041836 | 0.01032015 | 75  | 0.13491728 | -0.04596344 |
| 15  | 0.85325595 | 0.01233213 | 76  | 0.15290438 | -0.04836867 |
| 16  | 0.83524162 | 0.01452554 | 77  | 0.17174389 | -0.05059861 |
| 17  | 0.81641838 | 0.01689009 | 78  | 0.19138863 | -0.05262728 |
| 18  | 0.79683072 | 0.01941221 | 79  | 0.2117877  | -0.05444533 |
| 19  | 0.77652368 | 0.02206875 | 80  | 0.23288957 | -0.05603155 |
| 20  | 0.75554333 | 0.02483202 | 81  | 0.25463995 | -0.05737791 |
| 21  | 0.7339384  | 0.02768231 | 82  | 0.27698306 | -0.05847813 |
| 22  | 0.71175753 | 0.03058752 | 83  | 0.29986297 | -0.05929768 |
| 23  | 0.68905093 | 0.03351659 | 84  | 0.32322112 | -0.059817   |
| 24  | 0.66587075 | 0.03644241 | 85  | 0.34699752 | -0.06000224 |
| 25  | 0.64226957 | 0.039331   | 86  | 0.37113014 | -0.05984572 |
| 26  | 0.61830084 | 0.04214465 | 87  | 0.39555617 | -0.05934396 |
| 27  | 0.59402035 | 0.04485513 | 88  | 0.4202121  | -0.05849718 |
| 28  | 0.56948473 | 0.04743219 | 89  | 0.44503465 | -0.0573206  |
| 29  | 0.54475204 | 0.0498494  | 90  | 0.4699616  | -0.0558434  |
| 30  | 0.51988072 | 0.0520754  | 91  | 0.49493061 | -0.05408466 |
| 31  | 0.49493061 | 0.05408466 | 92  | 0.51988072 | -0.0520754  |
| 32  | 0.4699616  | 0.0558434  | 93  | 0.54475204 | -0.0498494  |
| 33  | 0.44503465 | 0.0573206  | 94  | 0.56948473 | -0.04743219 |
| 34  | 0.4202121  | 0.05849718 | 95  | 0.59402035 | -0.04485513 |
| 35  | 0.39555617 | 0.05934396 | 96  | 0.61830084 | -0.04214465 |
| 36  | 0.37113014 | 0.05984572 | 97  | 0.64226957 | -0.039331   |
| 37  | 0.34699752 | 0.06000224 | 98  | 0.66587075 | -0.03644241 |
| 38  | 0.32322112 | 0.059817   | 99  | 0.68905093 | -0.03351659 |
| 39  | 0.29986297 | 0.05929768 | 100 | 0.71175753 | -0.03058752 |
| 40  | 0.27698306 | 0.05847813 | 101 | 0.7339384  | -0.02768231 |
| 41  | 0.25463995 | 0.05737791 | 102 | 0.75554333 | -0.02483202 |
| 42  | 0.23288957 | 0.05603155 | 103 | 0.77652368 | -0.02206875 |
| 43  | 0.2117877  | 0.05444533 | 104 | 0.79683072 | -0.01941221 |
| 44  | 0.19138863 | 0.05262728 | 105 | 0.81641838 | -0.01689009 |
| 45  | 0.17174389 | 0.05059861 | 106 | 0.83524162 | -0.01452554 |
| 46  | 0.15290438 | 0.04836867 | 107 | 0.85325595 | -0.01233213 |
| 47  | 0.13491728 | 0.04596344 | 108 | 0.87041836 | -0.01032015 |

A1 lentelės tęsinys kitame puslapyje

A1 lentelės pabaiga

|           |            |            |            |            |             |
|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>48</b> | 0.11782908 | 0.04339742 | <b>109</b> | 0.88668739 | -0.00849612 |
| <b>49</b> | 0.10168461 | 0.04068481 | <b>110</b> | 0.90202365 | -0.00686612 |
| <b>50</b> | 0.08652778 | 0.03783494 | <b>111</b> | 0.91638926 | -0.00542983 |
| <b>51</b> | 0.07240152 | 0.0348559  | <b>112</b> | 0.92974899 | -0.00419049 |
| <b>52</b> | 0.059349   | 0.03175105 | <b>113</b> | 0.94206902 | -0.00314009 |
| <b>53</b> | 0.04741533 | 0.0285167  | <b>114</b> | 0.95331828 | -0.00227298 |
| <b>54</b> | 0.0366387  | 0.02517786 | <b>115</b> | 0.96346765 | -0.00157431 |
| <b>55</b> | 0.02705174 | 0.021776   | <b>116</b> | 0.97249089 | -0.00102895 |
| <b>56</b> | 0.01870306 | 0.01831312 | <b>117</b> | 0.98036455 | -0.00061989 |
| <b>57</b> | 0.01169166 | 0.01471427 | <b>118</b> | 0.98706819 | -0.00032992 |
| <b>58</b> | 0.00618542 | 0.01089224 | <b>119</b> | 0.99258443 | -0.00014308 |
| <b>59</b> | 0.00240116 | 0.00689326 | <b>120</b> | 0.99689879 | -0.00003884 |
| <b>60</b> | 0.00046373 | 0.00305654 | <b>121</b> | 1          | 0           |
| <b>61</b> | 0          | 0          |            |            |             |

A2 priedas. Orlaivio L-39 sparno profilio su atlenkiama nosele koordinatės (121 taškas).

| Nr. | X          | Y          | Nr. | X          | Y           |
|-----|------------|------------|-----|------------|-------------|
| 1   | 0.996593   | 0          | 62  | -0.0003022 | -0.02356129 |
| 2   | 0.99443888 | 0.0000254  | 63  | -0.0001924 | -0.02466756 |
| 3   | 0.99139868 | 0.00008388 | 64  | 0.00002714 | -0.02599923 |
| 4   | 0.98742286 | 0.0001977  | 65  | 0.00046224 | -0.02726033 |
| 5   | 0.98246843 | 0.00037741 | 66  | 0.00113337 | -0.02854798 |
| 6   | 0.9764742  | 0.00064318 | 67  | 0.00221986 | -0.02999834 |
| 7   | 0.96937408 | 0.00101275 | 68  | 0.0037338  | -0.03159549 |
| 8   | 0.96109791 | 0.00150773 | 69  | 0.00588891 | -0.03318615 |
| 9   | 0.95157399 | 0.00215331 | 70  | 0.00869544 | -0.03475566 |
| 10  | 0.94072946 | 0.00297448 | 71  | 0.01240603 | -0.0362181  |
| 11  | 0.92849282 | 0.00400051 | 72  | 0.01704446 | -0.03755954 |
| 12  | 0.91479682 | 0.00525631 | 73  | 0.02277597 | -0.03872494 |
| 13  | 0.89958071 | 0.00676678 | 74  | 0.02977268 | -0.03969227 |
| 14  | 0.88279207 | 0.00854938 | 75  | 0.03812156 | -0.04046314 |
| 15  | 0.86438996 | 0.01062232 | 76  | 0.04793315 | -0.04099595 |
| 16  | 0.84435263 | 0.0129941  | 77  | 0.05931614 | -0.0412178  |
| 17  | 0.82267788 | 0.01566847 | 78  | 0.07236155 | -0.04102742 |
| 18  | 0.79938214 | 0.01864025 | 79  | 0.08712617 | -0.04044407 |
| 19  | 0.77449744 | 0.02188756 | 80  | 0.10375356 | -0.04168504 |
| 20  | 0.74806785 | 0.02536881 | 81  | 0.12226356 | -0.04459468 |
| 21  | 0.72018007 | 0.02904105 | 82  | 0.1425957  | -0.04747581 |
| 22  | 0.69094739 | 0.03283617 | 83  | 0.16473951 | -0.0501931  |
| 23  | 0.66048707 | 0.03668744 | 84  | 0.18866084 | -0.05269205 |
| 24  | 0.62894108 | 0.04050887 | 85  | 0.21430243 | -0.0549156  |
| 25  | 0.59648981 | 0.04421133 | 86  | 0.24154232 | -0.05680713 |
| 26  | 0.56331419 | 0.04771063 | 87  | 0.27024985 | -0.05833128 |
| 27  | 0.52961442 | 0.05092097 | 88  | 0.30030165 | -0.0594035  |
| 28  | 0.49560549 | 0.05377115 | 89  | 0.33152502 | -0.05994382 |
| 29  | 0.4615116  | 0.05616234 | 90  | 0.36371226 | -0.0598933  |
| 30  | 0.42755935 | 0.05801933 | 91  | 0.39667998 | -0.05921083 |
| 31  | 0.39396682 | 0.05929246 | 92  | 0.43021178 | -0.05789381 |
| 32  | 0.36097372 | 0.05991933 | 93  | 0.46407685 | -0.05600174 |
| 33  | 0.32878122 | 0.05992071 | 94  | 0.49806213 | -0.05357843 |
| 34  | 0.29758194 | 0.05933015 | 95  | 0.53193995 | -0.05071246 |
| 35  | 0.26758808 | 0.0582082  | 96  | 0.56549248 | -0.04749125 |
| 36  | 0.23894621 | 0.0566458  | 97  | 0.59850721 | -0.04398813 |
| 37  | 0.21178826 | 0.05471894 | 98  | 0.63079042 | -0.04029073 |
| 38  | 0.18625673 | 0.05245964 | 99  | 0.66216157 | -0.0364805  |
| 39  | 0.16245527 | 0.04992947 | 100 | 0.69244434 | -0.0326447  |
| 40  | 0.14043186 | 0.04718559 | 101 | 0.72150546 | -0.0288677  |
| 41  | 0.12022595 | 0.04429906 | 102 | 0.74922656 | -0.02521587 |
| 42  | 0.10185935 | 0.04129521 | 103 | 0.77549492 | -0.02175662 |
| 43  | 0.08532658 | 0.03808292 | 104 | 0.80023153 | -0.01853052 |
| 44  | 0.07069037 | 0.03151699 | 105 | 0.82339295 | -0.01557929 |
| 45  | 0.05779354 | 0.02487534 | 106 | 0.84494652 | -0.01292246 |
| 46  | 0.04655463 | 0.01870103 | 107 | 0.86487564 | -0.01056608 |
| 47  | 0.03688203 | 0.01299693 | 108 | 0.88318246 | -0.00850666 |
| 48  | 0.02867273 | 0.00778847 | 109 | 0.89988915 | -0.00673517 |
| 49  | 0.02182842 | 0.00310701 | 110 | 0.91503627 | -0.00523371 |
| 50  | 0.01621867 | -0.0010556 | 111 | 0.92867507 | -0.00398552 |
| 51  | 0.01167487 | -0.0047585 | 112 | 0.94086496 | -0.00296369 |
| 52  | 0.00809009 | -0.0080426 | 113 | 0.95167211 | -0.00214634 |
| 53  | 0.00538192 | -0.0109433 | 114 | 0.96116666 | -0.00150339 |
| 54  | 0.00331687 | -0.0135303 | 115 | 0.96942032 | -0.00101018 |
| 55  | 0.00190229 | -0.0158305 | 116 | 0.97650364 | -0.00064175 |
| 56  | 0.00089972 | -0.0177888 | 117 | 0.98248571 | -0.00037671 |

A2 lentelės tęsinys kitame puslapyje

A2 lenteļs pabaiga

|    |            |            |            |            |             |
|----|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 57 | 0.00027348 | -0.0192851 | <b>118</b> | 0.98743191 | -0.00019741 |
| 58 | -6.134E-05 | -0.0204074 | <b>119</b> | 0.99140251 | -0.00008379 |
| 59 | -0.0002481 | -0.0213435 | <b>120</b> | 0.99444003 | -0.00002538 |
| 60 | -0.0003319 | -0.0221494 | <b>121</b> | 0.996593   | 0           |
| 61 | -0.000343  | -0.02281   |            |            |             |

A3 priedas. Orlaivio L-39 sparno profilio su plyšiniu priešsparniu koordinatės (183 taškai).

| Nr. | X          | Y          | Nr. | X          | Y           | Nr. | X           | Y           |
|-----|------------|------------|-----|------------|-------------|-----|-------------|-------------|
| 1   | 0.85627227 | 0          | 62  | -0.0243164 | -0.00840708 | 123 | -0.04253123 | -0.00528167 |
| 2   | 0.85434374 | 0.00117576 | 63  | -0.0242102 | -0.00908276 | 124 | -0.04329328 | -0.00519246 |
| 3   | 0.85165691 | 0.00278603 | 64  | -0.0239905 | -0.00995104 | 125 | -0.04454947 | -0.00503345 |
| 4   | 0.84814191 | 0.00423966 | 65  | -0.0236255 | -0.01101525 | 126 | -0.04628774 | -0.0048073  |
| 5   | 0.84375556 | 0.00524331 | 66  | -0.0230681 | -0.01228611 | 127 | -0.04849229 | -0.00455322 |
| 6   | 0.83846172 | 0.00609441 | 67  | -0.022199  | -0.01379521 | 128 | -0.05114447 | -0.00437625 |
| 7   | 0.83217314 | 0.00693195 | 68  | -0.0207936 | -0.01559928 | 129 | -0.05422129 | -0.00440267 |
| 8   | 0.8248928  | 0.00790161 | 69  | -0.0188673 | -0.01767301 | 130 | -0.05769189 | -0.00466565 |
| 9   | 0.8164561  | 0.00918036 | 70  | -0.0164284 | -0.01995597 | 131 | -0.06151871 | -0.00513918 |
| 10  | 0.80691565 | 0.01064929 | 71  | -0.0132499 | -0.02235041 | 132 | -0.06565763 | -0.005738   |
| 11  | 0.79608258 | 0.01216193 | 72  | -0.0090529 | -0.0247646  | 133 | -0.07006146 | -0.00637266 |
| 12  | 0.78403692 | 0.01368894 | 73  | -0.0040263 | -0.02723072 | 134 | -0.07468661 | -0.00706106 |
| 13  | 0.77057878 | 0.01514883 | 74  | 0.00212376 | -0.02968678 | 135 | -0.07948902 | -0.00785092 |
| 14  | 0.7558129  | 0.01677131 | 75  | 0.00955421 | -0.03213314 | 136 | -0.08442329 | -0.00877474 |
| 15  | 0.73955844 | 0.01885286 | 76  | 0.01813231 | -0.03478195 | 137 | -0.08944251 | -0.00979963 |
| 16  | 0.7219145  | 0.0214486  | 77  | 0.0282964  | -0.03781406 | 138 | -0.09449851 | -0.01088026 |
| 17  | 0.70280443 | 0.02455838 | 78  | 0.03975572 | -0.0408908  | 139 | -0.09952834 | -0.01206181 |
| 18  | 0.68225151 | 0.02751455 | 79  | 0.05292943 | -0.04359368 | 140 | -0.10445341 | -0.01349036 |
| 19  | 0.6603471  | 0.03029131 | 80  | 0.06752685 | -0.04616306 | 141 | -0.10919458 | -0.01526566 |
| 20  | 0.63703191 | 0.03302842 | 81  | 0.08388472 | -0.04872755 | 142 | -0.11366408 | -0.01725484 |
| 21  | 0.61247498 | 0.03561907 | 82  | 0.10176826 | -0.05150965 | 143 | -0.11778066 | -0.01927183 |
| 22  | 0.58672879 | 0.03804753 | 83  | 0.12130049 | -0.0545427  | 144 | -0.12151489 | -0.02137689 |
| 23  | 0.55987043 | 0.04056486 | 84  | 0.14243094 | -0.05732925 | 145 | -0.1248962  | -0.02390653 |
| 24  | 0.53208838 | 0.04309263 | 85  | 0.16498275 | -0.0598228  | 146 | -0.12793683 | -0.0270507  |
| 25  | 0.50348947 | 0.04564951 | 86  | 0.1890524  | -0.06198868 | 147 | -0.13044945 | -0.03051331 |
| 26  | 0.47423722 | 0.04858539 | 87  | 0.21438629 | -0.06379627 | 148 | -0.13219621 | -0.033771   |
| 27  | 0.44453728 | 0.05060204 | 88  | 0.24087878 | -0.06529822 | 149 | -0.13313654 | -0.03651183 |
| 28  | 0.41455919 | 0.05114172 | 89  | 0.26847398 | -0.0667086  | 150 | -0.1333921  | -0.0386123  |
| 29  | 0.38450778 | 0.05172691 | 90  | 0.29690003 | -0.06802205 | 151 | -0.13318788 | -0.04008409 |
| 30  | 0.35456174 | 0.05275    | 91  | 0.32601229 | -0.06897745 | 152 | -0.13278776 | -0.041016   |
| 31  | 0.32490907 | 0.05357218 | 92  | 0.35565773 | -0.06886356 | 153 | -0.13243297 | -0.0415185  |
| 32  | 0.29582251 | 0.05197682 | 93  | 0.38558633 | -0.06832067 | 154 | -0.13201316 | -0.04194873 |
| 33  | 0.26741825 | 0.05037778 | 94  | 0.41562799 | -0.06759209 | 155 | -0.1311601  | -0.04255748 |
| 34  | 0.23984629 | 0.04938594 | 95  | 0.4455911  | -0.06654311 | 156 | -0.12970688 | -0.04320672 |
| 35  | 0.21338264 | 0.04792393 | 96  | 0.4752542  | -0.06448067 | 157 | -0.12754125 | -0.04373681 |
| 36  | 0.18807885 | 0.04597762 | 97  | 0.50445649 | -0.0615827  | 158 | -0.12470485 | -0.0439919  |
| 37  | 0.16405237 | 0.04364842 | 98  | 0.53300139 | -0.05882624 | 159 | -0.12147675 | -0.04384227 |
| 38  | 0.14154451 | 0.0411589  | 99  | 0.5607465  | -0.05661171 | 160 | -0.1181177  | -0.04318282 |
| 39  | 0.12046369 | 0.03840111 | 100 | 0.58756024 | -0.05399999 | 161 | -0.1147096  | -0.0419372  |
| 40  | 0.1009859  | 0.0353357  | 101 | 0.61322225 | -0.04787991 | 162 | -0.11130177 | -0.04007487 |
| 41  | 0.083154   | 0.03247782 | 102 | 0.63766388 | -0.03635167 | 163 | -0.10791081 | -0.03762587 |
| 42  | 0.06684121 | 0.02987465 | 103 | 0.66082858 | -0.0235109  | 164 | -0.10449718 | -0.03473921 |
| 43  | 0.05228931 | 0.02748137 | 104 | 0.68268002 | -0.0194338  | 165 | -0.10097727 | -0.03165321 |

A3 lentelės tęsinys kitame puslapyje

A3 lentelės pabaiga

|           |            |            |            |            |             |            |             |             |
|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| <b>44</b> | 0.0391634  | 0.02495446 | <b>105</b> | 0.70317374 | -0.01749521 | <b>166</b> | -0.09726166 | -0.02861536 |
| <b>45</b> | 0.02775793 | 0.02185866 | <b>106</b> | 0.72225504 | -0.01556413 | <b>167</b> | -0.09329191 | -0.02580765 |
| <b>46</b> | 0.01764862 | 0.01881686 | <b>107</b> | 0.73984726 | -0.01367875 | <b>168</b> | -0.08902221 | -0.0233934  |
| <b>47</b> | 0.00911981 | 0.01629776 | <b>108</b> | 0.7560723  | -0.01176101 | <b>169</b> | -0.08453751 | -0.02134741 |
| <b>48</b> | 0.00172067 | 0.01395302 | <b>109</b> | 0.77080231 | -0.00965038 | <b>170</b> | -0.0799915  | -0.01954446 |
| <b>49</b> | -0.0043636 | 0.01138536 | <b>110</b> | 0.78422754 | -0.00776962 | <b>171</b> | -0.07549708 | -0.01791091 |
| <b>50</b> | -0.0093649 | 0.00869389 | <b>111</b> | 0.79625119 | -0.00644067 | <b>172</b> | -0.07108988 | -0.01647123 |
| <b>51</b> | -0.013513  | 0.00611036 | <b>112</b> | 0.80705806 | -0.00546929 | <b>173</b> | -0.06680039 | -0.01525051 |
| <b>52</b> | -0.0166207 | 0.00371261 | <b>113</b> | 0.81658292 | -0.00488878 | <b>174</b> | -0.06270393 | -0.01416323 |
| <b>53</b> | -0.0190279 | 0.00152099 | <b>114</b> | 0.82500637 | -0.00473769 | <b>175</b> | -0.05890561 | -0.01304896 |
| <b>54</b> | -0.0209262 | -0.0004466 | <b>115</b> | 0.83228019 | -0.00513194 | <b>176</b> | -0.05548523 | -0.01180592 |
| <b>55</b> | -0.0223037 | -0.0021659 | <b>116</b> | 0.8385663  | -0.00530632 | <b>177</b> | -0.0524722  | -0.01045411 |
| <b>56</b> | -0.0231475 | -0.0036253 | <b>117</b> | 0.84384412 | -0.00466018 | <b>178</b> | -0.04984698 | -0.00913068 |
| <b>57</b> | -0.0236818 | -0.0048664 | <b>118</b> | 0.84821398 | -0.0035965  | <b>179</b> | -0.04759944 | -0.00793893 |
| <b>58</b> | -0.0240273 | -0.005912  | <b>119</b> | 0.85169857 | -0.00225805 | <b>180</b> | -0.04573196 | -0.00693957 |
| <b>59</b> | -0.0242311 | -0.0067695 | <b>120</b> | 0.8543604  | -0.0009469  | <b>181</b> | -0.04425522 | -0.00616082 |
| <b>60</b> | -0.0243251 | -0.0074401 | <b>121</b> | 0.85627227 | 0           | <b>182</b> | -0.04318366 | -0.00560953 |
| <b>61</b> | -0.0243449 | -0.007923  | <b>122</b> | 999.9      | 999.9       | <b>183</b> | -0.04253123 | -0.00528167 |

A4 priedas. Orlaivio L-39 sparno profilio su dviejų plyšių užsparniais koordinatės (305 taškai):

| Nr. | X          | Y          | Nr. | X          | Y           |
|-----|------------|------------|-----|------------|-------------|
| 1   | 0.9404541  | -0.0465301 | 154 | 0.29582251 | 0.05197682  |
| 2   | 0.94028284 | -0.0463055 | 155 | 0.26741825 | 0.05037778  |
| 3   | 0.94004591 | -0.0459945 | 156 | 0.23984629 | 0.04938594  |
| 4   | 0.93976361 | -0.0456201 | 157 | 0.21338264 | 0.04792393  |
| 5   | 0.93943939 | -0.0451854 | 158 | 0.18807885 | 0.04597762  |
| 6   | 0.93904943 | -0.0446597 | 159 | 0.16405237 | 0.04364842  |
| 7   | 0.93857791 | -0.0440227 | 160 | 0.14154451 | 0.0411589   |
| 8   | 0.93802729 | -0.043284  | 161 | 0.12046369 | 0.03840111  |
| 9   | 0.93738957 | -0.0424423 | 162 | 0.1009859  | 0.0353357   |
| 10  | 0.93665847 | -0.0415089 | 163 | 0.083154   | 0.03247782  |
| 11  | 0.93581166 | -0.0404891 | 164 | 0.06684121 | 0.02987465  |
| 12  | 0.93484627 | -0.0394003 | 165 | 0.05228931 | 0.02748137  |
| 13  | 0.93373755 | -0.038258  | 166 | 0.0391634  | 0.02495446  |
| 14  | 0.93249129 | -0.0370609 | 167 | 0.02775793 | 0.02185866  |
| 15  | 0.93109323 | -0.0358129 | 168 | 0.01764862 | 0.01881686  |
| 16  | 0.92954761 | -0.0345096 | 169 | 0.00911981 | 0.01629776  |
| 17  | 0.92785552 | -0.0331481 | 170 | 0.00172067 | 0.01395302  |
| 18  | 0.92601935 | -0.0317122 | 171 | -0.0043636 | 0.01138536  |
| 19  | 0.92405747 | -0.0301954 | 172 | -0.0093649 | 0.00869389  |
| 20  | 0.92197065 | -0.028575  | 173 | -0.013513  | 0.00611036  |
| 21  | 0.91977271 | -0.0268708 | 174 | -0.0166207 | 0.00371261  |
| 22  | 0.9174617  | -0.0250929 | 175 | -0.0190279 | 0.00152099  |
| 23  | 0.91504019 | -0.0232661 | 176 | -0.0209262 | -0.00044661 |
| 24  | 0.9125203  | -0.0214096 | 177 | -0.0223037 | -0.0021659  |
| 25  | 0.90990336 | -0.0195443 | 178 | -0.0231475 | -0.00362534 |
| 26  | 0.90721285 | -0.0176729 | 179 | -0.0236818 | -0.0048664  |
| 27  | 0.90446797 | -0.0157961 | 180 | -0.0240273 | -0.00591204 |
| 28  | 0.90168937 | -0.0139183 | 181 | -0.0242311 | -0.0067695  |
| 29  | 0.89889057 | -0.0120642 | 182 | -0.0243251 | -0.00744014 |
| 30  | 0.89607706 | -0.0102667 | 183 | -0.0243449 | -0.00792301 |
| 31  | 0.89324657 | -0.008599  | 184 | -0.0243164 | -0.00840708 |
| 32  | 0.89040542 | -0.0070848 | 185 | -0.0242102 | -0.00908276 |
| 33  | 0.88756672 | -0.0057465 | 186 | -0.0239905 | -0.00995104 |
| 34  | 0.88476941 | -0.0045658 | 187 | -0.0236255 | -0.01101525 |
| 35  | 0.88203778 | -0.0034962 | 188 | -0.0230681 | -0.01228611 |
| 36  | 0.87941031 | -0.0025328 | 189 | -0.022199  | -0.01379521 |
| 37  | 0.87688778 | -0.0016833 | 190 | -0.0207936 | -0.01559928 |
| 38  | 0.87446849 | -0.0009737 | 191 | -0.0188673 | -0.01767301 |
| 39  | 0.87214227 | -0.0004911 | 192 | -0.0164284 | -0.01995597 |
| 40  | 0.86990531 | -0.0001908 | 193 | -0.0132499 | -0.02235041 |
| 41  | 0.8677848  | -0.0001146 | 194 | -0.0090529 | -0.0247646  |
| 42  | 0.86577814 | -0.0001639 | 195 | -0.0040263 | -0.02723072 |
| 43  | 0.86393586 | -0.0003411 | 196 | 0.00212376 | -0.02968678 |

A4 lentelės tęsinys kitame puslapyje

|    |            |            |     |            |             |
|----|------------|------------|-----|------------|-------------|
| 44 | 0.86223301 | -0.0005932 | 197 | 0.00955421 | -0.03213314 |
| 45 | 0.86068995 | -0.0009066 | 198 | 0.01813231 | -0.03478195 |
| 46 | 0.85931869 | -0.0012748 | 199 | 0.0282964  | -0.03781406 |
| 47 | 0.858084   | -0.0016521 | 200 | 0.03975572 | -0.0408908  |
| 48 | 0.85702851 | -0.0020285 | 201 | 0.05292943 | -0.04359368 |
| 49 | 0.85611393 | -0.0024169 | 202 | 0.06752685 | -0.04616306 |
| 50 | 0.85528428 | -0.0028637 | 203 | 0.08388472 | -0.04872755 |
| 51 | 0.85453134 | -0.0034434 | 204 | 0.10176826 | -0.05150965 |
| 52 | 0.85387113 | -0.0040361 | 205 | 0.12130049 | -0.0545427  |
| 53 | 0.85336813 | -0.0044737 | 206 | 0.14243094 | -0.05732925 |
| 54 | 0.85302415 | -0.0047518 | 207 | 0.16498275 | -0.0598228  |
| 55 | 0.8527016  | -0.0050986 | 208 | 0.1890524  | -0.06198868 |
| 56 | 0.85230618 | -0.0057232 | 209 | 0.21438629 | -0.06379627 |
| 57 | 0.85188327 | -0.0065109 | 210 | 0.24087878 | -0.06529822 |
| 58 | 0.85159594 | -0.0070539 | 211 | 0.26847398 | -0.0667086  |
| 59 | 0.85151734 | -0.0071733 | 212 | 0.29690003 | -0.06802205 |
| 60 | 0.85164196 | -0.0068726 | 213 | 0.32601229 | -0.06897745 |
| 61 | 0.85189081 | -0.0063175 | 214 | 0.35565773 | -0.06886356 |
| 62 | 0.85137197 | -0.0075378 | 215 | 0.38558633 | -0.06832067 |
| 63 | 0.85138821 | -0.0075283 | 216 | 0.41562799 | -0.06759209 |
| 64 | 0.85142528 | -0.0074961 | 217 | 0.4455911  | -0.06654311 |
| 65 | 0.85148746 | -0.0074427 | 218 | 0.4752542  | -0.06448067 |
| 66 | 0.85157345 | -0.0073866 | 219 | 0.50445649 | -0.0615827  |
| 67 | 0.8516738  | -0.0073735 | 220 | 0.53300139 | -0.05882624 |
| 68 | 0.85176683 | -0.0074977 | 221 | 0.5607465  | -0.05661171 |
| 69 | 0.85182903 | -0.0078633 | 222 | 0.58756024 | -0.05399999 |
| 70 | 0.85189325 | -0.0083715 | 223 | 0.61322225 | -0.04787991 |
| 71 | 0.85203038 | -0.0089356 | 224 | 0.63766388 | -0.03635167 |
| 72 | 0.8522502  | -0.0095397 | 225 | 0.66082858 | -0.0235109  |
| 73 | 0.85255177 | -0.010207  | 226 | 0.68268002 | -0.0194338  |
| 74 | 0.852964   | -0.0109589 | 227 | 0.70317374 | -0.01749521 |
| 75 | 0.85346819 | -0.0117786 | 228 | 0.72225504 | -0.01556413 |
| 76 | 0.85411688 | -0.0126721 | 229 | 0.73984726 | -0.01367875 |
| 77 | 0.85489355 | -0.0136286 | 230 | 0.7560723  | -0.01176101 |
| 78 | 0.85582438 | -0.01464   | 231 | 0.77080231 | -0.00965038 |
| 79 | 0.85692712 | -0.0156972 | 232 | 0.78422754 | -0.00776962 |
| 80 | 0.85820655 | -0.0167667 | 233 | 0.79625119 | -0.00644067 |
| 81 | 0.85969691 | -0.0178223 | 234 | 0.80705806 | -0.00546929 |
| 82 | 0.86140365 | -0.0188239 | 235 | 0.81658292 | -0.00488878 |
| 83 | 0.86333946 | -0.0197448 | 236 | 0.82500637 | -0.00473769 |
| 84 | 0.86553364 | -0.0205343 | 237 | 0.83228019 | -0.00513194 |
| 85 | 0.8679583  | -0.021193  | 238 | 0.8385663  | -0.00530632 |
| 86 | 0.87064023 | -0.0216834 | 239 | 0.84384412 | -0.00466018 |
| 87 | 0.87354031 | -0.0220424 | 240 | 0.84821398 | -0.0035965  |
| 88 | 0.87661504 | -0.0223204 | 241 | 0.85169857 | -0.00225805 |

A4 lentelės tęsinys kitame puslapyje

|     |            |            |     |            |             |
|-----|------------|------------|-----|------------|-------------|
| 89  | 0.87982949 | -0.0225801 | 242 | 0.8543604  | -0.0009469  |
| 90  | 0.88311645 | -0.0229145 | 243 | 0.85627227 | 0           |
| 91  | 0.88642979 | -0.0233684 | 244 | 999.9      | 999.9       |
| 92  | 0.88972785 | -0.0239971 | 245 | 1.08053952 | -0.13407217 |
| 93  | 0.89295701 | -0.0248644 | 246 | 1.07962323 | -0.1331663  |
| 94  | 0.89610971 | -0.0259264 | 247 | 1.07811501 | -0.13167017 |
| 95  | 0.8991796  | -0.0271522 | 248 | 1.07602896 | -0.12959854 |
| 96  | 0.90217167 | -0.0284746 | 249 | 1.07337663 | -0.12697978 |
| 97  | 0.90508873 | -0.0298391 | 250 | 1.07016036 | -0.1238621  |
| 98  | 0.90792    | -0.0312253 | 251 | 1.0663798  | -0.12030787 |
| 99  | 0.91064094 | -0.0326342 | 252 | 1.06204618 | -0.11638083 |
| 100 | 0.91324273 | -0.034059  | 253 | 1.05717486 | -0.11215274 |
| 101 | 0.9157098  | -0.0354932 | 254 | 1.0517843  | -0.10770396 |
| 102 | 0.91804321 | -0.036897  | 255 | 1.04590798 | -0.10310555 |
| 103 | 0.92026041 | -0.0382293 | 256 | 1.03961771 | -0.09838503 |
| 104 | 0.9223649  | -0.0394389 | 257 | 1.03300457 | -0.09355194 |
| 105 | 0.92436812 | -0.0405024 | 258 | 1.02615678 | -0.0886233  |
| 106 | 0.92626959 | -0.041417  | 259 | 1.01915059 | -0.08363306 |
| 107 | 0.92806114 | -0.0421746 | 260 | 1.01204817 | -0.07863621 |
| 108 | 0.92973825 | -0.0428213 | 261 | 1.00485631 | -0.07376213 |
| 109 | 0.93128027 | -0.0433678 | 262 | 0.9975734  | -0.06916081 |
| 110 | 0.93269411 | -0.0438472 | 263 | 0.99022721 | -0.06501149 |
| 111 | 0.93396739 | -0.0442631 | 264 | 0.98286556 | -0.06146844 |
| 112 | 0.935113   | -0.0446325 | 265 | 0.97558852 | -0.05845476 |
| 113 | 0.93612427 | -0.044957  | 266 | 0.96852168 | -0.05588103 |
| 114 | 0.93701716 | -0.045245  | 267 | 0.96182661 | -0.05403607 |
| 115 | 0.93778735 | -0.0454966 | 268 | 0.95557059 | -0.05308961 |
| 116 | 0.93845222 | -0.0457161 | 269 | 0.94955471 | -0.05269877 |
| 117 | 0.9390095  | -0.0459036 | 270 | 0.94407944 | -0.05299691 |
| 118 | 0.93947133 | -0.046061  | 271 | 0.94021082 | -0.05491703 |
| 119 | 0.93983831 | -0.0461883 | 272 | 0.938249   | -0.05818033 |
| 120 | 0.94011936 | -0.0462868 | 273 | 0.93773195 | -0.06120636 |
| 121 | 0.9403214  | -0.0463577 | 274 | 0.93801422 | -0.06328093 |
| 122 | 999.9      | 999.9      | 275 | 0.93844873 | -0.06443955 |
| 123 | 0.85627227 | 0          | 276 | 0.93899284 | -0.06543003 |
| 124 | 0.85434374 | 0.00117576 | 277 | 0.94015657 | -0.06694793 |
| 125 | 0.85165691 | 0.00278603 | 278 | 0.94219473 | -0.06884029 |
| 126 | 0.84814191 | 0.00423966 | 279 | 0.94521944 | -0.07095518 |
| 127 | 0.84375556 | 0.00524331 | 280 | 0.94901117 | -0.07318917 |
| 128 | 0.83846172 | 0.00609441 | 281 | 0.95324021 | -0.07548859 |
| 129 | 0.83217314 | 0.00693195 | 282 | 0.95789172 | -0.07782791 |
| 130 | 0.8248928  | 0.00790161 | 283 | 0.96306071 | -0.08025114 |
| 131 | 0.8164561  | 0.00918036 | 284 | 0.96882215 | -0.08283867 |
| 132 | 0.80691565 | 0.01064929 | 285 | 0.97503469 | -0.08563592 |
| 133 | 0.79608258 | 0.01216193 | 286 | 0.98151268 | -0.08866685 |

A4 lentelės tęsinys kitame puslapyje

A4 lentelės pabaiga

|            |            |            |            |            |             |
|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>134</b> | 0.78403692 | 0.01368894 | <b>287</b> | 0.98825776 | -0.09175279 |
| <b>135</b> | 0.77057878 | 0.01514883 | <b>288</b> | 0.99532941 | -0.09467016 |
| <b>136</b> | 0.7558129  | 0.01677131 | <b>289</b> | 1.00253232 | -0.09767914 |
| <b>137</b> | 0.73955844 | 0.01885286 | <b>290</b> | 1.00959072 | -0.10117887 |
| <b>138</b> | 0.7219145  | 0.0214486  | <b>291</b> | 1.01650028 | -0.10497699 |
| <b>139</b> | 0.70280443 | 0.02455838 | <b>292</b> | 1.02332927 | -0.10873498 |
| <b>140</b> | 0.68225151 | 0.02751455 | <b>293</b> | 1.03005113 | -0.11239488 |
| <b>141</b> | 0.6603471  | 0.03029131 | <b>294</b> | 1.03659975 | -0.11598976 |
| <b>142</b> | 0.63703191 | 0.03302842 | <b>295</b> | 1.04286886 | -0.11943389 |
| <b>143</b> | 0.61247498 | 0.03561907 | <b>296</b> | 1.04874088 | -0.12259372 |
| <b>144</b> | 0.58672879 | 0.03804753 | <b>297</b> | 1.05418454 | -0.12553646 |
| <b>145</b> | 0.55987043 | 0.04056486 | <b>298</b> | 1.05925814 | -0.12853625 |
| <b>146</b> | 0.53208838 | 0.04309263 | <b>299</b> | 1.06398119 | -0.13171732 |
| <b>147</b> | 0.50348947 | 0.04564951 | <b>300</b> | 1.06828133 | -0.13447799 |
| <b>148</b> | 0.47423722 | 0.04858539 | <b>301</b> | 1.07204312 | -0.13600508 |
| <b>149</b> | 0.44453728 | 0.05060204 | <b>302</b> | 1.07518674 | -0.13614744 |
| <b>150</b> | 0.41455919 | 0.05114172 | <b>303</b> | 1.07766465 | -0.13535438 |
| <b>151</b> | 0.38450778 | 0.05172691 | <b>304</b> | 1.0794541  | -0.13454026 |
| <b>152</b> | 0.35456174 | 0.05275    | <b>305</b> | 1.08053952 | -0.13407217 |
| <b>153</b> | 0.32490907 | 0.05357218 | <b>306</b> |            |             |