



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminių charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Deividas Čelkys
Projekto autorius

Doc. Sigitas Kilikevičius
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminių charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Deividas Čelkys

Projekto autorius

Doc. Sigitas Kilikevičius

Vadovas

Doc. Robertas Keršys

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Deividas Čelkys

Sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminių charakteristikų tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektualios nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Deividas Čelkys

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Deividas Čelkys

1. Projekto tema

Sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminių charakteristikų tyrimas

(Lietuvių kalba)

Research on Tiltwing Aircraft Aerodynamic Properties

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: sukurti sparno su ir be propelerių skaitinį aerodinaminį modelį ir nustatyti aerodinamines charakteristikas bei palyginti rezultatus su eksperimentiniu būdu gautais duomenimis.

Uždaviniai:

1. Išnagrinėti skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės pavyzdžius panašaus tipo orlaiviams;
2. Suprojektuoti trijų menčių propelerio 3D modelį atitinkantį realius propelerio matmenis;
3. Sudaryti propelerio skaitinį aerodinaminį modelį ir ištirti propelerio kuriamą oro srautą;
4. Sukurti viso sparno skaitinį aerodinaminį modelį ir nustatyti aerodinamines charakteristikas įvertinus propelerių kuriamą oro srautą.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

1. Propelerių kuriama trauka turi būti ne mažesnė kaip 0.5 N;
2. Sparno keliamaoji jėga turi būti ne mažesnė kaip 3 N oro srauto greičiui esant 20 m/s ir atakos kampui esant 11° ;
3. Aerodinaminio pasipriešinimo jėga turi būti mažesnė kaip 2 N oro srauto greičiui esant 20 m/s ir atakos kampui esant 11° .

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius	Deividas Čelkys (Vardas, Pavardė)	2023-02-14 (Data)
Projekto vadovas	Doc. Sigitas Kilikevičius (Vardas, Pavardė)	2023-02-14 (Data)
Krypties studijų programų vadovas	Doc. Saulius Japertas (Vardas, Pavardė)	2023-02-14 (Data)

Čelkys, Deividas. Sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminių charakteristikų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Sigita Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: miesto oro transportas, orlaivis su pasukamu sparnu, skaičiuojamoji fluido dinamika.

Kaunas, 2023. 48 p.

Santrauka

Projekte siekiama apžvelgti skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės principus bei nustatyti sparno su pasukimo mechanizmu aerodinamines charakteristikas naudojant programą „SolidWorks Flow Simulation“. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės būdu nustatytas aerodinamines charakteristikas siekiama palyginti su eksperimentiniu būdu aerodinaminiam vamzdyje gautais duomenimis.

„SolidWorks“ programa sukurta erdvinis sparno modelis, kuris susideda iš centrinės dalies ir šoninių sparnų. Minėto modelio sparno mostas – 260 mm. Siekiant išsiaiškinti propelerių kuriamo oro srauto įtaką aerodinaminėms charakteristikoms – taip pat suprojektuojamas ir erdvinis realių matmenų propelerio modelis, kurio skersmuo – 78 mm. „SolidWorks Flow Simulation“ programoje sukuriama viso sparno bei propelerio matematiniai modeliai parenkant globalųjį ir lokalųjį baigtinių elementų tinklą. Kadangi skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės metu yra naudojama daug kompiuterio resursų, siekiama nustatyti tinkamus baigtinių elementų tinklo parametrus – atliekama tinklo jautrumo analizė. Šios analizės metu parenkamas optimaliausias skaičiavimo laikas atsižvelgiant į gautų rezultatų tikslumą. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė išskiriama į tris pagrindinius etapus: propelerio, sparno su nuimtais propeleriais ir sparno su uždėtais propeleriais. Atliekant propelerio analizę yra sukuriama besisukantis aplink stacionarų propelerio modelį oro srauto domenas, kuriuo imituojama propelerio kuriama trauka. Atliekant viso sparno analizę – jo erdvinis modelis patalpinamas į oro srauto domeną, kurio matmenys parenkami tokie pat, kaip ir aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros, kuriame minėtas sparnas buvo ištirtas. Norint įvertinti propelerių kuriamo oro srauto įtaką sparno aerodinaminėms charakteristikoms – sparnas patalpinamas į minėtą oro srauto domeną, o propeleriams sukuriama besisukantys oro srauto domenai. Atliekant viso sparno skaičiuojamosios fluido dinamikos analizę yra parenkamas 0° ir 15° centrinės dalies atakos kampas bei keičiamas šoninių sparnų pasisukimo kampas 5° žingsniu intervale $-5^\circ \div 100^\circ$.

Atlikus skaičiuojamosios fluido dinamikos analizę minėtoms konfigūracijoms, rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniu būdu gautais duomenimis. Gautas iki 31,96 % skirtumas lyginant keliamosios jėgos reikšmes ir iki 40,66 % skirtumas lyginant aerodinaminio pasipriešinimo jėgos reikšmes.

Čelkys, Deividas. Research on Tiltwing Aerodynamic Properties. Masters's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Sigita Kilikevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: urban air mobility, tiltwing aircraft, computational fluid dynamics.

Kaunas, 2023. 48 pages.

Summary

The scope of this project is to review computational fluid dynamics analysis principles and perform such analysis on a tiltwing to determine its aerodynamic properties using “SolidWorks Flow Simulation” software. Results from afore-mentioned analysis are going to be compared with an experimental data acquired from the tests in the wind tunnel.

For such analysis a 3D model of tiltwing was designed by using computer-aided design software “SolidWorks”. The model consists of three main parts – central part and two wings on both sides. Wingspan of the model – 260 mm. To determine propellers’ influence on the tiltwing aerodynamic properties, a 3D model of a three-blade propeller with a diameter of 78 mm was designed. In a “SolidWorks Flow Simulation” environment a global and a local meshes are created for both the propeller and the tiltwing. As the computational fluid dynamics analysis is hardware demanding, a sensitivity analysis of the mesh is required to determine the best computational time with respect to results accuracy. Computational fluid dynamics analysis done in this project can be split in three main configurations: propeller analysis, tiltwing without propeller analysis and tiltwing with propellers analysis. For the analysis of the propeller there is a rotating air region modelled around the part, which simulates the thrust force created by the propeller. For the tiltwing analysis, the 3D model is placed in a computational domain which imitates the test section of a wind tunnel where a physical model of the tiltwing was tested. For the third configuration the tiltwing 3D model in computational domain is placed in a same manner and for both propellers there are corresponding rotating air regions modelled. This setup allows to determine propellers’ influence on tiltwing aerodynamic properties. Besides the afore-mentioned configurations there were other parameters that changed during the analysis. Angle of attack for the central part was either 0° or 15° and angle of the side wings was changed in the range from -5° to 100° with an increment of 5°.

The data acquired from the computational fluid dynamics analysis was then compared with the experimental data from wind tunnel tests. The maximum difference for lift force values was 31,96 % and for aerodynamic drag force values the difference reached 40,66 %.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas.....	12
Įvadas	13
1. Teorinė dalis.....	14
1.1. Reinoldso skaičius	14
1.2. Laminarinis oro srautas	14
1.3. Turbulentinis oro srautas	15
1.4. Pasienio sluoksnis.....	16
1.5. Aerodinaminės charakteristikoms tirti naudojami metodai.....	17
1.5.1. Skaičiuojamoji fluído dinamika	17
1.5.2. Eksperimentiniai tyrimai aerodinaminiam vamzdyje	18
1.5.3. Analitiniai metodai	20
1.5.4. Aerodinaminių charakteristikų nustatymas realaus skrydžio metu	20
1.6. Panašaus tipo orlaivių aerodinaminių charakteristikų nustatymo pavyzdys	21
2. Projektinė dalis	23
2.1. Tyrimų stendo su pasukimo mechanizmu projektavimas NASA Ames tyrimų centrui	23
2.2. Sparno su pasukimo mechanizmu projektavimas ir gamyba	24
2.3. Sparno su pasukimo mechanizmu gamyba.....	26
3. Tiriamoji dalis.....	28
3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudoto aerodinaminio vamzdžio aprašymas	28
3.2. Eksperimentiniai tyrimai aerodinaminiam vamzdyje	29
3.2.1. Eksperimentiniai tyrimai su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą 30	
3.2.2. Eksperimentiniai tyrimai keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą.....	31
3.2.3. Eksperimentiniai tyrimai su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą, kai centrinė sparno dalis pasukta 15°	32
3.2.4. Eksperimentiniai tyrimai propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą, kai centrinė sparno dalis pasukta 15° ir propeleriai generuoja traukos jėgą	33
3.3. Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė	34
3.3.1. Oro srauto domeno aprašymas	34
3.3.2. Baigtinių elementų tinklėlio jautrumo analizė	34
3.3.3. Propelerio modeliavimas	35
3.3.4. Propelerio aerodinaminių charakteristikų nustatymas.....	36
3.3.5. Sparno su nuimtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė.....	38
3.3.6. Sparno su uždėtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė	39
3.4. Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės rezultatai	40
3.4.1. Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės kraštinės sąlygos.....	40
3.4.2. Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą	41
3.4.3. Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą...	42
3.4.4. Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	43

3.4.5. Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu ir propeleriai generuoja traukos jėgą.....	44
3.5. Rezultatų apibendrinimas	44
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Stendo matmenys ir charakteristikos	23
2 lentelė. AEROLAB aerodinaminio vamzdžio charakteristikos [28].....	28
3 lentelė. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės domeno matmenys	34
4 lentelė. Tiriamųjų objektų matematinių modelių baigtinių elementų tinklelio parametrai.....	35
5 lentelė. Projektuojamo propelerio parametrai	35
6 lentelė. Propelerio skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės kraštinės sąlygos.....	36
7 lentelė. Viso sparno skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės kraštinės sąlygos	38
8 lentelė. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizėms naudotos kraštinės sąlygos	41
9 lentelė. Didžiausias keliamosios jėgos reikšmių neatitikimas pagal modelio konfigūraciją procentais.....	45
10 lentelė. Didžiausias aerodinaminio pasipriešinimo jėgos rezultatų neatitikimas pagal konfigūraciją procentais	45

Paveikslų sąrašas

1 pav. Oro srauto tekėjimo bei virsmo vizualizacija [9]	15
2 pav. Pasienio sluoksnio greičių epiūra [10]	16
3 pav. Laminarinio pasienio sluoksnio virsmas trubulentiniu [10].....	16
4 pav. Laminarinio ir trubulentinio pasienio sluoksnio epiūros [10]	17
5 pav. Atvirojo ciklo aerodinaminis vamzdis [16].....	19
6 pav. Uždarąjo ciklo aerodinaminio vamzdžio sandara [16].....	19
7 pav. Tiriamojo orlaivio erdvinis modelis ir skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės domenai [24].....	21
8 pav. Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė skirtingų šoninių sparnų pasisukimo kampų [24]	22
9 pav. Tyrimų stendas su sparnų pasukimo mechanizmu	23
10 pav. Erdvinis sparno su valdymo komponentais modelis	24
11 pav. Sparno su pasukimo mechanizmu kinematinė schema	25
12 pav. Didžiausios aerodinaminės jėgos apkrovos sparnui schema.....	26
13 pav. Didžiausios aerodinaminio pasipriešinimo jėgos apkrovos sparnui schema.....	26
14 pav. Mechanškai neapdirbtas centrinės dalies dangtelis	27
15 pav. Centrinės dalies dangtelis po mechaninio apdirbimo	27
16 pav. KTU laboratorijoje esantis „Aerolab 12 x 12“ aerodinaminis vamzdis	28
17 pav. Aerodinaminiam vamzdyje įtvirtintas sparnas su pasukimo mechanizmu.....	29
18 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą.....	30
19 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą.....	30
20 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai	31
21 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai	31
22 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	32
23 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	32
24 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelerių generuojamai traukos jėgai bei centrinei daliai pasuktai 15° kampu.....	33
25 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelerių generuojamai traukos jėgai bei centrinei daliai pasuktai 15° kampu	33
26 pav. Sparno modelis skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės domene.....	34
27 pav. Sumodeliuotas propeleris	35
28 pav. Propelerio baigtinių elementų tinklėlis.....	36
29 pav. Propelerio skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė	37
30 pav. Sparno su nuimtais propeleriais 3D modelis.....	38
31 pav. Sparno su nuimtais propeleriais lokalus baigtinių elementų tinklėlis	39
32 pav. Sparno su nuimtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė	39
33 pav. Domenas, imituojantis kairiojo propelerio generuojamą traukos jėgą.....	40
34 pav. Domenas, imituojantis kairiojo propelerio generuojamą traukos jėgą.....	40

35 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą.....	41
36 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą.....	41
37 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai	42
38 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai	42
39 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	43
40 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	43
41 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu.....	44
42 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelerių generuojamai traukos jėgai ir centrinei daliai pasuktai 15° kampu	44

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CFD - Skaičiuojamoji fluído dinamika (angl. Computational Fluid Dynamics);

Fluidas – fizikoje naudojamas terminas, kuris apima skysčius ir dujas;

NASA – JAV Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija.

Terminai:

Miesto oro transportas – tai besivystančios transporto sistemos koncepcija, kurioje numatyta naudoti mažų gabaritinių matmenų, vertikaliai pakylančius ir nusileidžiančius orlaivius. Pagrindinė šios koncepcijos idėja – sumažinti kamščius didžiuosiuose miestuose.

Ivadas

Orlaiviai su pasukamu sparnu apjungia sraigtašparnio bei įprastinio lėktuvo savybes. Jie geba pakilti bei nusileisti vertikalčiai ir skristi įprastiniu, horizontalaus skrydžio režimu. Tokio tipo orlaivių aerodinaminės charakteristikos yra tarpe tarp sraigtašparnio bei įprastinio lėktuvo aerodinaminių charakteristikų. Orlaiviui esant sraigtašparnio režime, propelerių kuriamos traukos jėgos pagalba jis geba pakilti bei uodegoje esančiu propeleriu koreguoti kryptį kaip sraigtašparnis, o perėjus į horizontalų skrydžio režimą – išnaudoti sparnų keliamąją jėgą. Didžiausias tokio tipo orlaivių privalumas – apjungti sraigtašparnio bei įprastinio lėktuvo savybes.

Orlaiviai su pasukamu sparnu turi didelį pritaikomumą miesto oro transporto sistemos koncepcijoje. Miesto oro transportas – tai tokia transporto koncepcija, kurioje planuojami naudoti elektriniai arba hibridiniai, nedideli, gebantys vertikalčiai pakilti bei nusileisti, orlaiviai. Šių orlaivių pagalba būtų atliekami keleivių ir krovinių transportavimai bei jų panaudojimas skubiosios medicinos pagalbos tikslais. Tokio tipo orlaiviai yra ypatingai pranašūs dideliuose miestuose, kuriuose spūsčių problema itin opi. Dėl šio tipo orlaivių gebėjimo pakilti ir nusileisti vertikalčiai – nereikia įrengti įprastinių orlaivių pakilimų takų, užtenka įrengti sraigtašparnio tipo pakilimo aikšteles, kurios dažnai yra įrengiamos ant daugiaaukščių pastatų namų. Ši transporto koncepcija yra tik vystymo lygmeny, tačiau dėl anksčiau minėtų ypatumų, gali prisidėti prie įprastinio transporto spūsčių mažinimo.

Kadangi ši transporto sistema yra vystoma, yra daugybė sričių, kurios turi būti ištirtos siekiant įteisinti šią transporto sistemą. Turi būti įrengta tinkama infrastruktūra, nustatyti reglamentai šioje sistemoje planuojamiems naudoti orlaiviams bei ištirtos šių orlaivių aerodinaminės charakteristikos. Todėl siekiant prisidėti prie šios transporto sistemos vystymo buvo išsikeltas tikslas bei uždaviniai:

Tikslas: sukurti sparno su ir be propelerių skaitinį aerodinaminį modelį ir nustatyti aerodinamines charakteristikas bei palyginti rezultatus su eksperimentiniu būdu gautais duomenimis.

Uždaviniai:

1. Išnagrinėti skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės pavyzdžius panašaus tipo orlaiviams;
2. Suprojektuoti trijų menčių propelerio erdvinį modelį atitinkantį realius propelerio matmenis;
3. Sudaryti propelerio skaitinį aerodinaminį modelį ir ištirti propelerio kuriamą oro srautą;
4. Sukurti viso sparno skaitinį aerodinaminį modelį ir nustatyti aerodinamines charakteristikas įvertinus propelerių kuriamą oro srautą.

Siekiant prisidėti prie šios transporto sistemos vystymo, buvo sukurtas, pagamintas bei KTU esančiame aerodinamiame vamzdyje ištirtas sparnas su pasukimo mechanizmu. Šiame baigiamajame projekte yra siekiama patikrinti eksperimentiniu būdu gautus duomenis atliekant skaičiuojamosios fluido dinamikos analizę. Atlikus aerodinaminių charakteristikų tyrimą bei rezultatų validaciją, gauti duomenis bus naudojami toliau vystant šio sparno dizainą iteraciniu modeliavimo būdu.

1. Teorinė dalis

1.1. Reinoldso skaičius

Reinoldso skaičius – tai bedimensis dydis, kuris apibrėžia inercinių ir klampiųjų jėgų priklausomybes fluide tėkmėje. Šis parametras apibrėžiamas kaip fluide tėkmės greičio ir kinematinės klampos santykis. Reinoldso skaičius gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [1]:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}; \quad (1)$$

čia Re – Reinoldso skaičius; ρ – fluide tankis; V – fluide tėkmės greitis; L – charakteringas aptekamo kūno ilgis; μ – fluide dinaminės klampos koeficientas.

Skaičiuojamosios fluide dinamikos analizėje Reinoldso skaičius yra vienas iš pagrindinių parametrų, kuris turi didelę įtaką fluide tėkmei ir apibrėžia metodą tinkamai analizei sudaryti. Reinoldso skaičius dažnai naudojamas klasifikuojant fluide tėkmę į laminarinę arba turbulentinę bei apibrėžiant fluide tėkmės parametrus, būdingus kiekvienai iš minėtų tėkmių [2].

Reinoldso skaičius taip pat didelę įtaką daro skaičiuojamosios fluide dinamikos analizei, nes pagal šį skaičių yra parenkami skaitiniai metodai ir turbulencijos modeliai. Pavyzdžiui esant laminarinei fluide tėkmei, gali būti naudojami paprastesni turbulencijos modeliai, o esant turbulentinei fluide tėkmei – sudėtingesni turbulencijos modeliai, kad būtų galima atlikti tikslesnę skaičiuojamosios fluide dinamikos analizę ir tinkamai įvertinti turbulentinės tėkmės įtaką aptekamam objektui [3].

Reinoldso skaičius taip pat gali būti naudojamas siekiant supaprastinti skaičiuojamosios fluide dinamikos analizę. Pavyzdžiui, kai kuriais atvejais, esant mažiems Reinoldso skaičiams, oro srautas gali būti vertinamas kaip nespūdas. Tačiau esant didesniems Reinoldso skaičiams, ši prielaida gali būti klaidinga, kai klampiųjų jėgų įtaka tampa svarbi [4].

1.2. Laminarinis oro srautas

Laminarinis oro srautas – tai tokio tipo srautas, kuriame fluidas teka plonais, tarpusavyje nesimaišančiais ir vienas kitam lygiagrečiais sluoksniais. Laminarinis oro srauto tekėjimas yra siejamas su mažu Reinoldso skaičiumi, kai dominuoja klampiosios jėgos inercinių jėgų atžvilgiu. Laminarinio srauto tėkmėje fluide dalelės juda kryptingai bei nuspėjamai. Tokio tipo srauto tekėjimas pasireiškia esant mažesniems oro srauto greičiams, fluidui aptekant plokštelę ar vyraujant klampiesiems fluidams, tokiems kaip alyva [5].

Laminariniam oro srauto tekėjimui būdingas Reinoldso skaičius, kuris yra mažesnis už 2300. Taip pat laminarinei tėkmei būdingas parametras – šlyties įtempiai, kurie nusakomi fluide tėkmės metu tiriamojo objekto paviršių veikiančios jėgos ir ploto vieneto santykiu. Šlyties įtempiai yra siejami su fluide greičio gradientu tiriamojo objekto paviršiuje ir gali būti apskaičiuoti naudojant Navjė-Stokso lygtis, kurios apibūdina fluide tėkmę. Laminarinei oro srauto tėkmei šlyties įtempiai gali būti apskaičiuojami pagal formulę [6]:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\delta V}{\delta y}; \quad (2)$$

čia τ – šlyties įtempiai; μ – fluído dinaminės klampos koeficientas; V – fluído tėkmės greitis; y – atstumas nuo tiriamojo objekto paviršiaus.

1.3. Turbulentinis oro srautas

Turbulentinis oro srautas – tai tokio tipo oro srautas, kuris pasireiškia, kai fluídos teka chaotiškai, nekryptingai bei yra būdingas oro srauto sluoksnių maišymasis. Turbulentinis oro srauto tekėjimas yra siejamas su didesniu Reinoldso skaičiumi, o inercinės jėgos dominuoja klampiųjų jėgų atžvilgiu. Turbulentiniame oro sraute fluído dalelės teka nekryptingai bei nenuspėjamai, tėkmė apibūdinama srauto svyravimais ir turbulencija. Turbulentinis srautas aptinkamas esant dideliui oro srauto greičiui, pavyzdžiui, srautui aptekant orlaivio sparną ar propelerio mentis. Taip pat tokio tipo srautas gali būti aptinkamas turbulentiškuose fluídouose, tokiuose kaip oras [22].

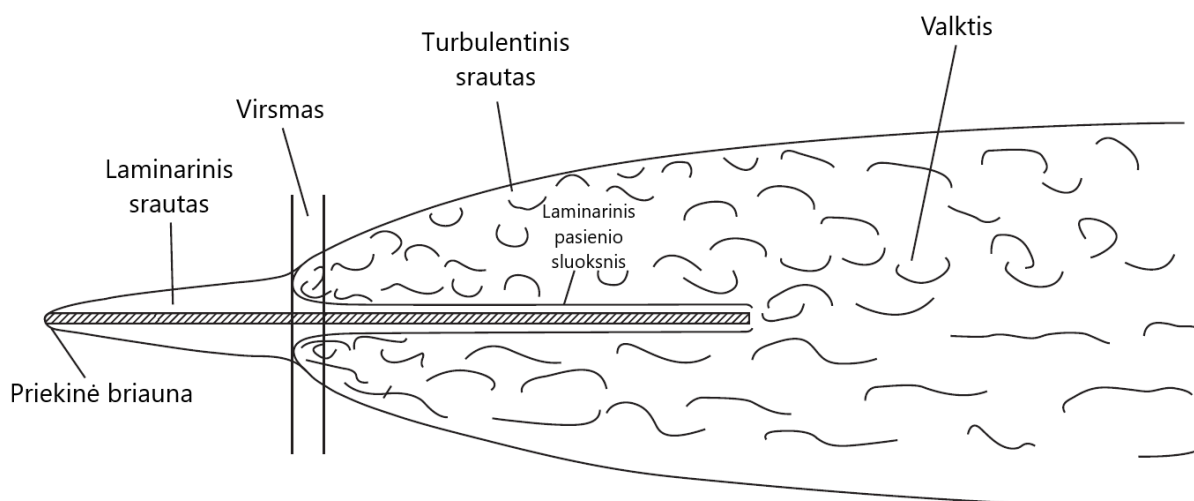
Turbulentiniam srautui būdingas Reinoldso skaičius, kuris yra didesnis nei 4000. Turbulentiniame sraute gana žymiai laike ir erdvėje kinta fluído greitis, o tėkmė apibūdinama skirtingo dydžio sūkuriais bei karmano grandinėlėmis [21].

Šlyties įtempiai turbulentiniame sraute yra sudėtingesni nei laminariniame ir negali būti apskaičiuojami naudojant paprastą formulę [20]. Todėl šlyties įtempiai yra modeliuojami naudojant turbulencijos modelius, kurie statistiškai apibūdina srauto tėkmę remiantis eksperimentiniu būdu bei skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės metu gautais duomenimis [7].

Vienas iš svarbiausių parametrų turbulentiniame oro sraute – turbulencijos kinetinė energija, kuri apibūdina fluído tėkmės svyravimų energiją. Turbulencijos kinetinė energija gali būti apskaičiuojama naudojant Reinoldso suvidurkintą Navjė-Stokso lygtį, kurios apibūdina fluído tėkmės vidurkį. Turbulencijos kinetinė energija gali būti apskaičiuojama pagal šią formulę [8]:

$$k = u'^2 + v'^2 + w'^2; \quad (3)$$

čia k – turbulencijos kinetinė energija; u – srauto svyravimo greitis x ašyje; v – srauto svyravimo greitis y ašyje; w – srauto svyravimo greitis z ašyje.



1 pav. Oro srauto tekėjimo bei virsmo vizualizacija [9]

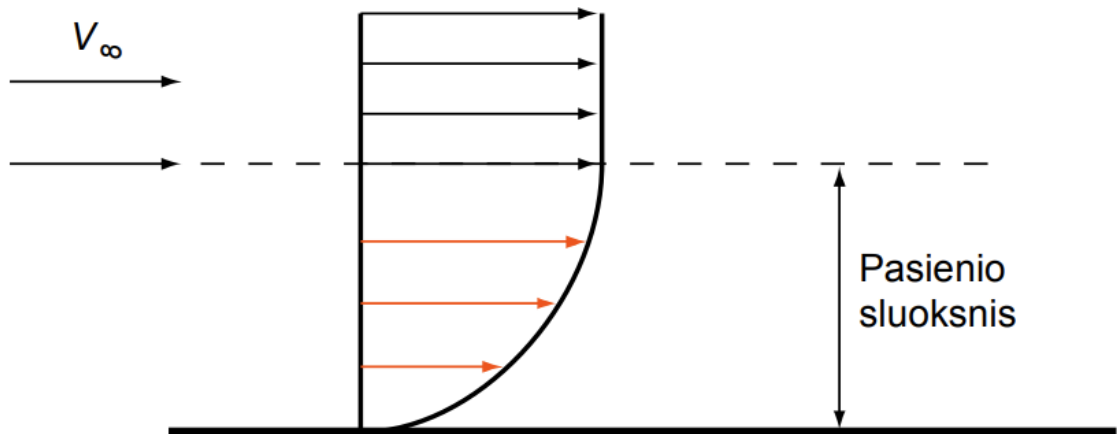
1.4. Pasienio sluoksnis

Pasienio sluoksnis – tai plonas fluido, aptekančio objektą, sluoksnis. Kadangi oro klampumas yra labai mažas, todėl jis pasireiškia tik labai ploname sluoksnyje prie pat fluidu aptekančio objekto paviršiaus [10]. Fluido greitis pačiame aptekamo objekto paviršiuje yra lygus nuliui.

Pasienio sluoksnis gali būti skirstomas į du pagrindinius tipus:

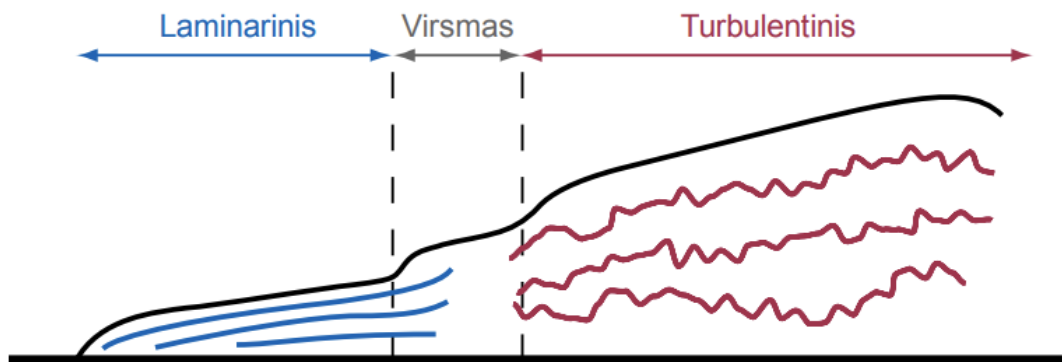
1. Laminarinis (sluoksniuotas);
2. Turbulentinis.

Laminariniame pasienio sluoksnyje oro srautas teka sluoksniais, yra stabilus ir srauto greičio profilis yra parabolės formos žr. 2 pav.



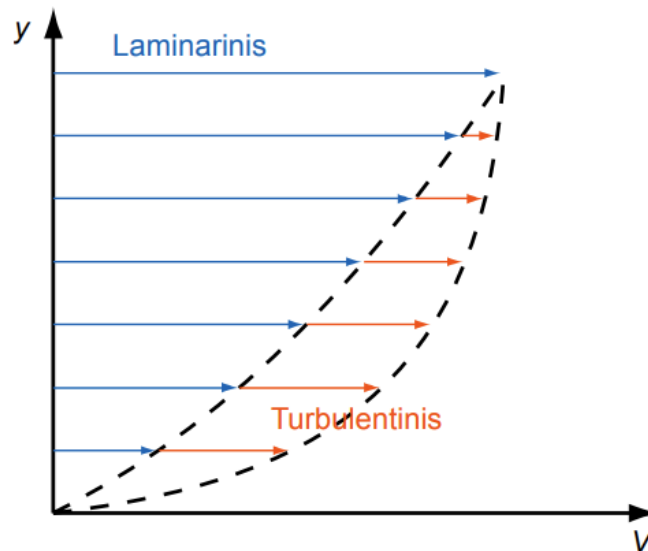
2 pav. Pasienio sluoksnio greičių epiūra [10]

Turbulentiniame pasienio sluoksnyje fluidas teka chaotiškai ir srautas nėra stabilus, vyksta maišymasis tarp atskirų srauto sluoksnių. Vieta, kurioje laminarinis pasienio sluoksnis virsta turbulentiniu yra vadinama laminarinio-turbulentinio virsmo vieta žr. 3 pav.



3 pav. Laminarinio pasienio sluoksnio virsmas trubulentiniu [10]

Laminarinio ir turbulentinio pasienio sluoksnio greičio kitimas prie aptekamo objekto paviršiaus yra skirtingas. Laminariniame pasienio sluoksnyje srauto greičio kitimas yra didesnis nei turbulentiniame. Kuo didesnis greičio kitimas, tuo didesnis pasipriešinimas, todėl iš epiūrų galima matyti, kad turbulentiniame paviršiaus sluoksnyje pasipriešinimas yra didesnis (žr. 4 pav.):



4 pav. Laminarinio ir turbulentinio pasienio sluoksnio epiūros [10]

Pasienio sluoksnio storis didėja fluidui tekant objekto paviršiumi ir yra matuojamas kaip atstumas nuo paviršiaus, kuriame fluido greitis siekia 99 % laisvojo oro srauto greičio. Tuomet pasienio sluoksnio storis laminariniam aptekėjimui gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [9]:

$$\delta = \frac{4,64 \cdot x}{\sqrt{Re_x}}; \quad (4)$$

Turbulentiniam aptekėjimui pasienio sluoksnio storis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [9]:

$$\delta = \frac{0,383 \cdot x}{Re_x^{\frac{1}{5}}}; \quad (5)$$

čia δ – pasienio sluoksnio storis; x – atstumas nuo priekinės tiriamojo objekto briaunos; Re_x – Reinoldso skaičius taške, kuris nuo priekinės briaunos nutolęs atstumu x .

Pasienio sluoksnis turi didelę įtaką aerodinaminėms objekto savybėms. Pavyzdžiui, kai oro srauto aptekamas objektas yra orlaivio sparnas ir vyrauja turbulentinis pasienio sluoksnis, susidaro didelis pasipriešinimas pasienio sluoksnyje, tai matoma ir anksčiau pateiktose epiūrose. Todėl projektuojant orlaivį bei jo dalis yra siekiama, kad kuo didesnėje paviršiaus dalyje vyrautų laminarinis pasienio sluoksnis.

1.5. Aerodinaminėms charakteristikoms tirti naudojami metodai

1.5.1. Skaičiuojamoji fluido dinamika

Skaičiuojamoji fluido dinamika (angl. Computational Fluid Dynamics) – tai objekto arba sistemos analizė, kuri apibrėžiama fluido tėkme, šilumos perdavimu ir cheminėmis reakcijomis. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė atliekama naudojant matematinį fizikinių reiškinių formulavimą bei skaitinius metodus [11].

Pirmiausia turime fluido tėkmės, aplink tiriamąjį objektą, uždavinį. Siekiant išspręsti šį uždavinį, reikia žinoti fluido fizikines savybes, tuomet naudojant matematinės lygtis aprašyti fluido tėkmę

aplink tiriamąjį objektą. Pagrindinės skaičiuojamosios fluído dinamikos analizėje naudojamos Navjė-Stokso matematinės lygtys [12].

Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė yra plačiai taikoma aviacijos srityje. Šio tipo analizė leidžia nustatyti įvairių objektų aerodinamines charakteristikas be eksperimentinių tyrimų. Tai yra naudinga tiriant didelių matmenų objektus, kai fizinis tokio objekto ištyrimas yra labai komplikotas arba neįmanomas. Didžiausias skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės privalumas – nedideli tyrimams ir tyrimų paruošimui reikalingi kaštai, nes analizei nėra reikalingas fizinis tiriamojo objekto modelis.

Tačiau be privalumų, skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė turi ir trūkumų: šio tipo analizė turi netikslumų ir skaičiavimo klaidų, kurios susijusios su fluído tėkmės prognozavimu. Netikslumus lemia neteisingas programinės įrangos naudojimas, kompiuterio apvalinimo, iteracinės konvergavimo, diskretizavimo bei programavimo klaidos. Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės rezultatų neatitikimui su eksperimentinio tyrimo duomenimis taip pat įtakos turi turbulencijos modeliavimas kompiuterinėje programoje. Yra atliekama daugybė turbulencijos modeliavimo bandymų, tačiau turbulencijos modeliai nėra iki galo suprasti, todėl analizės netikslumai išlieka [23]. Didžiausi analizės netikslumai vyrauja pasienio sluoksnyje, nes toje vietoje yra sunku modeliuoti tinkamą turbulencijos modelį [13].

Vieni iš svarbiausių ir didelę įtaką skaičiuojamosios fluído dinamikos analizėje turintys parametrai – oro srauto domeno ir baigtinių elementų tinklėlio dydis. Siekiant gauti tikslius analizės rezultatus, būtina sudaryti tinkamą baigtinių elementų tinklėlį bei oro srauto domeną. Oro srauto domeno forma ir dydis turi įtakos skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės tikslumui. Jeigu domenas per mažas, atsiranda rizika nustatyti ne visus fluído tėkmei būdingus reiškinius, dėl ko analizės rezultatai gali būti netikslūs. Esant per dideliame oro srauto domenui – atliekama papildomų nereikšmingų skaičiavimų, kompiuteris labiau apkraunamas ir išauga skaičiavimo laikas be žymių pokyčių analizės rezultatų tikslume. Tinkamo oro srauto domeno parinkimas yra svarbus siekiant užtikrinti skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės rezultatų tikslumą ir patikimumą bei atspindėti tikrą fluído tėkmę [14].

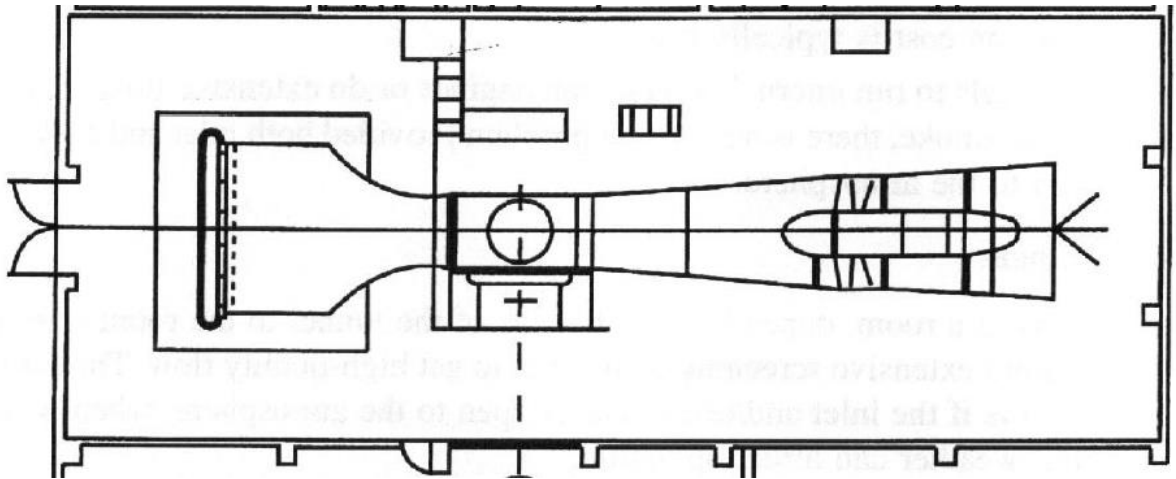
Oro srauto domeno forma turėtų būti parenkama taip, kad būtų galima užfiksuoti fluído tėkmės reiškinius norimoje tiriamojo objekto zonoje. Tarkime, jeigu yra analizuojamas fluído aptekėjimas aplink tam tikrą objektą, pavyzdžiui, orlaivio sparną, oro srauto domenas turėtų būti parenkamas taip, jog fluידas aptekėtų visą tiriamąjį objektą. Taip yra užtikrinami įvairūs, dėl fluído tėkmės aplink objektą pasireiškiantys veiksniai, tokie kaip: oro srauto atsiskyrimas, sūkurių ar vakties susidarymas. Tinkamas tokių reiškinių įvertinimas prieš sudarant oro srauto domeną yra būtinas, kad rezultatai būtų tikslūs [15].

1.5.2. Eksperimentiniai tyrimai aerodinaminiam vamzdyje

Aerodinaminis vamzdis – tai toks įrenginys, kuriame yra sukuriamas kontroliuojamas oro srautas ir jo pagalba nustatomos įvairių tiriamųjų objektų aerodinaminės charakteristikos. Yra begalė aerodinaminių vamzdžių tipų, tačiau dažniausiai jie skirstomi į du pagrindinius [16]:

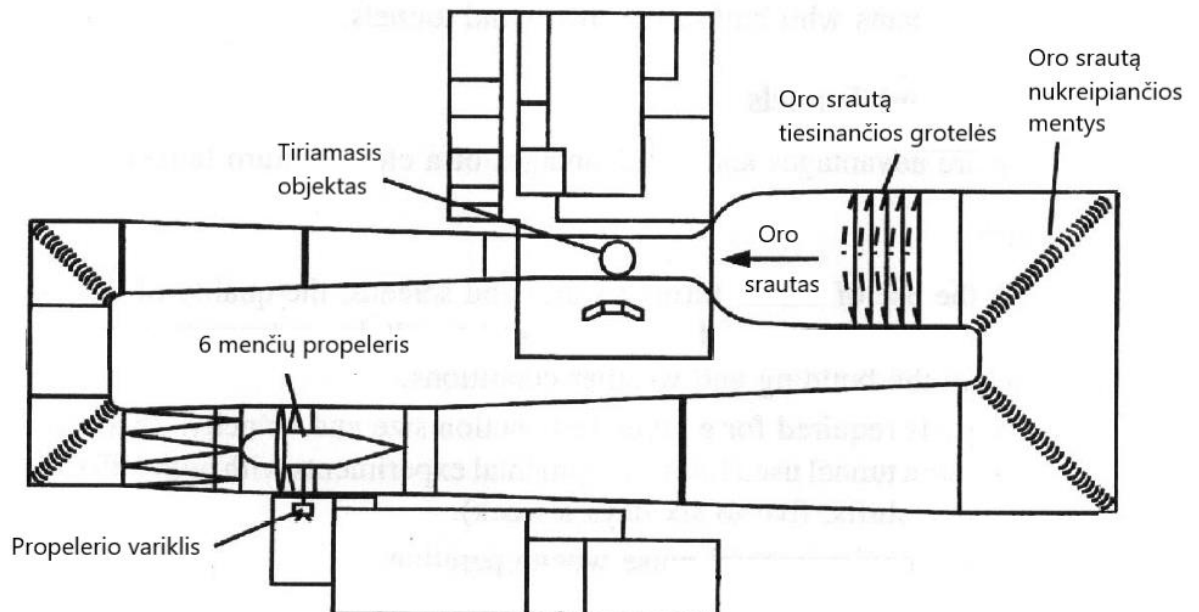
- Atvirojo ciklo aerodinaminiai vamzdžiai
- Uždarojo ciklo aerodinaminiai vamzdžiai

Atvirojo ciklo aerodinaminiai vamzdžiai yra palyginti paprastos sandaros. Įeinantis oro srautas tokio tipo aerodinaminiam vamzdyje dažniausiai keliauja tiesia trajektorija per oro srautą tiesinančias groteles darbinės kameros link ir grįžta atgal į aplinką. Toliau pateiktame paveikslėlyje galima matyti tokio tipo aerodinaminio vamzdžio sandarą (žr. 5 pav.) [16]:



5 pav. Atvirojo ciklo aerodinaminis vamzdis [16]

Uždarojo ciklo aerodinaminiai vamzdžiai yra sudėtingesnės sandaros ir juose oro srautas keliauja ratu be arba su labai nedideliu oro cirkuliavimu iš aplinkos. Kadangi šių aerodinaminių vamzdžių sandara yra sudėtingesnė, jie užima daugiau vietos. Tačiau šio tipo aerodinaminiai vamzdžiai turi vieną iš pagrindinių privalumų – juose yra lengviau pasiekiamas viršgarsinis oro srautas dėl galimybės įgreitinti jau tam tikru greičiu keliaujantį oro srautą. Uždarojo ciklo aerodinaminio vamzdžio sandara pateikta paveikslėlyje toliau (žr. 6 pav.) [16]:



6 pav. Uždarojo ciklo aerodinaminio vamzdžio sandara [16]

Tyrimai aerodinaminiam vamzdyje dažniausiai atliekami tiriant masteliu sumažintą, realaus objekto modelį. Modelis yra patalpinamas į darbinę aerodinaminio vamzdžio kamerą, kurioje yra sukuriamas kontroliuojamas oro srautas. Kai kuriais atvejais aerodinaminiam vamzdyje tyrimai atliekami naudojant realaus dydžio objektus, tačiau ši praktika taikoma rečiau, nes didžioji dalis tiriamųjų objektų, tokių kaip orlaiviai, yra didelių matmenų ir ne visada telpa aerodinaminio vamzdžio darbinėje kameroje [17].

1.5.3. Analitiniai metodai

Vienas iš paprasčiausių ir pradinėse orlaivio projektavimo stadijose paplitęs metodas – aerodinaminių charakteristikų nustatymas analitiniu būdu. Šiuo būdu yra įvertinamos orlaivio aerodinaminės charakteristikos panaudojant anksčiau gautus rezultatus arba žinant orlaivio geometrijos parametrus bei skrydžio sąlygas [19].

Dažniausiai yra nustatoma orlaivio keliamoji ir aerodinaminio pasipriešinimo jėgos. Keliamoji jėga gali būti apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$L = \frac{C_L \cdot \rho \cdot S \cdot v^2}{2}; \quad (6)$$

čia L – keliamoji jėga; C_L – keliamosios jėgos koeficientas; ρ – oro tankis; S – tiriamoji objekto plotas, pavyzdžiui – sparno plotas; v – oro srauto greitis.

Tuomet aerodinaminio pasipriešinimo jėga gali būti apskaičiuojama pagal analogišką formulę, kuri pateikta toliau:

$$D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot S \cdot v^2}{2}; \quad (7)$$

čia D – aerodinaminio pasipriešinimo jėga; ρ – oro tankis; S – tiriamoji objekto plotas; v – oro srauto greitis.

Analitiniu metodu nustatytos aerodinaminės charakteristikos yra mažesnio tikslumo nei aerodinaminiam vamzdyje eksperimentiniu būdu arba skaičiuojamosios fluidų dinamikos analizės būdu gauti rezultatai, tačiau dėl šio metodo paprastumo, tai yra patogus ir greitas būdas apskaičiuoti tiriamojo objekto preliminaras aerodinaminių charakteristikų vertes.

1.5.4. Aerodinaminių charakteristikų nustatymas realaus skrydžio metu

Tokių būdu nustatant aerodinamines charakteristikas gali būti gaunamas itin didelis tikslumas, tačiau šis metodas yra pakankamai komplikotas ir reikalauja nemažai lėšų bei gali būti atliekamas tik esant fiziniam realaus orlaivio modeliui. Šio testo metu orlaivyje ir ant jo yra patalpinama daugybė jutiklių bei kitų prietaisų, tokių kaip: pito vamzdeliai, akselerometrai bei pjezo jutikliai [18].

Pito vamzdelių pagalba yra matuojamas orlaivio greitis, akselerometrų pagalba yra nustatomas pagreitis, o pjezo jutikliais yra matuojamos apkrovos, atsirandančios ant orlaivio konstrukcijų horizontalaus skrydžio bei manevrų metu.

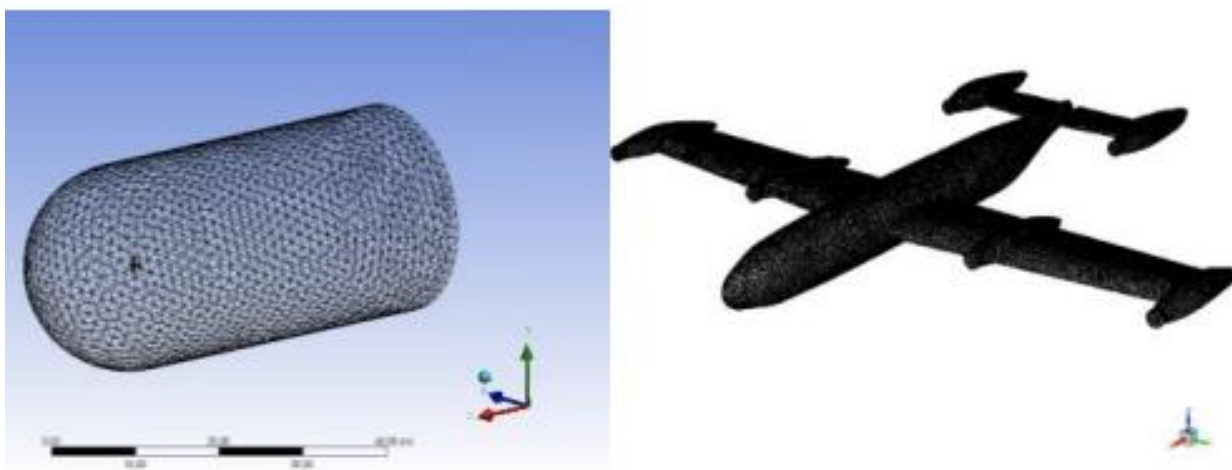
Skrydžio metu surinkti duomenys vėliau yra apdorojami tam tikrose kompiuterinėse programose bei išvedami keliamosios bei aerodinaminio pasipriešinimo jėgų koeficientai panaudojant anksčiau pateiktas formules (žr. 6 ir 7 formules).

Šis metodas gali būti išskiriamas į kelis etapus:

1. Aerodinaminių charakteristikų nustatymas esant įprastoms orlaivio eksploatacijos sąlygoms. Šiuo būdu yra nustatomos tokios charakteristikos kaip orlaivio valdymas ir stabilumas horizontalaus skrydžio bei kilimo ir žemėjimo metu. Taip pat įvertinamas greitis, skrydžio nuotolis bei valdymo ypatumai.
2. Išplėstinis skrydžio režimas. Šiuo būdu orlaivis tiriamas įvairiomis skrydžio sąlygomis siekiant nustatyti maksimalų bei minimalų skrydžio greitį, aukštį ir tinkamiausius atakos kampus. Ši informacija padeda nustatyti skrydžio parametrus, kuriais yra saugiausia eksploatuoti orlaivį.
3. Atskirų sistemų testai. Šis būdas yra skirtas patikrinti atskirų sistemų, tokių kaip elektrinių, hidraulinių bei kuro sistemų funkcionalumą ir užtikrinti saugų jų veikimą viso skrydžio metu.

1.6. Panašaus tipo orlaivių aerodinaminių charakteristikų nustatymo pavyzdys

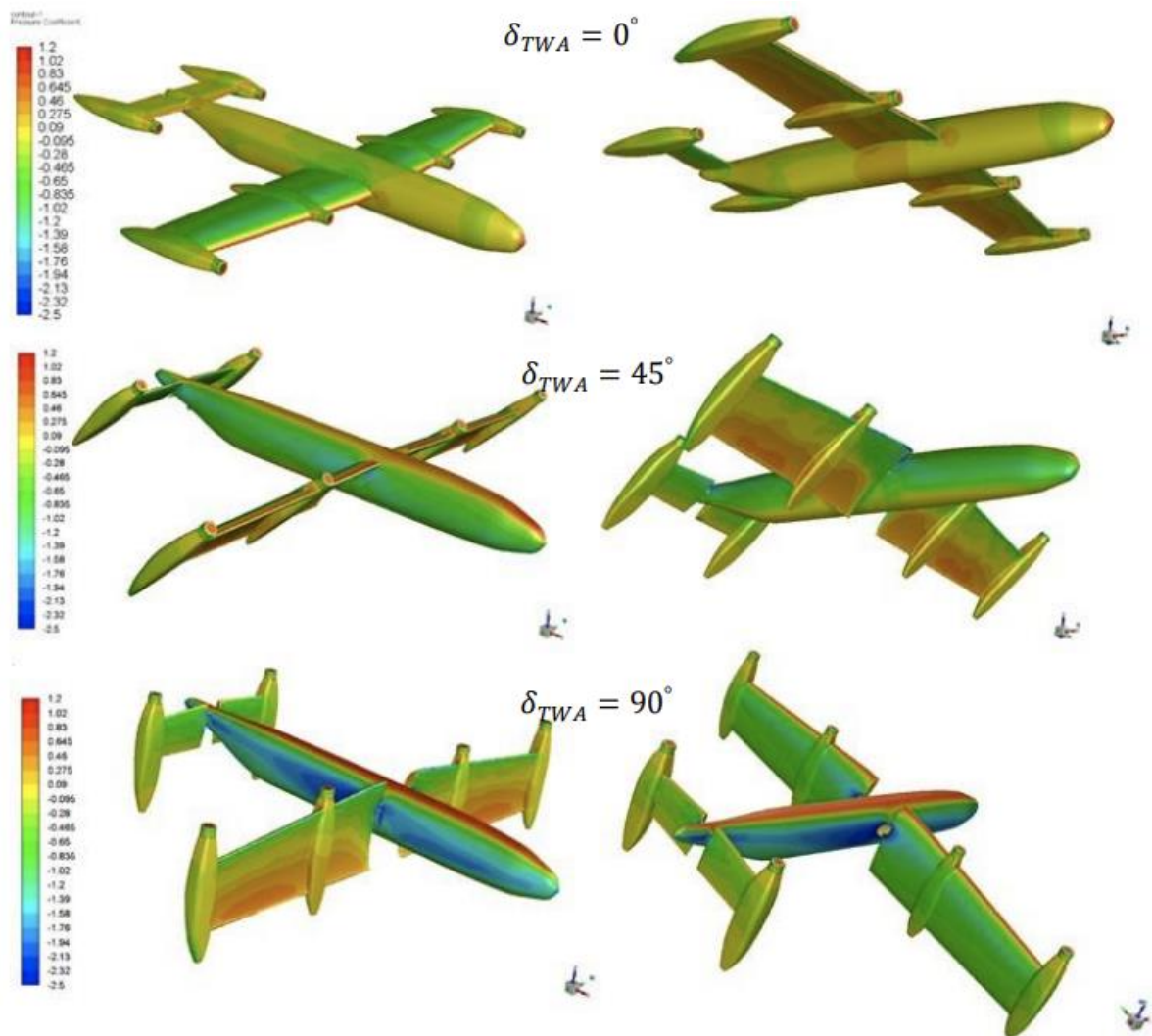
Apžvelgiamas orlaivis su pasukamais sparnais buvo tiriamas naudojant „ANSYS Fluent“ kompiuterinę programą. Minėta programa buvo atliekama skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė tiriant orlaivį prie 7 skirtingų sparnų pasukimo kampų, 3 aukštumos vairų atlenkimo kampų bei 3 aileronų atlenkimo kampų. Šioms kombinacijoms buvo sukurti 63 erdviniai modeliai. Tyrimai atliekami oro srauto greičiui esant $20 \frac{m}{s}$. Toliau pateiktas paveikslėlis su skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės domenu bei tiriamu orlaiviu (žr. 7 pav.) [24]:



7 pav. Tiriomojo orlaivio erdvinis modelis ir skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės domenas [24]

Paveikslėlyje atvaizduotas orlaivis šoninių kampų pasisukimo, aukštumos vairų ir aileronų atsilenkimo kampams 0° . Baigtinių elementų tinklėlis parenkamas tokios formos, kad priekyje būtų 25 metrų sfera ir prailgintų 50 metrų cilindru.

Tada atliekama skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė minėtam orlaiviui:



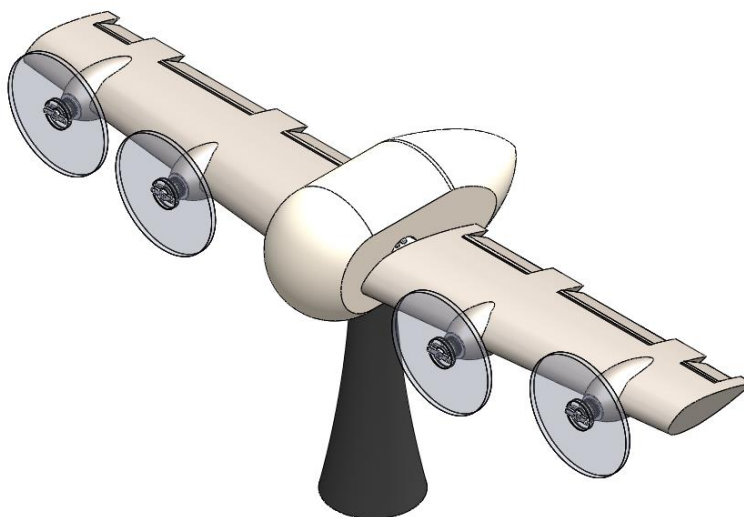
8 pav. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos analizė skirtingų šoninių sparnų pasisukimo kampų [24]

Paveikslėlyje yra atvaizduoti slėgio pasiskirstymo kontūrai šoninių sparnų pasisukimo kampams esant 0° , 45° ir 90° , kai pastarasis šoninių sparnų pasisukimo kampas imituoja vertikalųjį skrydžio režimą.

2. Projektinė dalis

2.1. Tyrimų stendo su pasukimo mechanizmu projektavimas NASA Ames tyrimų centrui

Toliau pateiktame paveikslėlyje (žr. 9 pav.) yra atvaizduotas tyrimų stendas, kurį projektavo šio darbo autorius. Stažuotės metu NASA Ames tyrimų centre buvo iškeltas tikslas – suprojektuoti tyrimų stendą, skirtą nustatyti orlaivių su pasukamu sparnu aerodinamines charakteristikas. Minėtas stendas skirtas aerodinaminių charakteristikų tyrimui JAV kariuomenės aerodinamiame vamzdyje, kurio darbinės kameros dydis yra 3 x 2,13m. Tyrimų stendu siekiama imituoti orlaivių su pasukamu sparnu esminę charakteristiką – gebėjimą pakilti ir nusileisti vertikaliai bei pereiti į horizontaliojo skrydžio režimą. Atsižvelgiant į minėtus reikalavimus, suprojektuotas tyrimų stendas, kurio pagrindinės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje [25]:



9 pav. Tyrimų stendas su sparnų pasukimo mechanizmu

1 lentelė. Stendo matmenys ir charakteristikos

Sparno mostas, m	2,13
Sparno pasukimo intervalas, °	-5° ÷ 90°
Vidutinė geometrinė sparno styga, m	0,32
Maksimalus propelerių skersmuo, m	0,47
Atstumas tarp propelerių sukimosi ašių, m	0,4

Taip pat buvo iškelta sąlyga, jog tyrimų stendu būtų įmanoma tirti įvairaus profilio sparnus, todėl šio stendo dizainas susideda iš trijų pagrindinių dalių – centrinės dalies ir dviejų šoninių sparnų. Centrinėje dalyje yra numatytas šoninių sparnų pasukimo mechanizmas, kurio pagalba šoniniai sparnai pasukami -5° ÷ 90° intervale. Pasukimo mechanizmas susideda iš tiesiakrumplės išorinio kabinimosi perdavos bei servo variklio, o šoniniai sparnai tvirtinami ant stačiakampio profilio vamzdžio juos prisukant sparnų apačioje esančiose tvirtinimo vietose. Siekiant sumažinti trintį, stačiakampio profilio vamzdis centrinėje dalyje tvirtinamas panaudojant radialinius guolius [25].

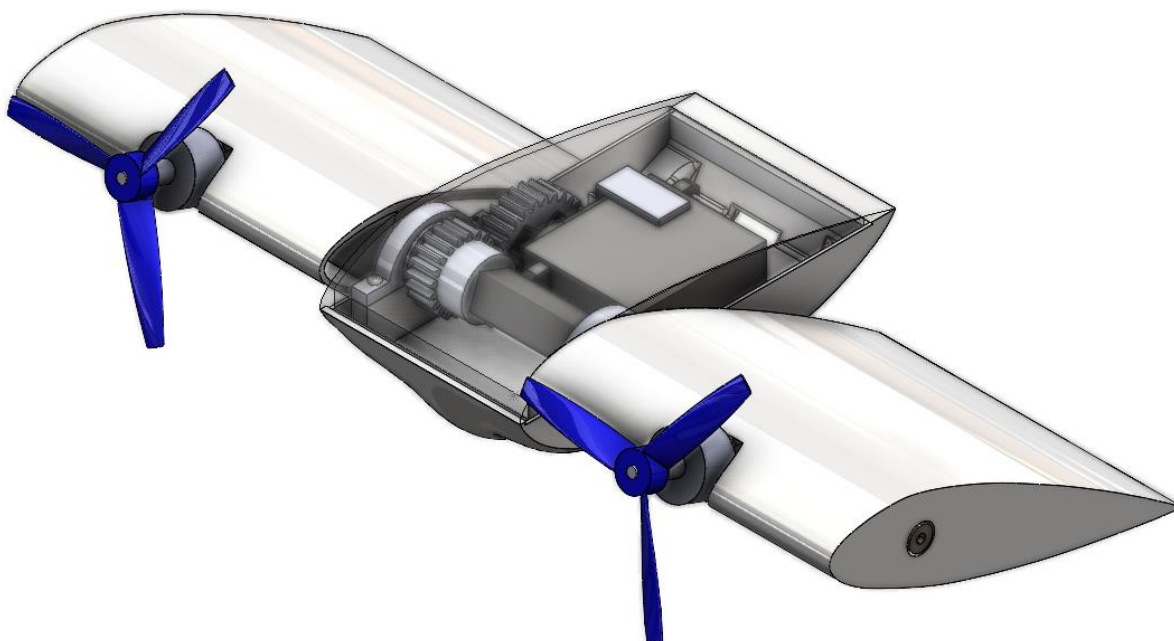
Šoniniuose sparnuose numatyti propeliai, kurių skersmuo – 0,32 m. Atstumas tarp propelerių sukimosi ašių kiekviename sparne – 0,4 m. Projektuojant šį tyrimų stendą buvo nuspręsta tirti propelerių persidengimo įtaką aerodinaminėms charakteristikoms, todėl tarp viename šoniniame sparne esančių propelerių sukimosi plokštumų yra 0,05 m tarpas. Todėl naudojant 0,47 m

skersmens propelerius, galima tirti minėtą propelerių persidengimo įtaką aerodinaminėms charakteristikoms [25].

Šis tyrimų stendas pateikiamas kaip pavyzdys, kurio dizainas bei sandara yra panaši į baigiamajame darbe naudojamo sparno su pasukimo mechanizmu aerodinaminėms charakteristikoms nustatyti.

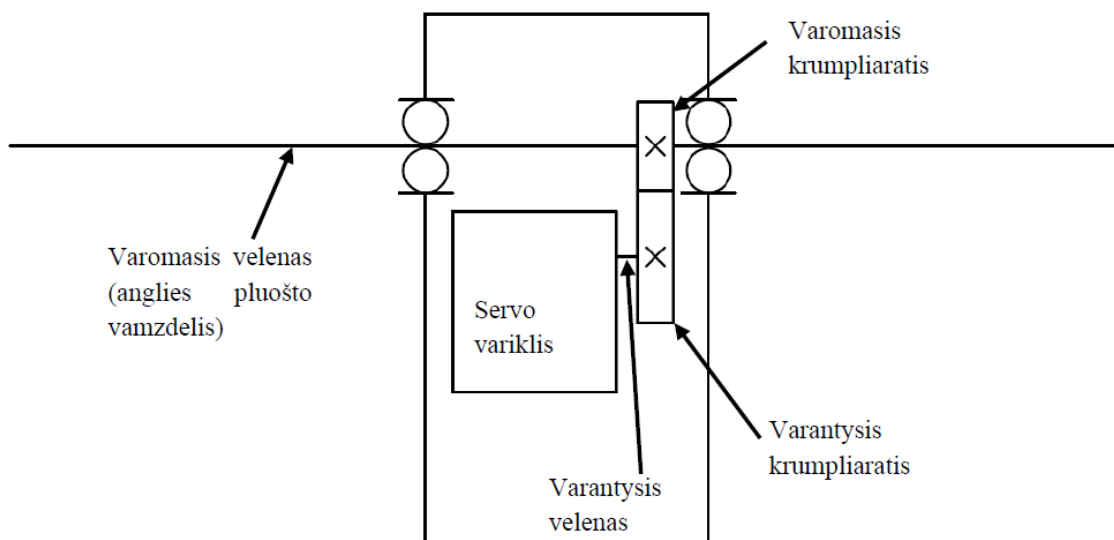
2.2. Sparno su pasukimo mechanizmu projektavimas ir gamyba

„SolidWorks“ kompiuterine programa suprojektuotas sparnas su pasukimo mechanizmu, skirtas KTU esančiame aerodinaminiam vamzdyje eksperimentiniams tyrimams atlikti. Sparnas susideda iš centrinės dalies bei šoninių sparnų, kurie servo variklio pagalba gali būti pasukami nuo 0° iki 90° kampu siekiant imituoti orlaivio su pasukamu sparnu skrydžio režimus. Centrinėje dalyje yra servo variklis, kuris sukimo momentą perduoda cilindrine tiesiakrumple išorinio kabinimosi perdava į anglies pluošto vamzdelį, ant kurio pritvirtinti šoniniai sparnai. Šoniniuose sparnuose įmontuoti bešepetėliniai elektros varikliai su propeleriais, kurių pagalba generuojama traukos jėga. Šiems komponentams valdyti pasirinktas „Arduino UNO“ mikrovaldiklis ir parašyta programa, kurios pagalba su tiesiniais potenciometrais gali būti valdomas šoninių sparnų pasisukimo kampas bei bešepetėlinių variklių sukimosi greitis. Suprojektuotas erdvinis sparno modelis su minėtais komponentais pateiktas toliau (žr. 10 pav.) [25].



10 pav. Erdvinis sparno su valdymo komponentais modelis

Siekiant geriau suprasti sparno veikimo principą, toliau pateikta modelio kinematinė schema su pagrindiniais sparno komponentais:



11 pav. Sparno su pasukimo mechanizmu kinematinė schema

Modelis suprojektuotas taip, kad būtų galima lengvai pakeisti šoninius sparnus ir tirti įvairaus profilio sparnus bei nustatyti aerodinamines charakteristikas. Projektuojamo sparno aerodinaminis centras nutolęs per $\frac{1}{4}$ stygos ilgio nuo priekinės briaunos. Parenkant servo variklį buvo skaičiuojamas didžiausias aerodinaminis polinkio momentas siekiant nustatyti, kokio sukimo momento reikia, kad servo variklis pasuktų šoninius sparnus esant tam tikram atakos kampui bei oro srauto greičiui. Skaičiuojant aerodinaminį polinkio momentą buvo apibrėžtos pradinės sąlygos, kuriomis šis modelis tiriamas. Tada įvertinus pradines sąlygas didžiausias aerodinaminis momentas apskaičiuojamas pagal formulę [26]:

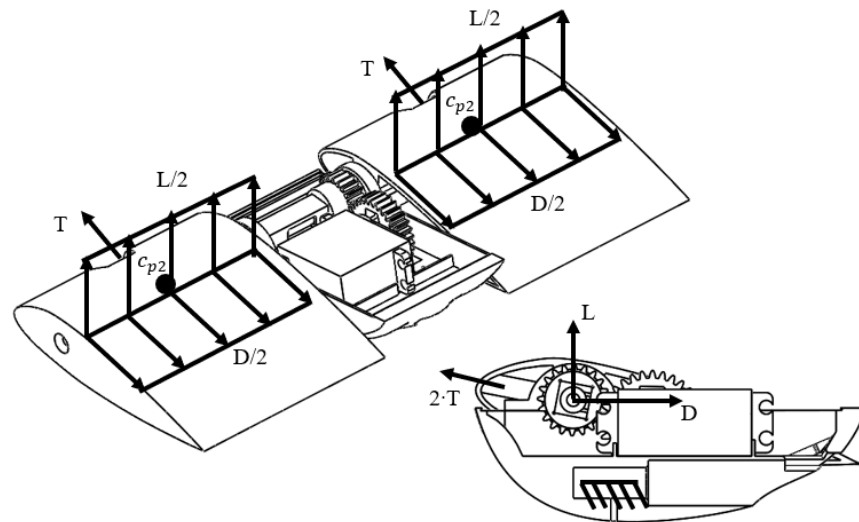
$$M = \frac{C_M \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot c}{2}; \quad (8)$$

čia M – aerodinaminio polinkio momentas; C_M – aerodinaminio polinkio koeficientas; ρ – oro tankis;

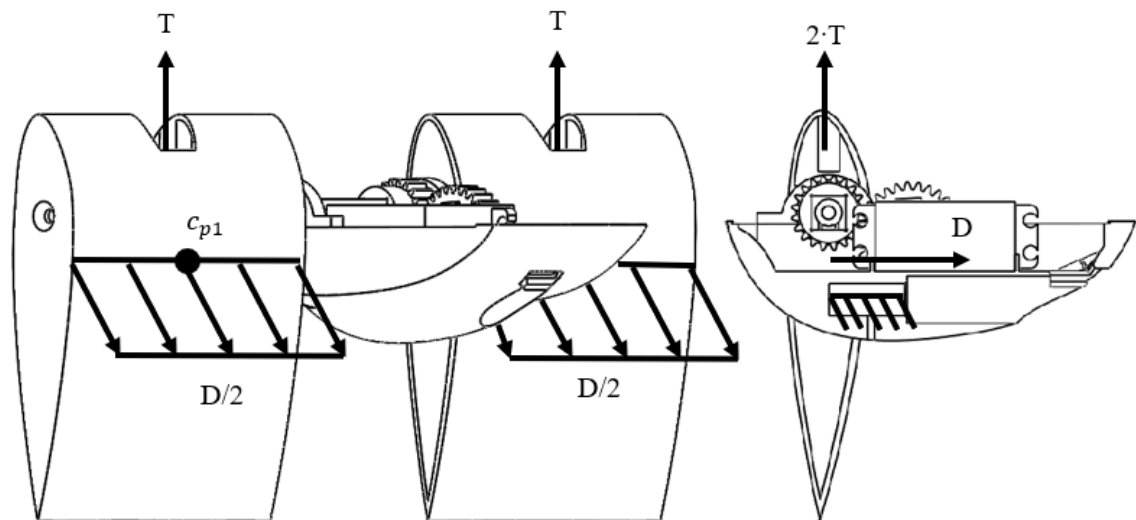
S – sparno plotas; v – oro srauto greitis; c – stygos ilgis.

Analitiniu metodu apskaičiuotas aerodinaminis polinkio momentas $M = -0,1764$ Nm. Taip pat buvo atlikta pradinė skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė, kurios metu gauta vertė $-0,1819$ Nm.

Taip pat buvo atlikta viso sparno stiprumo analizė naudojant analitiniu būdu pagal 6 ir 7 formules apskaičiuotas maksimalias apkrovas. Pagal XFLR5 programoje gautus rezultatus, maksimali keliamosios jėgos apkrova susidaro, kai šoniniai sparnai pasukti 11° kampu, o maksimali aerodinaminio pasipriešinimo jėgos apkrova, kai sparnai pasukti 90° kampu. Tada „SolidWorks Simulation“ programoje atliekama stiprumo analizė, o įtvirtinimo schemas su pavaizduotomis apkrovomis pateiktos toliau (žr. 12 ir 13 pav.):



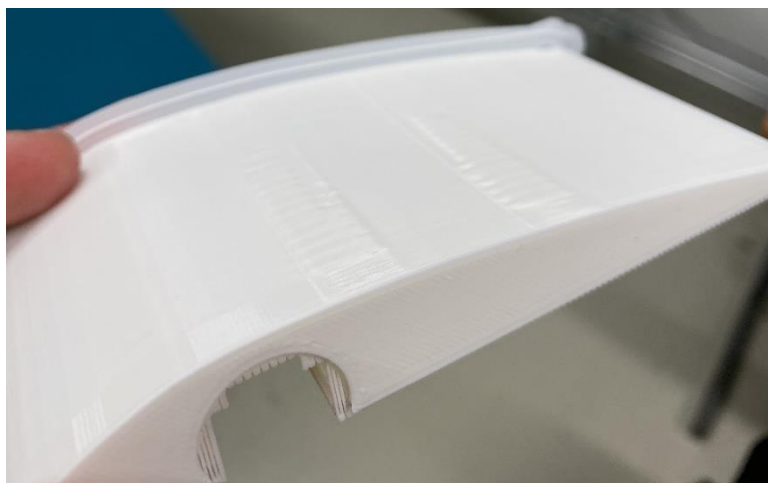
12 pav. Didžiausios aerodinaminės jėgos apkrovos sparnui schema



13 pav. Didžiausios aerodinaminio pasipriešinimo jėgos apkrovos sparnui schema

2.3. Sparno su pasukimo mechanizmu gamyba

„SolidWorks“ programa suprojektuotos sparno detalės buvo pagamintos iš PLA medžiagos naudojant 3D spausdintuvą. Komponentams gaminti buvo naudojamas „Prusa i3 MK3“ 3D spausdintuvas [27]. Minėtu įrenginiu buvo spausdinami šoniniai sparnai, centrinės dalies korpusas ir dangtelis bei cilindrinė išorinio kabinimosi tiesiakrumplė perdava. Siekiant pagerinti 3D spausdintuvu pagamintų detalių aerodinamines charakteristikas, šoniniai sparnai bei centrinės dalies detalės buvo apdirbamos mechaniniu būdu, taip sumažinant jų paviršiaus šiurkštumą:



14 pav. Mechanškai neapdirbtas centrinės dalies dangtelis



15 pav. Centrinės dalies dangtelis po mechaninio apdirbimo

Siekiant sumažinti komponentų paviršiaus šiurkštumą, buvo atliekamas šlifavimas abrazyviniu popieriumi, gruntavimas bei dažymas. Skirtumą tarp ką tik 3D spausdintuvu atspausdinto ir mechaniškai apdirbto centrinės dalies dangtelio galima matyti 14 ir 15 paveikslėliuose.

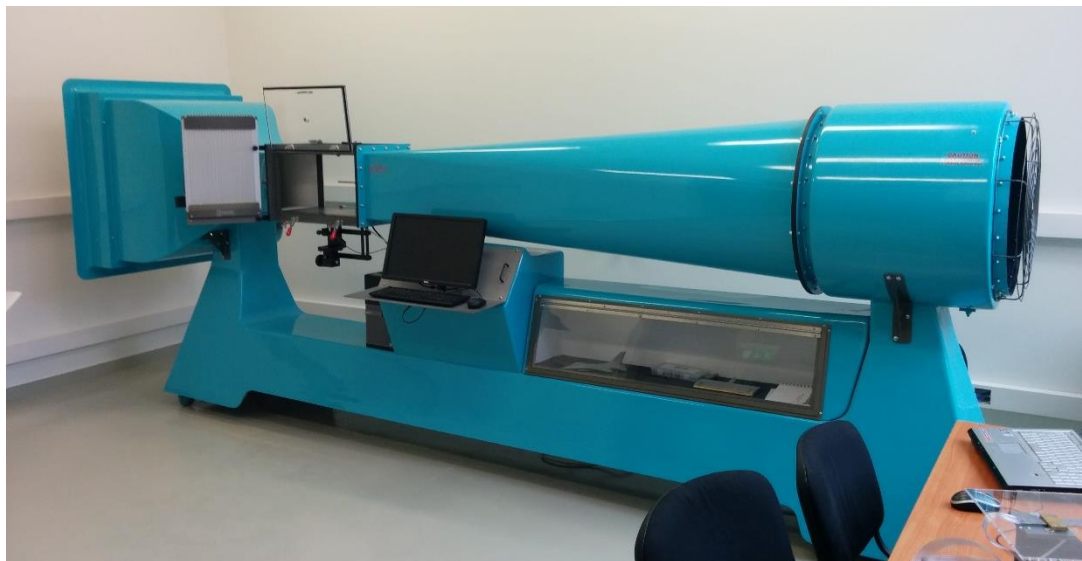
3. Tiriamoji dalis

3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudoto aerodinaminio vamzdžio aprašymas

Suprojektuotas bei pagamintas sparnas su pasukimo mechanizmu ištirtas KTU laboratorijoje esančiame horizontaliame, mažo oro srauto greičio bei atvirojo ciklo „Aerolab 12 x 12“ aerodinamiame vamzdyje (žr. 16 pav.). Šio aerodinaminio vamzdžio techninės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje:

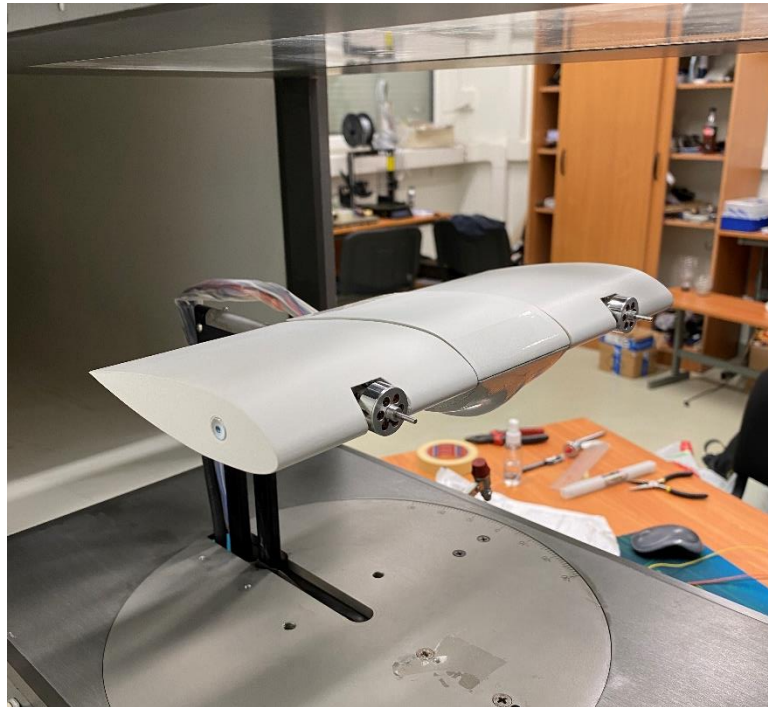
2 lentelė. AEROLAB aerodinaminio vamzdžio charakteristikos [28]

Darbinės kameros matmenys, m	0,305 x 0,305 x 0,600
Oro srauto greičio intervalas, $\frac{m}{s}$	4,5 ÷ 65
Turbulentiškumo lygis, %	< 0,2
Aerodinaminio vamzdžio gabaritiniai matmenys, m	4,6 x 1,1 x 1,8
Masė, kg	272
Elektros variklio išvystoma galia, W	7500



16 pav. KTU laboratorijoje esantis „Aerolab 12 x 12“ aerodinaminis vamzdis

Kadangi tai mokomasis aerodinaminis vamzdis, jo darbinės kameros matmenys yra ganėtinai maži, todėl sparno su pasukimo mechanizmu gabaritiniai matmenys buvo parinkti atitinkamai. Sparnas šiame aerodinamiame vamzdyje tvirtinamas ant tiriamųjų objektų laikiklio su „stig“ tipo jėgos jutikliu, kurio pagalba aerodinaminės jėgos ir momentas matuojami tiesioginiu metodu. Aerodinamiame vamzdyje pritvirtinta ir tyrimams paruoštą sparną su pasukimo mechanizmu galima matyti toliau esančiame paveikslėlyje (žr. 17 pav.):



17 pav. Aerodinaminiam vamzdyje įtvirtintas sparnas su pasukimo mechanizmu

3.2. Eksperimentiniai tyrimai aerodinaminiam vamzdyje

Pagaminus ir surinkus sparną su pasukimo mechanizmu bei parašius programą šoniniams sparnams ir bešepetėlinių variklių greičiui valdyti, sparnas eksperimentiniu būdu buvo ištirtas KTU esančiame atvirojo ciklo aerodinaminiam vamzdyje esant tam tikroms kraštinėms sąlygoms. Buvo nustatomos sparno aerodinaminės charakteristikos matuojant sparno keliamąją bei aerodinaminio pasipriešinimo jėgas.

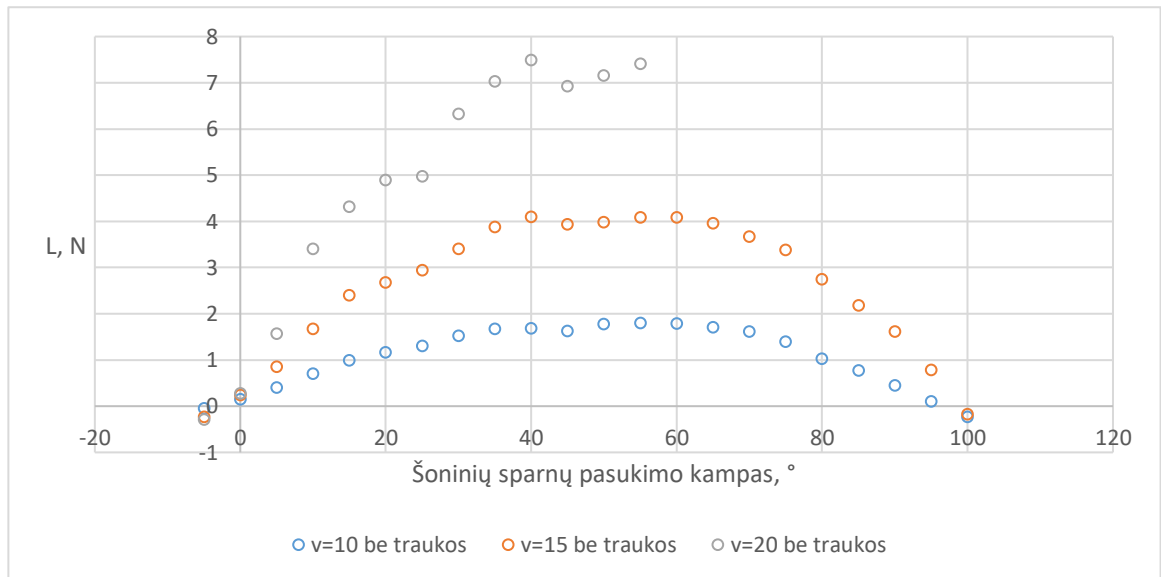
Siekiant įvertinti paklaidas dėl statinių apkrovų, taip pat buvo atliekami tyrimai nesant oro srautui prie tokių pat atakos bei šoninių sparnų pasukimo kampų. Apdorojant eksperimentiniu būdu gautus duomenis buvo įvertinamos ir statinės apkrovos.

3.2.1. Eksperimentiniai tyrimai su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą

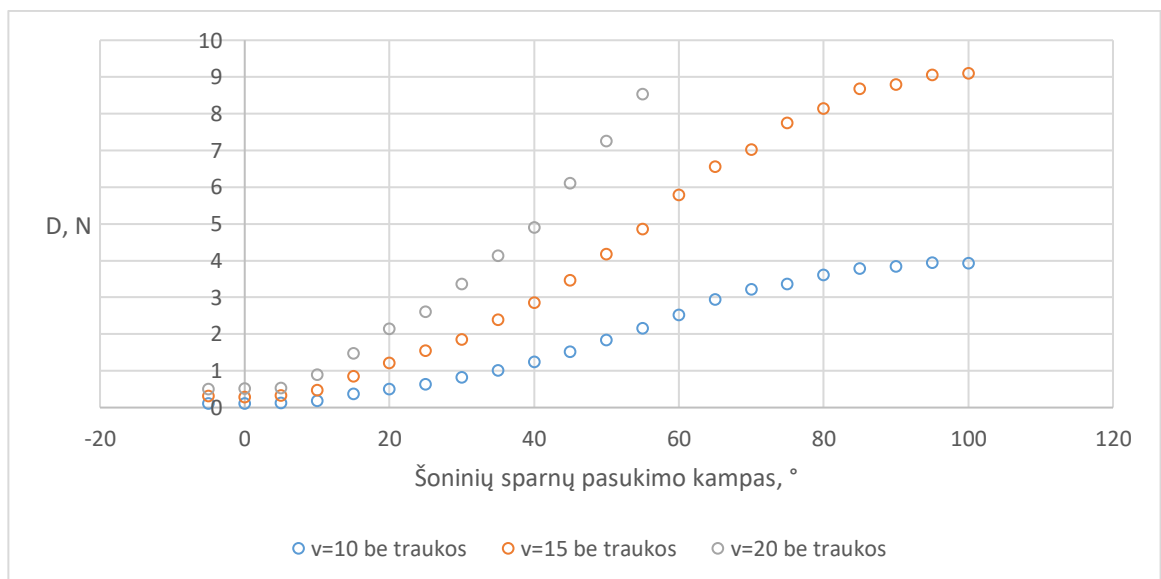
Šis tyrimas buvo atliekamas be propelerių ir prie trijų skirtingų oro srauto greičių:

1. $V = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$;
2. $V = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$;
3. $V = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Šoninių sparnų pasukimo kampas centrinės dalies atžvilgiu buvo keičiamas intervale $-5^\circ \div 100^\circ$.



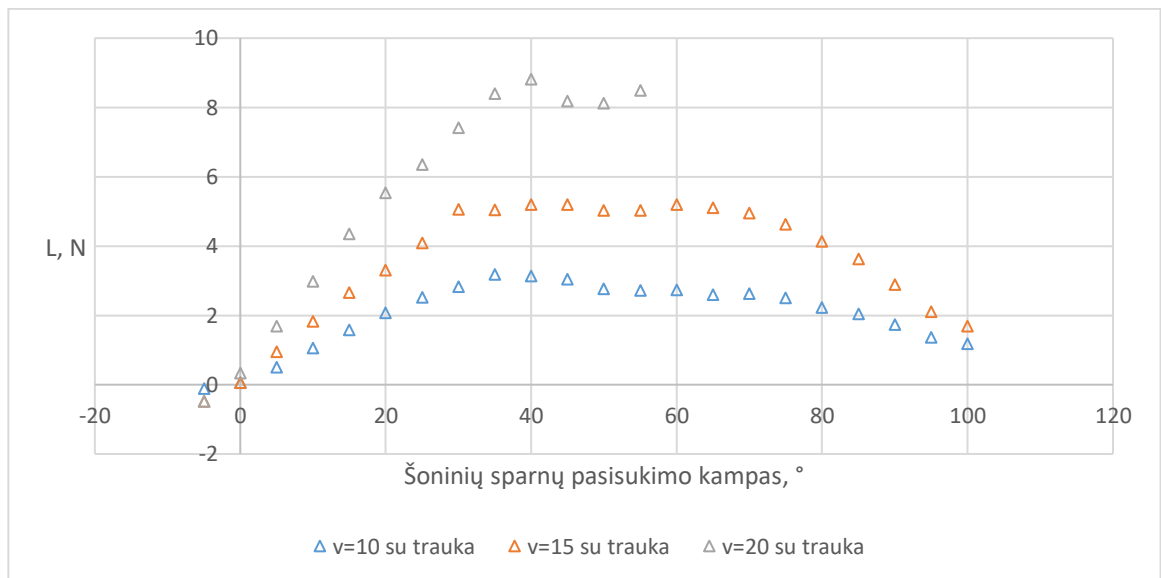
18 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą



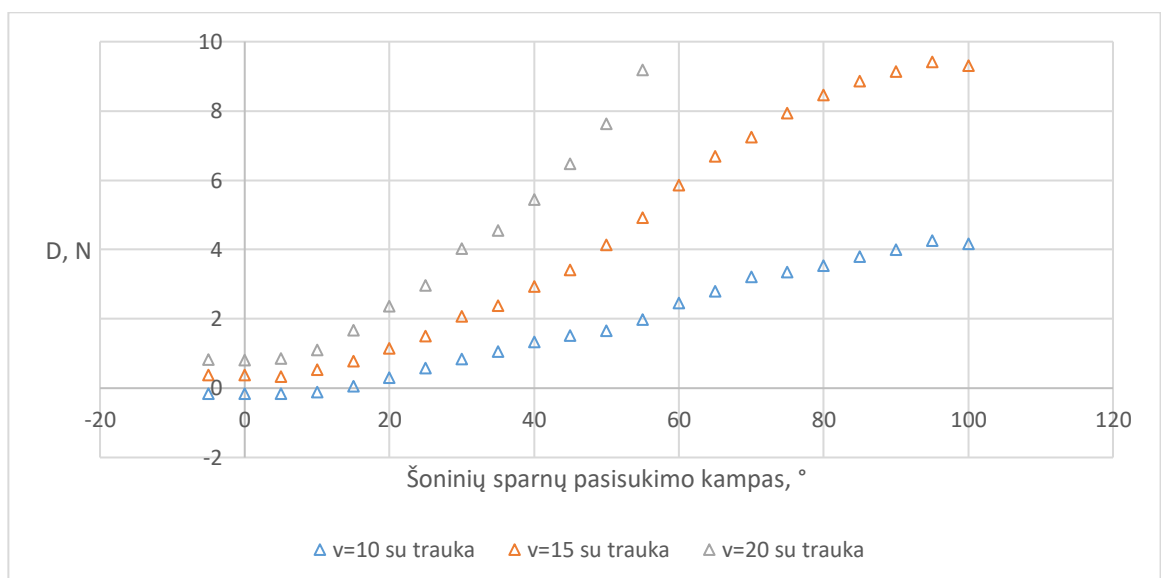
19 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą

3.2.2. Eksperimentiniai tyrimai keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą

Tyrimai buvo atliekami prie anksčiau minėtų trijų oro srauto greičių (žr. 3.2.1 skyrelį) bei su uždėtais propeleriais, kurie bešepetėlinių variklių pagalba generuoja traukos jėgą.



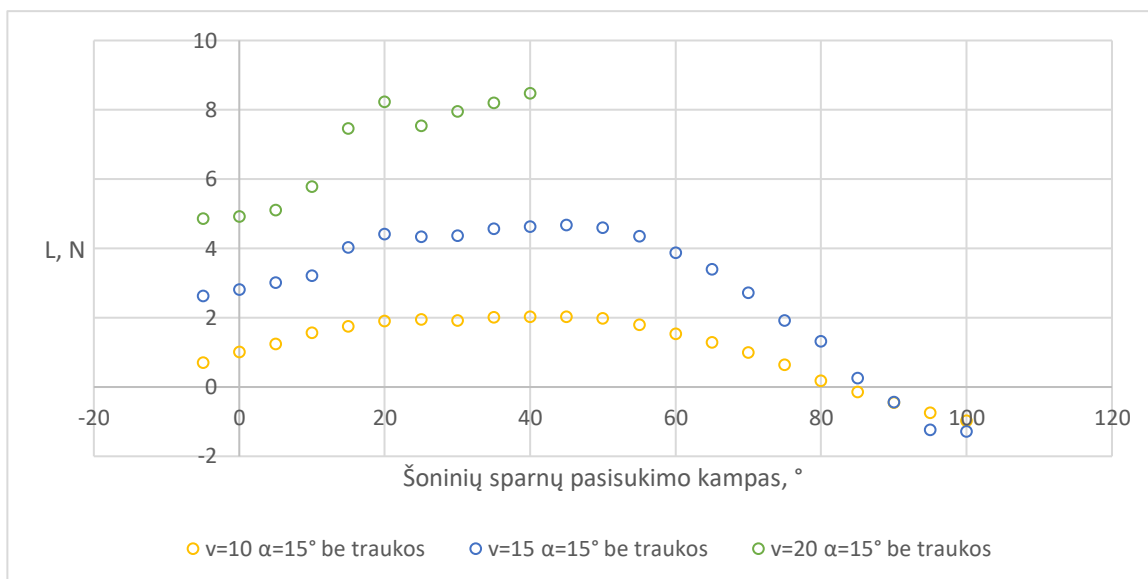
20 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai



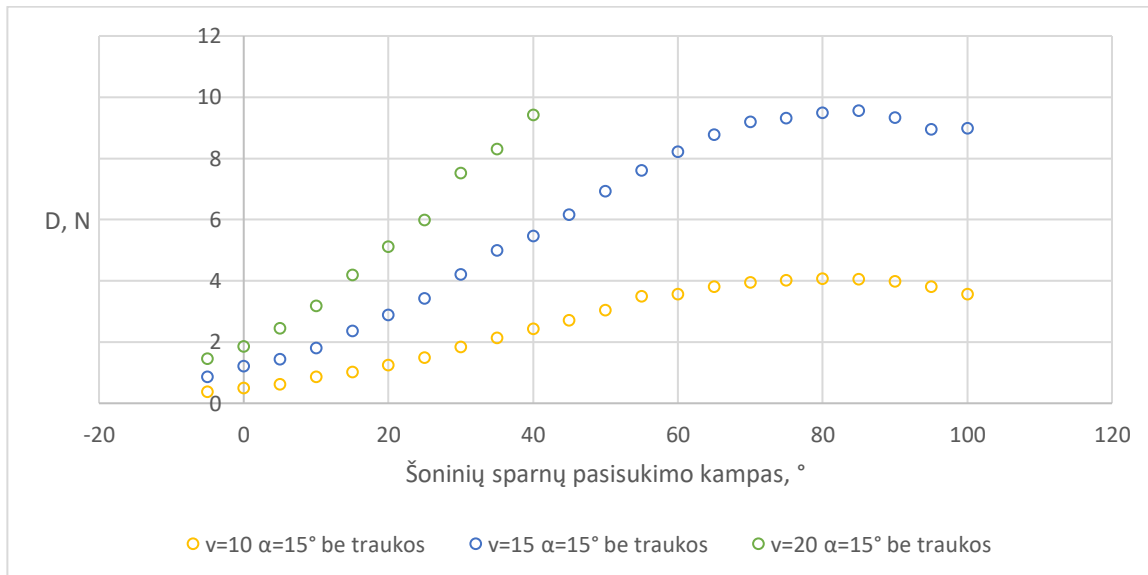
21 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai

3.2.3. Eksperimentiniai tyrimai su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą, kai centrinė sparno dalis pasukta 15°

Šis tyrimas buvo atliekamas su nuimtais propeleriais prie trijų anksčiau minėtų oro srauto greičių (žr. 3.2.1 skyrelį) bei 15° pasukta centrine dalimi. Šoniniai sparnai centrinės dalies atžvilgiu buvo pasukami intervale $-5^\circ \div 100^\circ$.



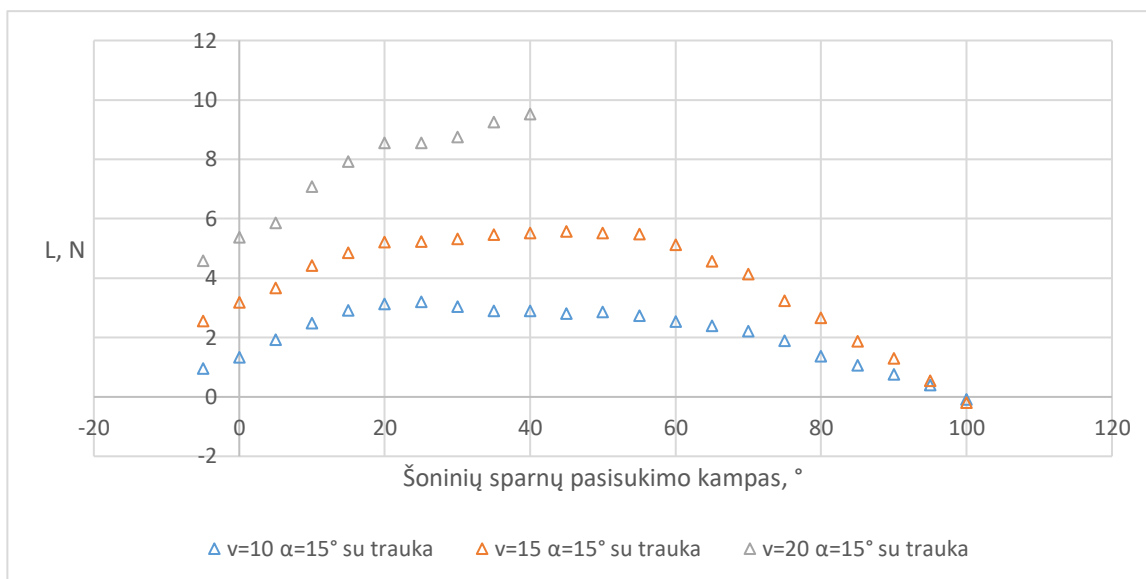
22 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu



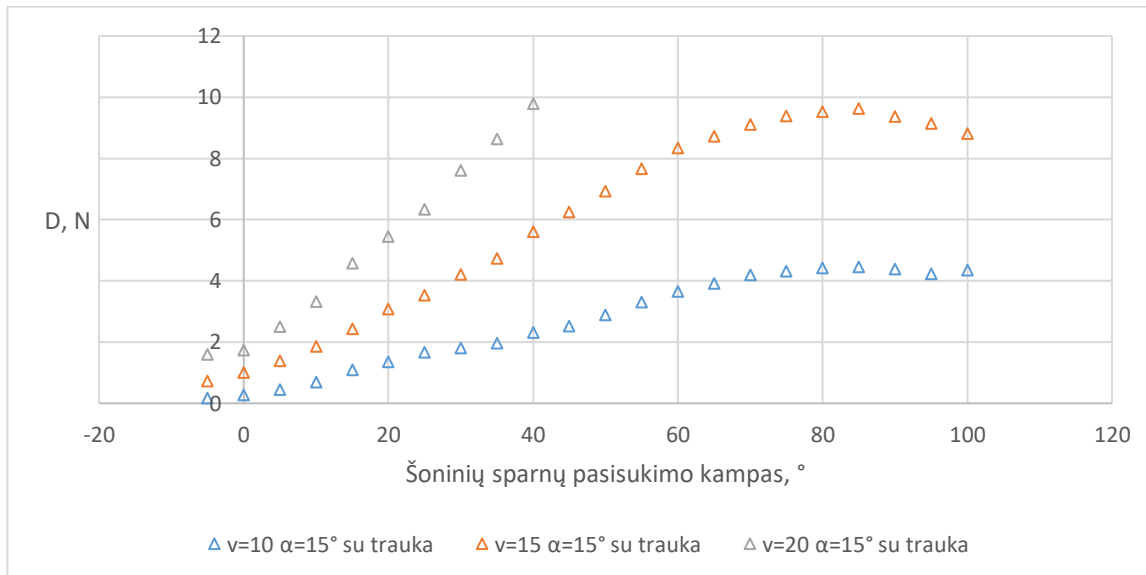
23 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu

3.2.4. Eksperimentiniai tyrimai propeleriais keičiant šoninių sparnų pasukimo kampą, kai centrinė sparno dalis pasukta 15° ir propeleriai generuoja traukos jėgą

Tyrimas buvo atliekamas propeleriams generuojant traukos jėgą prie anksčiau minėtų trijų oro srauto greičių (žr. 3.2.1 skyrelį) bei centrinei daliai esant pasuktai 15° kampui. Šoniniai sparnai pasukami tuo pačiu $-5^\circ \div 100^\circ$ intervalu.



24 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelių generuojamai traukos jėgai bei centrinei daliai pasuktai 15° kampui



25 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelių generuojamai traukos jėgai bei centrinei daliai pasuktai 15° kampui

3.3. Skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizė

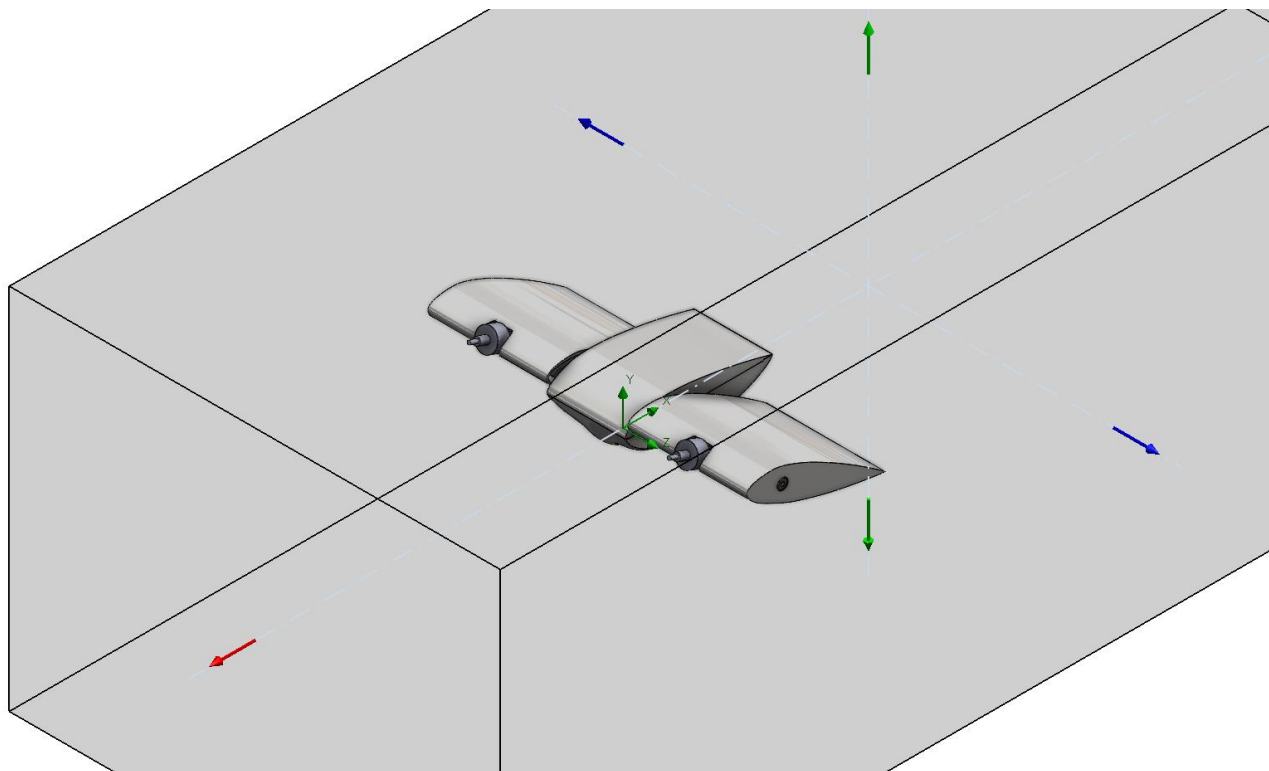
3.3.1. Oro srauto domeno aprašymas

„SolidWorks Flow Simulation“ programoje sukuriamas oro domenas, kurio matmenys parenkami tokie pat kaip ir KTU esančio aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros matmenys. Tokie pat matmenys parenkami siekiant kuo tiksliau atkartoti eksperimentinius tyrimus aerodinamiame vamzdyje. Domeno matmenys pateikti lentelėje toliau (žr. 3 lent.):

3 lentelė. Skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizės domeno matmenys

Domeno ilgis, m	0,6
Domeno plotis, m	0,305
Domeno aukštis, m	0,305

Sparno modelis domene sulygiuotas taip, kad atspindėtų realaus modelio poziciją aerodinamiame vamzdyje. Sparno modelį su nuimtais propeleriais skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizės domene galima matyti paveikslėlyje toliau (žr. 26 pav.):



26 pav. Sparno modelis skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizės domene

3.3.2. Baigtinių elementų tinklelio jautrumo analizė

Prieš atliekant skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizę esant įvairioms sparno modelio pozicijoms bei oro srauto greičiams, buvo atlikta baigtinių elementų tinklelio jautrumo analizė. Kadangi kiekvienai skaičiuojamosios fluidos dinamikos analizei reikia daug kompiuterio resursų, todėl baigtinių elementų tinklelio jautrumo analizės metu siekiama išsiaiškinti, kokie tinklelio parametrai yra tinkamiausi analizei atlikti atsižvelgiant į kompiuterio skaičiavimo trukmę bei rezultatų tikslumą.

Tinklelio jautrumo analizė atliekama parenkant rečiausio tinklelio parametrus, po to tinklį vis tankinant ir lyginant gautus skaičiavimo rezultatus. Priimta, kad pasiektas norimas tikslumas, kai skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės rezultatas keičiasi mažiau nei 5 %. Tada parenkami tokie baigtinių elementų tinkleliai tiriamiems objektams:

4 lentelė. Tiriamųjų objektų matematinių modelių baigtinių elementų tinklelio parametrai

Viso sparno matematinio modelio baigtinių elementų kiekis, vnt	1273811
Propelerio matematinio modelio baigtinių elementų kiekis, vnt	249984

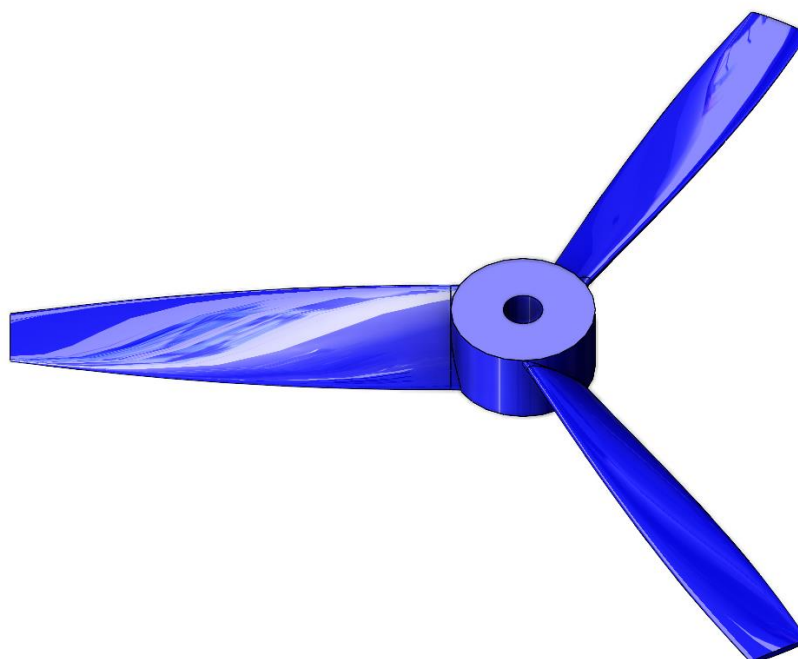
3.3.3. Propelerio modeliavimas

Naudojant „SolidWorks“ programinę įrangą buvo suprojektuoti du propeleriai, kurie yra skirtingų sukimosi kryptių. Vienas iš jų sukasi prieš, o kitas pagal laikrodžio rodyklę. Sumodeliuoto propelerio matmenys pateikti 5 lentelėje:

5 lentelė. Projektuojamo propelerio parametrai

Propelerio skersmuo, mm	78
Propelerio menčių skaičius	3
Propelerio eiga, mm	89,3
Propelerio išorinis flanšo skersmuo, mm	11
Propelerio montavimo skylės skersmuo, mm	3

Žemiau pateiktas suprojektuoto propelerio 3D modelis (žr. 27 pav.)



27 pav. Sumodeliuotas propeleris

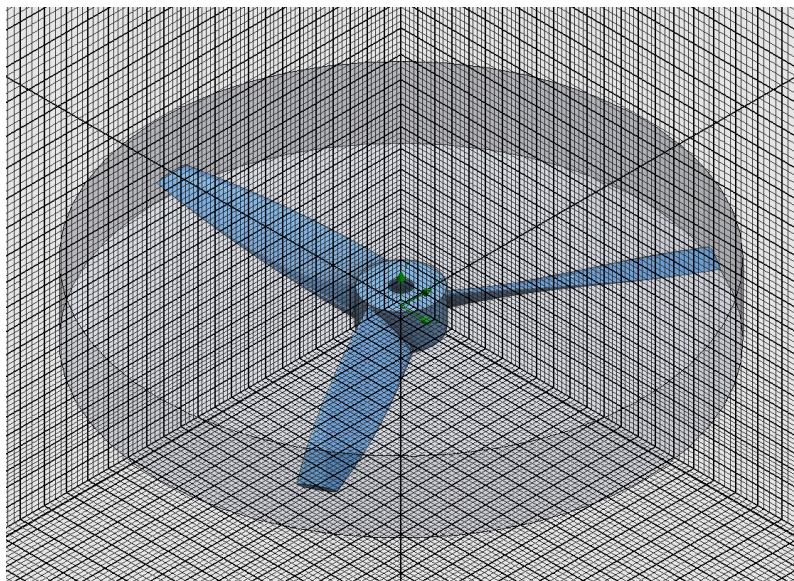
3.3.4. Propelerio aerodinaminių charakteristikų nustatymas

Siekiant nustatyti viso sparno aerodinamines charakteristikas, reikia įvertinti ir propelerių kuriamo oro srauto įtaką. Propelerių sukurto oro srauto aptekėjimas sparnu gali daryti neigiamą arba teigiamą įtaką viso sparno aerodinaminėms charakteristikoms, todėl būtina atlikti propelerių skaičiuojamosios fluido dinamikos analizę [29] [30].

Propelerio skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė atliekama „SolidWorks Flow Simulation“ programoje. Programoje įvedamos kraštinės tyrimo sąlygos parametrai. Analizė atliekama esant tokiems parametrams (žr. 6 lent):

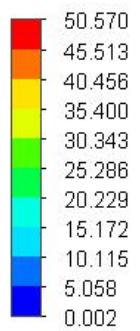
6 lentelė. Propelerio skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės kraštinės sąlygos

Propelerių sukimosi greitis, $\frac{\text{aps}}{\text{min}}$	12333
Oro srauto greitis, m/s	0
Baigtinių elementų kiekis, vnt	249984
Baigtinių fluido elementų, kontaktuojančių su propelerio paviršiumi, kiekis, vnt	53125
Turbulentiškumas, %	0,2



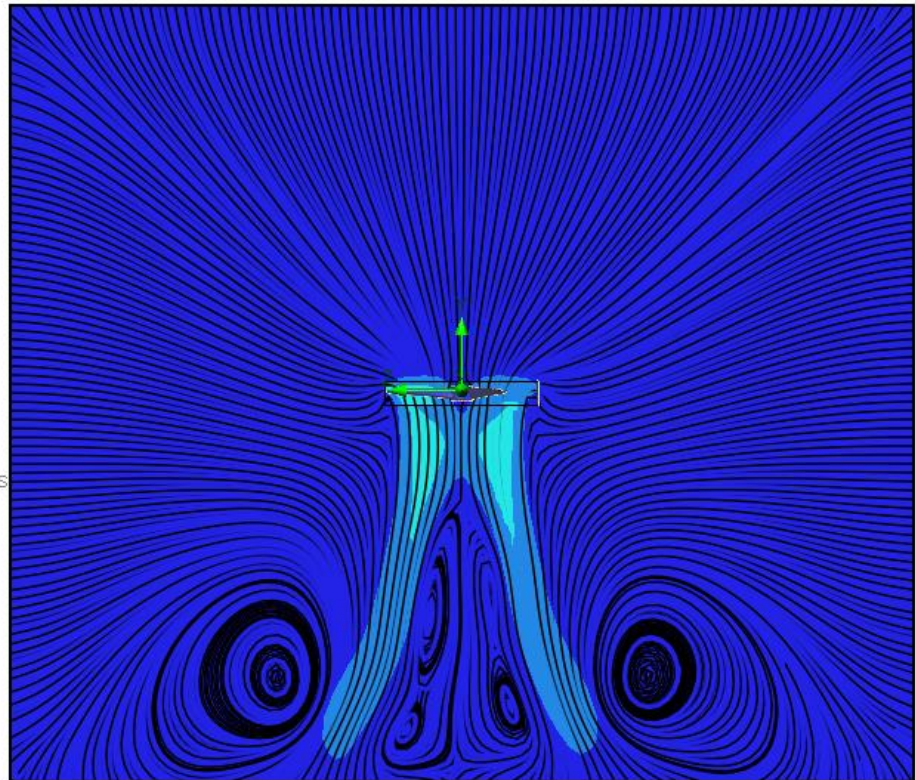
28 pav. Propelerio baigtinių elementų tinklelis

Sukūrus globalų baigtinių elementų tinklį, taip pat sukuriamas ir lokalus baigtinių elementų tinklelis, kuriuo galima sutankinti pasirinktų objektų tinklį. Šiuo atveju yra sutankinamas propelerio modelio baigtinių elementų tinklelis.



Velocity [m/s]

Cut Plot 1: contours
 Cut Plot 2: contours
 Surface Plot 1: contours
 Flow Trajectories 1
 Flow Trajectories 3

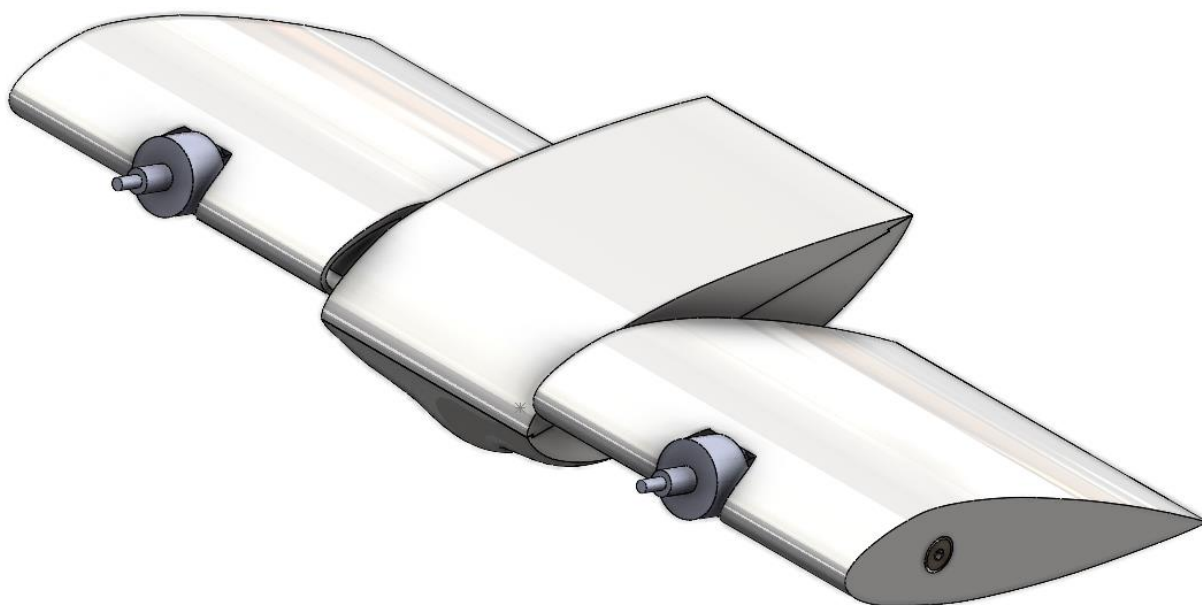


29 pav. Propelerio skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė

Propelerio sukimosi greitis apskaičiuotas pagal bešepetėlinio variklio Kv charakteristika, kuri nurodo variklio išvystomą sukimosi greitį esant 1V įtampai. Kadangi bešepetėlinio variklio Kv charakteristika yra 2000, o įtampa apie 6,16 V, tuomet bešepetėlinių variklių sukimosi greitis - $12333 \frac{\text{aps}}{\text{min}}$.

Atlikus propelerio skaičiuojamosios fluído dinamikos analizę, buvo nustatyta, kad vienas propeleris generuoja 0,254 N traukos jėgą, kai propelerio sukimosi greitis – $12333 \frac{\text{aps}}{\text{min}}$.

3.3.5. Sparno su nuimtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė

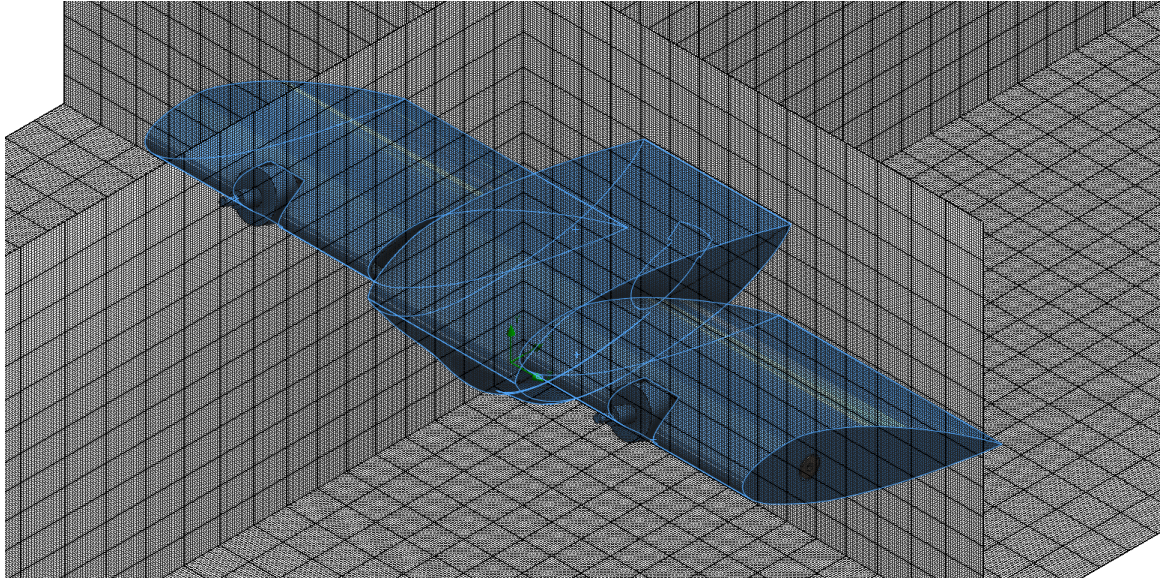


30 pav. Sparno su nuimtais propeleriais 3D modelis

Skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė atliekama su nuimtais propeleriais, siekiant nustatyti viso sparno generuojamą keliamąją ir aerodinaminio pasipriešinimo jėgą. Analizės parametrai pateikti 7 lentelėje:

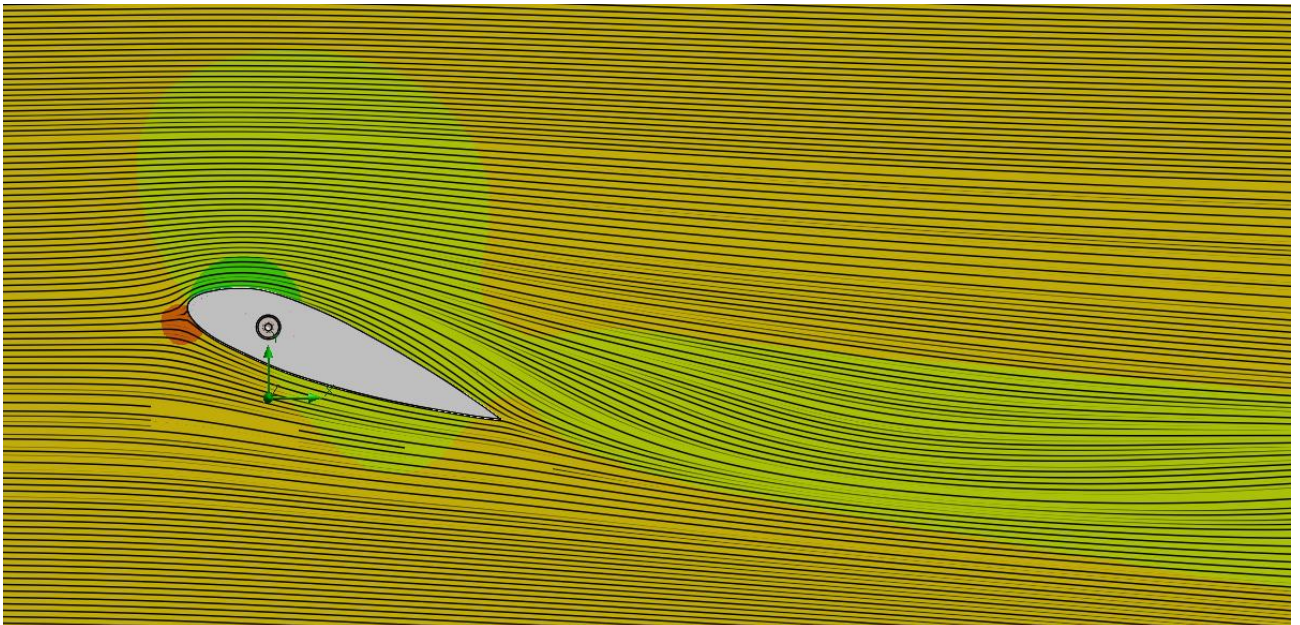
7 lentelė. Viso sparno skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės kraštinės sąlygos

Viso sparno atakos kampas, °	0
Šoninių sparnų pasukimo kampas, °	-5 ÷ 100
Oro srauto greitis, m/s	10; 15; 20
Baigtinių elementų kiekis, vnt	1273811
Baigtinių fluído elementų, kontaktuojančių su sparno paviršiumi, kiekis, vnt	590876
Turbulentiškumas, %	0,2



31 pav. Sparno su nuimtais propeleriais lokalus baigtinių elementų tinklelis

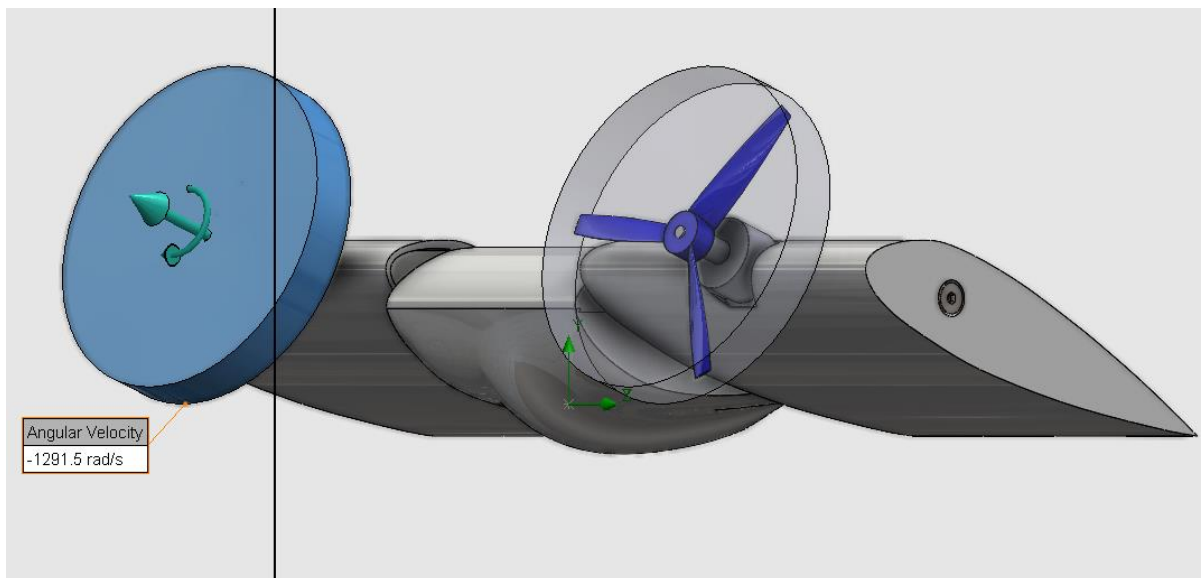
Sukūrus globalųjį baigtinių elementų tinklą, taip pat sukuriamas lokalusis tinklas, kuris sutankina baigtinių elementų tinklą pasirinktuose objektuose. Šiuo atveju – sparne, kad būtų gaunami tikslesni rezultatai. Atliekama skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė, kurios metu siekiama nustatyti sparno keliamosios ir aerodinaminio pasipriešinimo jėgų vertes.



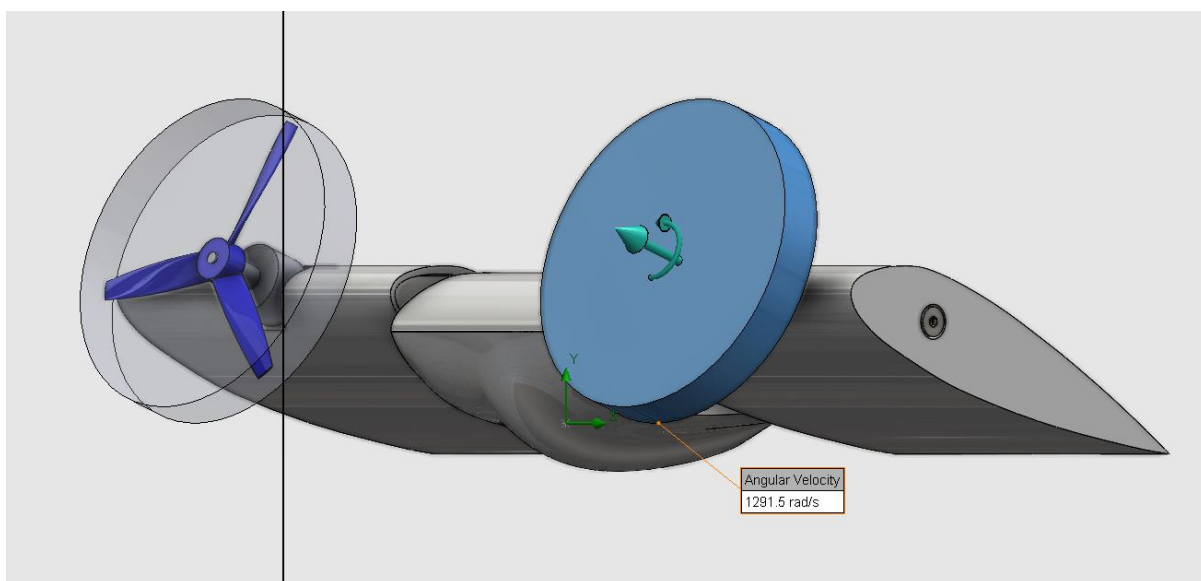
32 pav. Sparno su nuimtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė

3.3.6. Sparno su uždėtais propeleriais skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė

Norint įvertinti propelerių kuriamos traukos jėgos įtaką viso sparno aerodinaminės charakteristikoms, buvo atliekama skaičiuojamosios fluído dinamikos analizė, parenkant papildomą domeną, kuris imituoja propelerių sukimąsi [31]. Tokios analizės pavyzdys pateiktas paveikslėliuose toliau (žr. 33 ir 34 pav.):



33 pav. Domenas, imituojantis kairiojo propelerio generuojamą traukos jėgą



34 pav. Domenas, imituojantis kairiojo propelerio generuojamą traukos jėgą

Sukuriant propelerių generuojamai traukos jėgai imituoti domenai, buvo pasirinkta, kad besisukantys cilindro formos domenai analizėje būtų kaip virtualūs 3D objektai, kad nebūtų blokuojamas sparną aptekantis oro srautas. Šiai analizei atlikti buvo parenkami tokie patys globalaus baigtinių elementų tinklelio parametrai. Lokalus baigtinių elementų tinklelis papildomai buvo sukuriamas propeleriams bei cilindro formos domenams, naudojami tokie patys parametrai kaip ir analizės su nuimtais propeleriais metu.

3.4. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės rezultatai

3.4.1. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės kraštinės sąlygos

Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės metu buvo siekiama kuo tiksliau atkartoti eksperimentinius tyrimus aerodinaminiam vamzdyje. Todėl kraštinės sąlygos yra parenkamos tokios pat visoms toliau pateiktoms skaičiuojamosios fluido dinamikos analizėms, kaip ir

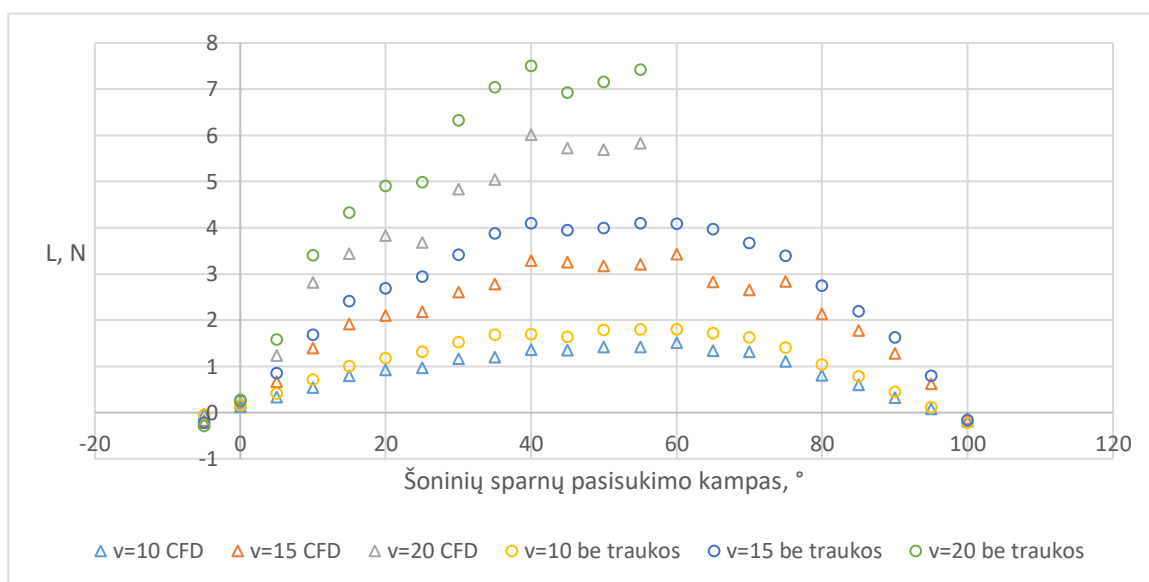
eksperimentinių tyrimų aerodinamiame vamzdyje metu. Kraštinės sąlygos pateiktos lentelėje toliau:

8 lentelė. Skaičiuojamosios fluide dinamikos analizėms naudotos kraštinės sąlygos

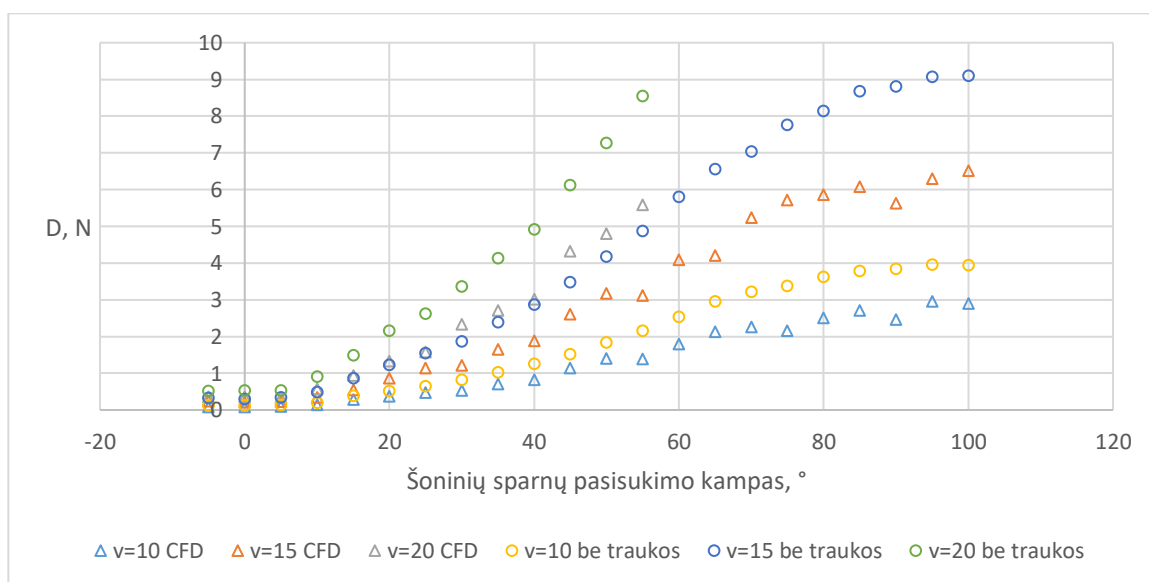
Viso sparno atakos kampas, °	0; 15
Šoninių sparnų pasukimo kampas, °	-5 ÷ 100
Oro srauto greitis, m/s	10; 15; 20
Turbulentiškumas, %	0,2

Toliau pateiktuose skaičiuojamosios fluide dinamikos analizės grafikuose taip pat yra įtraukti eksperimentinių tyrimai aerodinamiame vamzdyje, kad būtų galima vizualiai matyti ir palyginti gautus rezultatus. Grafikuose žymint skaičiuojamosios fluide dinamikos rezultatus, ši analizė žymima trumpiniu CFD (angl. Computational Fluid Dynamics).

3.4.2. Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą

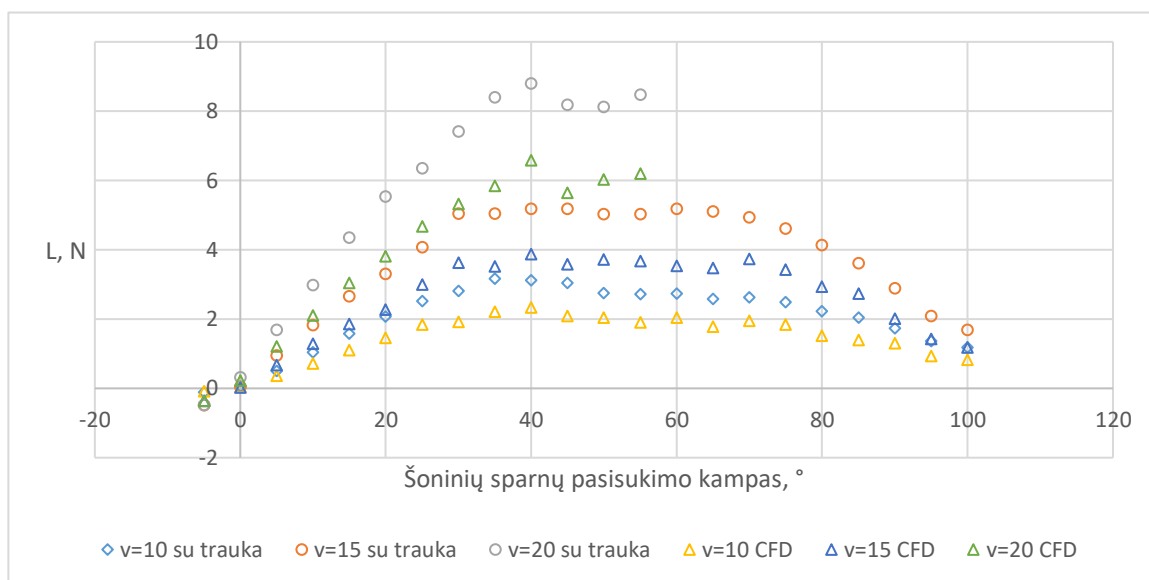


35 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą

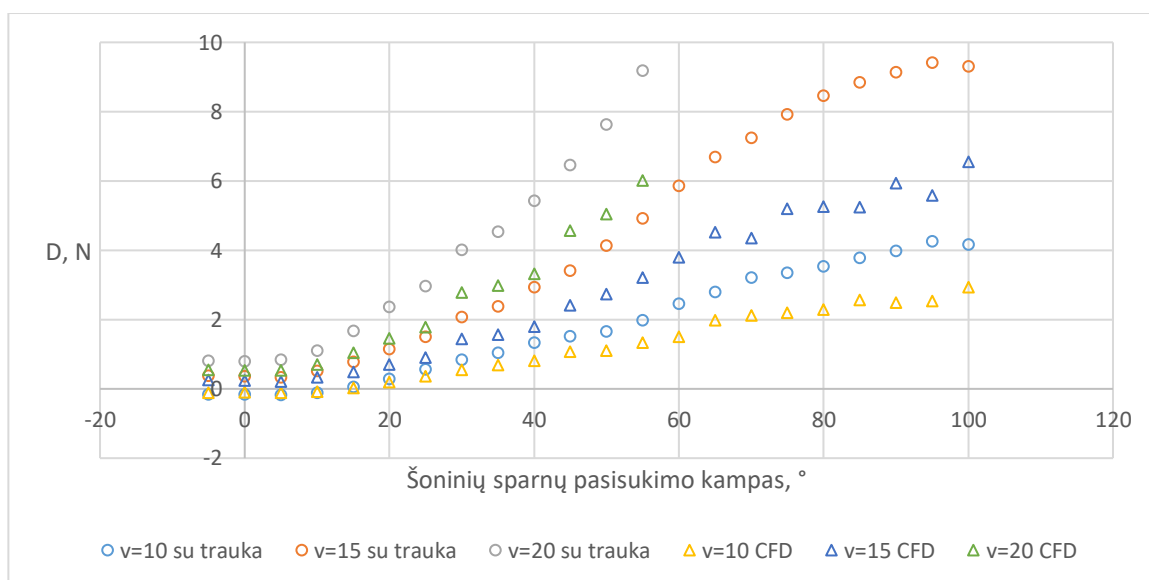


36 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą

3.4.3. Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą

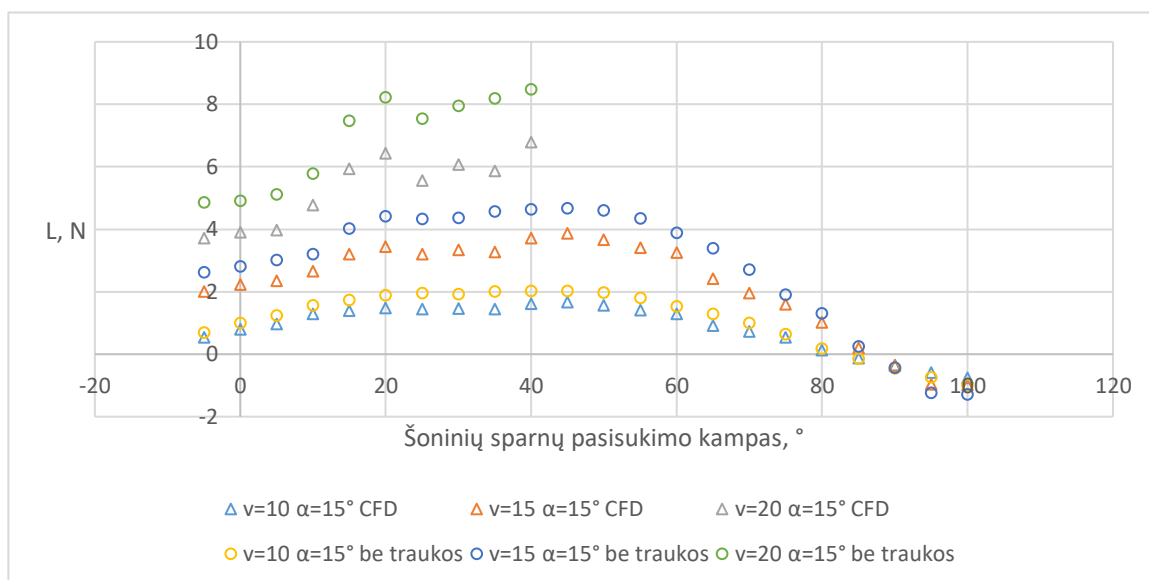


37 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai

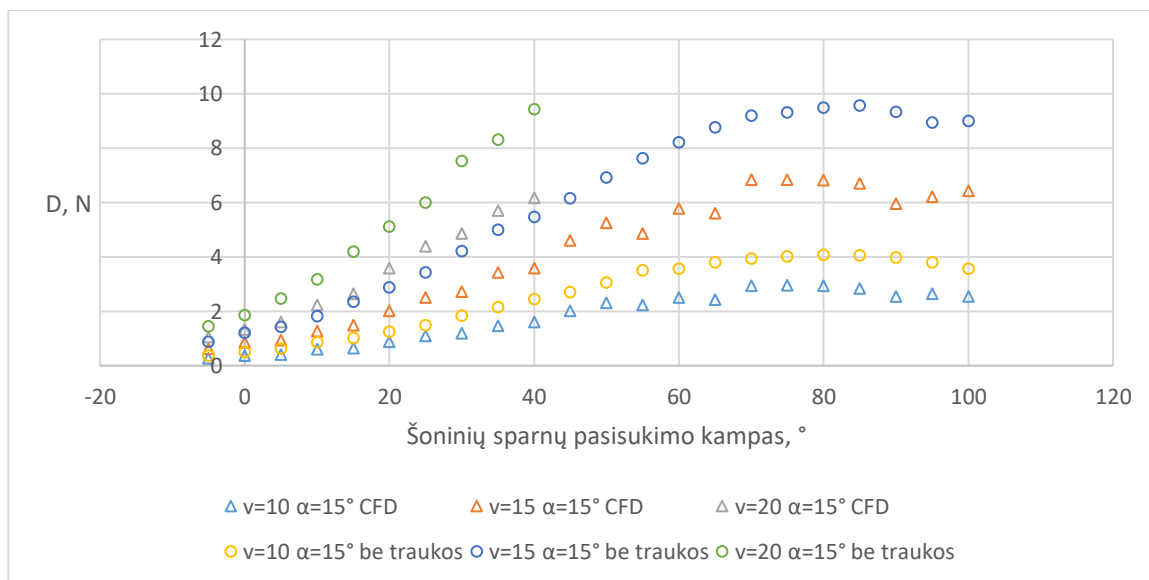


38 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir esant propelerių generuojamai traukos jėgai

3.4.4. Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu

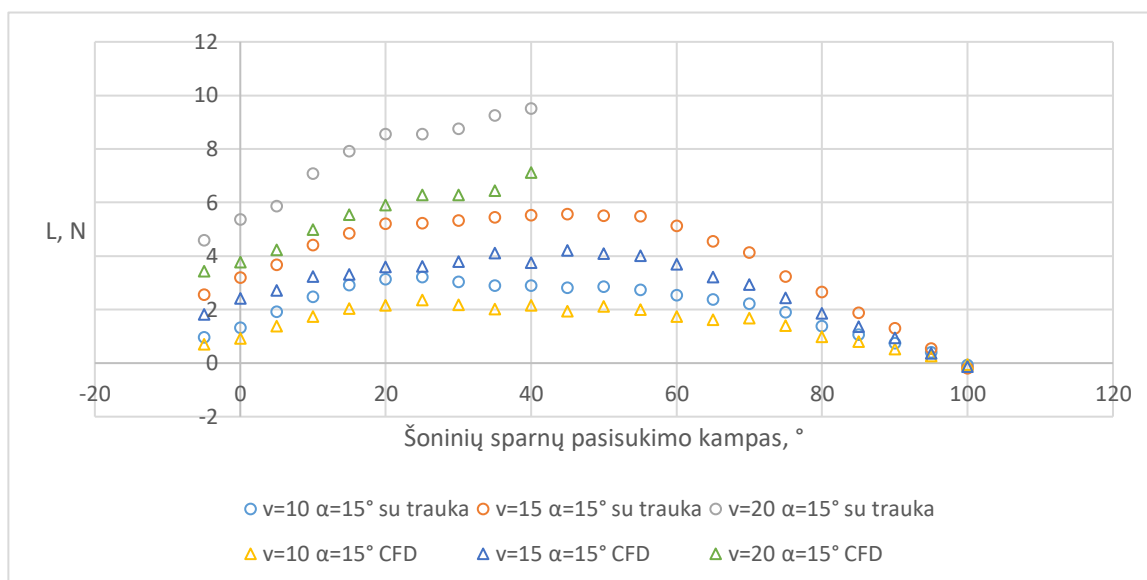


39 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu

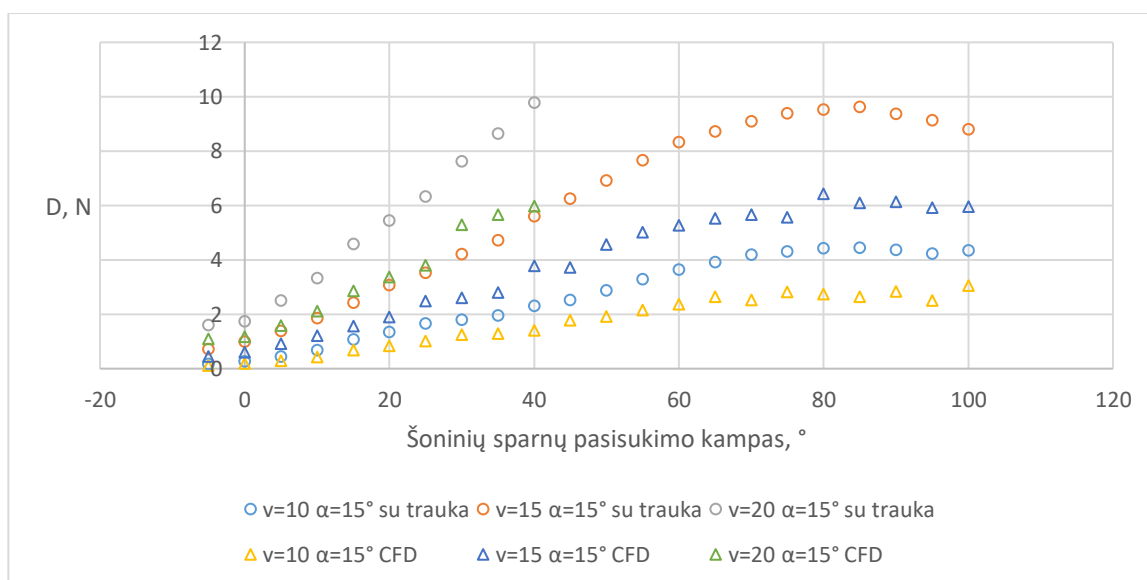


40 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu

3.4.5. Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu ir propeleriai generuoja traukos jėgą



41 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu



42 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos priklausomybė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, esant propelerių generuojamai traukos jėgai ir centrinei daliai pasuktai 15° kampu

3.5. Rezultatų apibendrinimas

Atlikus skaičiuojamosios fluído dinamikos analizę ir rezultatus atvaizdavus grafikuose matoma, kad skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės metu gauti rezultatai nesutampa su eksperimentiniu būdu gautais duomenimis. Visos skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės būdu gautos reikšmės yra mažesnės nei eksperimentiniu būdu gauti duomenys. Rezultatų skirtumas yra normalus reiškinys, kadangi skaičiuojamosios fluído dinamikos analizės programose yra sudėtinga tinkamai perteikti turbulentinius modelius ir minėti modeliai gali būti netikslūs. Netikslumai gali atsirasti dėl skaičiavimo klaidų modeliuojant fluído tėkmę ir baigtinių elementų tinklelio parametrų. Taip pat nėra žinoma ar eksperimentiniu būdu gauti duomenys yra tikslūs.

Tuomet nustatomas didžiausias rezultatų skirtumas procentais kiekvienai sparno modelio konfigūracijai. Didžiausias neatitikimo vertes galima matyti lentelėse toliau (žr. 9 ir 10 lent.):

9 lentelė. Didžiausias keliamosios jėgos reikšmių skirtumas pagal modelio konfigūraciją procentais

Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, %	28,82
Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą, %	31,96
Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu, %	25,86
Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu ir propeleriai generuoja traukos jėgą, %	27,89

10 lentelė. Didžiausias aerodinaminio pasipriešinimo jėgos rezultatų skirtumas pagal konfigūraciją procentais

Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, %	36,86
Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą ir propeleriai generuoja traukos jėgą, %	40,66
Analizė su nuimtais propeleriais keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu, %	32,53
Analizė keičiant šoninių sparnų pasisukimo kampą, kai centrinė dalis pasukta 15° kampu ir propeleriai generuoja traukos jėgą, %	37,96

Taip pat buvo pastebėta tendencija, kad didžiausias skirtumas vyrauja tada, kai yra palyginami aerodinaminio pasipriešinimo jėgos rezultatai bei yra modeliuojama propelerių generuojama traukos jėga.

Išvados

1. Projekte buvo apžvelgti orlaivių aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodai, įsigilinta į skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės specifiką bei apžvelgtas orlaivio su pasukamu sparnu skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės pavyzdys prie įvairių orlaivio konfigūracijų.
2. Kompiuterine programa „SolidWorks“ sudaryti du erdviniai trijų menčių propeleriai pagal fizinio objekto matmenis. Projektuojant propelerius buvo atsižvelgiama, kad fiziniame sparno modelyje buvo parinkti skirtingų kryptų propeleriai. Erdvinio trijų menčių propelerio modelio matmenys: propelerio skersmuo – 78 mm, propelerio eiga – 89,3 mm, propelerio išorinis flanšo skersmuo – 11 mm, montavimo skylės skersmuo – 3 mm.
3. Sudarytas propelerio skaitinis aerodinaminis modelis. Parenkamas globalusis baigtinių elementų tinklėlis bei lokalusis, kuris pritaikomas propelerio erdviniam modeliui siekiant gauti tikslesnius rezultatus. Gautas baigtinių elementų kiekis – 249984 vnt. Baigtinių fluido elementų, kontaktuojančių su propelerio paviršiumi, kiekis – 53125 vnt. Turbulentiškumo lygis parenkamas pagal aerodinaminio vamzdžio charakteristiką, kuris yra 0,2 %. Aplink stacionarų propelerį yra sukuriamas cilindro formos besisukantis oro srauto regionas, kuriuo imituojamas propelerio sukimasis ir tokiu būdu generuojama traukos jėga. Atlikus skaičiuojamosios fluido dinamikos analizę propeleriui buvo nustatyta, kad vieno propelerio kuriama traukos jėga yra lygi 0,254 N.
4. Sukurtas viso sparno su propeleriais ir be jų skaitinis aerodinaminis modelis. Oro srauto domeno matmenys sutapatunami su aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros matmenimis, kurie yra 0,6 x 0,305 x 0,305 m. Skaitiniame modelyje buvo parinktas globalusis baigtinių elementų tinklėlis bei sparno erdviniam modeliui pritaikytas lokalusis, tankesnis baigtinių elementų tinklėlis. Tada baigtinių elementų kiekis – 1273811 vnt. Baigtinių fluido elementų, kontaktuojančių su sparno paviršiumi, kiekis – 590876 vnt. Parinktas turbulentiškumo lygis – 0,2 %. Skaičiuojamosios fluido dinamikos analizė buvo atlikta prie 10, 15 ir 20 $\frac{m}{s}$ oro srauto greičių. Šoninių sparnų pasisukimo kampas buvo keičiamas intervale $-5^{\circ} \div 100^{\circ}$, o centrinė sparno dalis pasukama 0° ir 15° kampu. Gauti analizės duomenys palyginti su eksperimentiniu būdu gautais duomenimis ir nustatyta, kad skaičiuojamosios fluido dinamikos analizės reikšmės yra visada mažesnės. Didžiausias keliamosios jėgos reikšmių skirtumas siekia 31,96 %, o aerodinaminio pasipriešinimo jėgos reikšmių – 40,66 %.

Literatūros sąrašas

1. Syed R. Ahmed, Hans-Joachim Emmelmann, Klaus-Dieter Emmenthal, Helmut Flegl, Werner Gengenbach, Hans Götz, Wolf-Heinrich Hucho, Dietrich Hummel, Görgün A. Necati, Raimund Piatek, Michael Rauser. Aerodynamics of Road Vehicles From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. 1990. ISBN 0-408-01422-9
2. Bin Wang, Weixu Wang, Yongle Li, Fangyuan Lan. Aerodynamic characteristics study of vehicle-bridge system based on computational fluid dynamics. [interaktyvus] 2023. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105351>
3. Hailong Miao, Vahid Dokhani, Yue Ma, Daoming Zhang. Numerical modeling of laminar and turbulent annular flows of power-law fluids in partially blocked geometries. [interaktyvus] 2023. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100930>
4. Adam Kajzer, Jacek Pozorski. The mass diffusive model of Svärd simplified to simulate nearly incompressible flows. [interaktyvus] 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2022.06.016>
5. A. Nawaz, A. Samad, L. Ullah. On the steady laminar boundary-layer flow over the family of rotating tori. [interaktyvus] 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2021.11.005>
6. Benedikt Finke, Marcel Schrader, Arno Kwade, Carsten Schilde. Stress- and process model for dispersing of nanoparticulate suspensions in laminar shear flow. [interaktyvus] 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103574>
7. M. Obligado, M. Bourgoin. Dynamics of towed particles in a turbulent flow. [interaktyvus] 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103704>
8. Niels Trolborg, Niels N. Sørensen, Frederik Zahle. Immersed boundary method for the incompressible Reynolds Averaged Navier–Stokes equations. [interaktyvus] 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2022.105340>
9. E. L. Houghton, P. W. Carpenter, Steven H. Collicott, Daniel T. Valentine. Aerodynamics For Engineering Students, 6th edition 2012. ISBN-13 : 978-0080966328
10. Eduardas Lastauskas. Skrydžio principai, Mokomoji knyga, Vilnius: Technika, 2008. 182p.
11. An Introduction to Computational Fluid Dynamics [interaktyvus] 2007. Prieiga per: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM702/Versteeg_Malalasekera_2ed.pdf
12. Introduction of Computational Fluid Dynamics Wangda Zuo [interaktyvus] Prieiga per: http://wwwmayr.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo_paper.pdf
13. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations Applied to Backward Facing Step - Application of CFD Uncertainty Analysis. [interaktyvus] 2012. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120013081/downloads/20120013081.pdf>
14. Guiquan Wang, Hyungwon John Park, David H. Richter. Effect of computational domain size on inertial particle one-point statistics in open channel flow. [interaktyvus] 2019. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103195>
15. Maokun Ye, Hamn-Ching Chen, Arjen Koop. High-fidelity CFD simulations for the wake characteristics of the NTNU BT1 wind turbine. [interaktyvus] 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126285>
16. Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr., Alan Pope. Low-Speed Wind Tunnel Testing, Third Edition 1999. ISBN 0-471-55774-9

17. Frank Kmak. NASA Ames Research Center Capabilities of the Unitary Plan Wind Tunnel. [interaktyvus] 2015. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170011246>
18. Hakkı Aksoy Enis Turhan Turgut Oznur Usanmaz. The design and analysis of optimal descent profiles using real flight data. [interaktyvus] 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103028>
19. Munk, Max M. Determination and classification of the aerodynamic properties of wing sections. [interaktyvus] 2013. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930080989>
20. Landahl, M. T. A wave-guide model for turbulent shear flow. [interaktyvus] 2013. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19650025921>
21. Jinwen Yang, Yufei Zhang, Haixin Chen, Song Fu. Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator. [interaktyvus] 2020. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106076>
22. David O. Davis. Experimental Investigation of Turbulent Flow Through a Circular-to-Rectangular Transition Duct. [interaktyvus] 1991. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910021792/downloads/19910021792.pdf>
23. Turbulence Modeling Resource. Langley Research Center [interaktyvus]. Prieiga per: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
24. Hasan Çakir. DESIGN AND ANALYSIS OF A VTOL TILT-WING UAV. [interaktyvus] 2020. Prieiga per: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12625557/index.pdf>
25. Deividas Čelkys. Sparno su pasukimo mechanizmu projektavimas ir tyrimas. Kauno technologijos universitetas, 2020.
26. Michael V. Cook. Flight Dynamics Principles. A Linear Systems Approach to Aircraft Stability and Control, Third edition, 2013.
27. 3D printing handbook. [interaktyvus] 2018. Prieiga per: <https://www.electronicsdatasheets.com/datasheet/Original%20Prusa%20i3%20MK3%20user%20manual.pdf>
28. Aerolab „12 x 12“. Educational wind tunnel. [interaktyvus] 2014. Prieiga per: <https://www.electronicsdatasheets.com/datasheet/Original%20Prusa%20i3%20MK3%20user%20manual.pdf>
29. Kwan-Woo Kim, Kwang-Jun Paik, Ju-Han Lee, Soon-Seok Song, Mehmet Atlar, Yigit Kemal Demirel. A study on the efficient numerical analysis for the prediction of full-scale propeller performance using CFD. [interaktyvus] 2021. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109931>
30. Benjamin M. Simmons, David B. Hatke. Investigation of High Incidence Angle Propeller Aerodynamics for Subscale eVTOL Aircraft. [interaktyvus] 2021. Prieiga per: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210014010/downloads/NASA-TM-20210014010.pdf>
31. David Garcia Perez, Patricia Ventura Diaz, Seokkwan Yoon. High-Fidelity Simulations of a Tiltwing Vehicle for Urban Air Mobility. [interaktyvus] 2023. Prieiga per: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220018816/downloads/AIAA_SciTech_David%2BPatricia.pdf