



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Laumžirgio *Aeshna Cyanea* sparno morfologija ir mechaninis
elgesys: eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas**

Baigiamasis magistro projektas

Kamilė Gabrielė Zurlytė
Projekto autorė

Dr. Rimvydas Gaidys
Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Laumžirgio *Aeshna Cyanea* sparno morfologija ir mechaninis elgesys: eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Kamilė Gabrielė Zurlytė

Projekto autorė

Dr. Rimvydas Gaidys

Vadovas

Recenzentas

Prof. Dr. Artūras Keršys

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kamilė Gabrielė Zurlytė

Laumžirgio *Aeshna Cyanea* sparno morfologija ir mechaninis elgesys: eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas

Akademinio 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) intelektinės 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.

Kamilė Gabrielė Zurlytė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Kamilė Gabrielė Zurlytė

1. Projekto tema

Laumžirgio Aeshna Cyanea sparno morfologija ir mechaninis elgesys: eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas

(Lietuvių kalba)

Morphology and Mechanical Behaviour of Dragonfly Aeshna Cyanea Wing: Experimental Investigations and Simulation

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti laumžirgio priekinio sparno mikro struktūrą ir dinamines savybes

Uždaviniai:

- Ištirti laumžirgio priekinio sparno morfologiją.
- Atlikti laumžirgio sparno eksperimentinius tyrimus: keliamosios galios, SEM, dinamikos.
- Sudaryti laumžirgio sparno matematinį ir skaitinį modelį.
- Atlikti sparno dinamikos modeliavimą.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projekto metu nustatoma laumžirgio keliamoji galia, eksperimentiniu būdu nustatomas sparno rezonansinis dažnis, venų plotis, jų tinklas, bei sparno plotas.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorė	Kamilė Gabrielė Zurlytė (Vardas, Pavardė)	2024-02-15 (Data)
Projekto vadovas	Rimvydas Gaidys (Vardas, Pavardė)	2024-02-15 (Data)
Krypties studijų programų vadovas	Prof. Dr. Artūras Keršys (Vardas, Pavardė)	2024-02-15 (Data)

Kamilė Gabrielė Zurlytė. Laumžirgio *Aeshna Cyanea* sparno morfologija ir mechaninis elgesys: eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Dr. Rimvydas Gaidys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: laumžirgis, *Aeshna Cyanea*, morfologija, SEM, dinamika.

Kaunas, 2024. 66 p.

Santrauka

Šio baigiamojo projekto metu buvo aptartas bionikos pritaikymas aviacijoje, skraidančių mikroaparatus panaudojimas civilinėms ir karinėms reikšmėms. Literatūros apžvalgoje buvo aptarta laumžirgio kūno ir sparno anatomija, sparne esantis baltymas – resilinas, kuris sparnui prideda elastiškumą. Taip pat buvo aprašytos gyslas ir membraną sudarančios medžiagos ir jų savybės. Laumžirgio biologijos, laumžirgio skrydžio fizikos ir laumžirgio sparno skaitinių modelių skyreliuose buvo aptarti kitų mokslininkų atlikti tyrimai susiję su šio tyrimo metu tirtais aspektais.

Teorinėje šio projekto dalyje buvo aprašytos aerodinamikos formulės, kuriomis galima aiškinti laumžirgio skrydį, Navier – Stokes lygtys aiškinančios skysčių ir dujų tekėjimą, sparno morfologijos geometrinio modelio sudarymo metodai ir algoritmai, baigtinių elementų metodas, deformacijos bei skysčio ir deformuojamo kūno sąveika.

Vienas iš šio projekto metu atliktų tyrimų – skenuojančio elektronų mikroskopo tyrimas atliktas priekiniam laumžirgio *Aeshna Cyanea* sparnui. Šio tyrimo metu buvo stebimos įvairios sparno zonos: šaknis, mechanosensoriai, priekinė kraštinė gysla ir ją sudaranti dantyta struktūra, mazgelis, bei įvairios gyslos.

Projekto metu buvo sudarytas matematinis ir skaitinis priekinio laumžirgio sparno modelis. Buvo atlikta statinė sparno modelio analizė, kurios metu gysloms buvo pritaikytos α chitino savybės, o membranai – membranos savybės rastos literatūros šaltiniuose. Sparno šaknis buvo įtvirtinta standžiai, sparno priekinė kraštinė gysla nuo mazgelio sparno gali link buvo apkrauta 6,7 N jėga. Atlikus analizę buvo nustatyta, jog didžiausi mazgelio patirti poslinkiai buvo 0,66 mm, o didžiausi įtempiai – 6,98 MPa.

Kito atlikto tyrimo metu buvo siekiama nustatyti pirmąjį sparno rezonansinį dažnį dvejais tyrimais – smūginiu ir priverstinio sužadinimo. Tyrimas buvo atliekamas su dvejais tos pačios rūšies laumžirgio sparnais. Abiejų tyrimų rezultatai buvo panašūs - pirmojo sparno nustatytas pirmasis rezonansinis dažnis smūginiu metodu – 81,57 Hz, priverstinio žadinimo metodu – 78,67 Hz, tuo tarpu antrojo sparno rezultatai atitinkamai 101,57 Hz ir 96,15 Hz. Šio tyrimo metu nustatyta jog vieno sparno pirmasis rezonansinis dažnis neapibūdina visos rūšies rezultatų, tačiau galima gauti pakankamai aiškų dažnių intervalą priklausomai nuo sparno ploto.

Paskutinis šio projekto tyrimas buvo skirtas ištirti laumžirgio sukuriamą jėgą skrydžio metu ir jos kitimą laike (keičiantis skrydžio ciklui). Atlikus tyrimą galima teigti, jog laumžirgio masė neturi tiesioginės įtakos sukuriamai jėgai, nes mažiausios masės laumžirgis sukūrė didžiausią jėgą, o antras

pagal masę laumžirgis sukūrė antrą pagal dydį jėgą. Taip pat galima teigti jog mechaniniai sparno pažeidimai daro didelę įtaką laumžirgio sukuriamos jėgos dydžiui skrydžio metu.

Šiuo baigiamuoju projektu buvo siekiama ištirti įvairias laumžirgio sparno mechanines savybes ir galimą pritaikymą skraidančių mikroaparatų kūrimui ateityje.

Kamilė Gabrielė Zurlytė. Morphology and Mechanical Behaviour of Dragonfly Aeshna Cyanea Wing: Experimental Investigations and Simulation / supervisor PhD Rimvydas Gaidys; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: dragonfly, Aeshna Cyanea, morphology, SEM, dynamics.

Kaunas, 2024. 66.

Summary

This final project focused on the application of bionics in aviation, and the use of micro aerial vehicles for civil and military applications. The literature review discussed the anatomy of the dragonfly body and wing, and the protein resilin in the wing that adds elasticity to it. The materials and properties of the veins and membrane were also described. The sections on dragonfly biology, the physics of dragonfly flight and numerical models of the dragonfly wing discussed research carried out by other scientists on aspects of the dragonfly wing that were investigated in this study.

The theoretical part of this project described the aerodynamic formulae that can be used to explain dragonfly flight, the Navier-Stokes equations that explain the flow of liquids and gases, the methods and algorithms used to construct a geometric model of the wing's morphology, the Finite Element Method, deformation and the interaction between a fluid and a deformable body.

One of the studies carried out in this project is a scanning electron microscope study on the forewing of the dragonfly Aeshna Cyanea. During this study, various areas of the wing were observed: the root, the mechanosensors, the leading-edge vein and its serrated structure, the nodus, and various veins.

The project led to the development of a mathematical and numerical model of the dragonfly forewing. Static analysis of the wing model was carried out by applying the properties of α chitin to the veins and the properties of the membrane found in the literature to the membrane. The wing root was rigidly fixed and the wing leading-edge vein was loaded with a force of 6,7 N from the nodus towards the wing tip. The analysis showed that the maximum displacements were 0,66 mm and the maximum stresses were 6,98 MPa.

The next study was carried out to determine the first resonant frequency of the wing by two tests: impact, and forced excitation. Two dragonfly wings of the same species were tested. The results of the two tests were similar, with the first wing having a first resonant frequency of 81,57 Hz by the impact method and 78,67 Hz by the forced excitation method, while the second wing had 101,57 Hz and 96,15 Hz respectively. In this study, it was found that the first resonant frequency of one wing is not representative of the overall performance of the species, but a reasonably clear range of frequencies can be obtained depending on the wing area.

The last study of this project was to investigate the force generated by a dragonfly during flight and its variation with time (with the change of the flight cycle). The study shows that the mass of the dragonfly has no direct influence on the force generated, as the dragonfly with the lowest mass generates the highest force and the dragonfly with the second highest mass generates the second

highest force. It can also be argued that mechanical damage to the wing has a significant effect on the magnitude of the force generated by the dragonfly during flight.

This final project aimed to investigate the different mechanical properties of the dragonfly wing and its possible application for the development of micro aerial vehicles in the future.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	12
Įvadas	13
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Bionikos pritaikymas aviacijoje	14
1.2. Laumžirgio skrydis	15
1.2.1. Baltymai.....	16
1.2.2. Membrana	16
1.2.3. Jungtys ir gyslos	17
1.2.4. Laumžirgio biologija	19
1.2.5. Laumžirgio skrydžio fizika	23
1.3. Laumžirgio sparno skaitiniai modeliai	29
2. Teorinė dalis	32
2.1. Aerodinamika	32
2.2. Baigtinių elementų metodas	33
2.3. Deformacijos.....	33
2.4. FSI.....	34
3. Laumžirgio sparno SEM tyrimas	36
3.1. Naudota aparatūra ir bandinio paruošimas	37
3.2. SEM tyrimo rezultatai.....	38
4. Laumžirgio sparno matematinis ir skaitinis modelis	42
4.1. Laumžirgio sparno matematinis modelis	42
4.2. Laumžirgio sparno skaitinis modelis	44
5. Sparno dinamikos tyrimas	49
6. Eksperimentinis tyrimas	54
6.1. Eksperimentiniam tyrimui atlikti naudota įranga	54
6.2. Eksperimentinio tyrimo metu rastų laumžirgio rūšių aptarimas.....	54
6.3. Eksperimentinio tyrimo eiga ir rezultatai	56
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60
1 Priedas.....	65

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Chitino mechaninės savybės, remiantis skirtingų autorių duomenimis	18
2 lentelė. Sparno modelio išmatavimai	44
3 lentelė. Sparno gyslų savybės pritaikytos modelyje.....	45
4 lentelė. Sparno membranos savybės pritaikytos modelyje.....	45
5 lentelė. Statinės analizės rezultatai.....	46
6 lentelė. Sugautų laumžirgių rūšys	55
7 lentelė. Tirtų laumžirgių parametrai	58
8 lentelė. Tirtų laumžirgių parametrai	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Vabzdžio fiziologija įkvėptas robotas[3].....	15
2 pav. JAV karinių oro pajėgų mikrodronai [6]	15
3 pav. Vabzdį apšvietus ultravioletine šviesa, gyslose matomas resilinas[14]	16
4 pav. Laumžirgio sparno membranos sluoksniai, priartinti a – 20 000 kartų ir b - viršutinis membranos sluoksnis, priartintas 80 000 kartų [15].....	17
5 pav. Mazgelis priekinio sparno venose [9].....	18
6 pav. Laumžirgio kūno struktūra	19
7 pav. laumžirgio sparno struktūra	19
8 pav. Laumžirgio priekinio sparno gyslos ir jungtys. (a) tirta laumžirgio <i>Sympetrum vulgetum</i> sparnas su preliminariomis tyrimo vietomis; (b) sparno priekinės gyslos kraštas; (c) mazgelis; (d) sparno galas; (e) jungtis; (f) apatinis sparno kraštas; (g) sparno paviršius netoli sparno galo [30] .	20
9 pav. Sparno mechaniniai pažeidimai, tirti SEM metodu. <i>S. Sympetrum</i> sparno patirti plastiškumo (A), nusidėvėjimo (B), kirpimo (C) ir lenkimo (D-G) pažeidimai tirti elektronų mikroskopu. H – apytikslės padėtytys. Mastelis: 100 μm (A, D, E), 1 mm (B, C, F), 500 μm (G), 1 cm (H) [11].....	21
10 pav. SEM metodu tirta sparno mazgelio rezultatai. a stulpelyje stebimas <i>Acisoma panorpoides</i> laumžirgio mazgelis, b – <i>Brachythemis contaminata</i> , c – <i>Crocothemis servilia</i> , d stulpelyje – <i>Pantala flavescens</i> . Baltos rodyklės rodo mazgo formos struktūrą priekinio sparno nugarinėje pusėje (ai, bi, ci, di) ir galiniame sparne (aiii, biii, ciii, diii), mazgelis nematomas priekinėje pusėje (aii, aiv, bii,biv, cii, civ, dii, div). <i>Servilia</i> (ci, ciii), bet ne <i>P. flavescens</i> (di, diii) sparnuose. a – priekinė sparno pusė; b – proksimalinė sparno pusė; d – distalinė sparno pusė; p – galinė sparno pusė. Mastelis: 20 mm (aiv); 50 mm (biv, civ, div) [28].	22
11 pav. Resilino kiekis mazgelyje tirtas greito skenavimo lazeriniu mikroskopu. <i>A. panorpoides</i> (a), <i>B. contaminata</i> (b), <i>C. servilia</i> (c) ir <i>P. flavescens</i> (d) priekinių (ai, bi, ci, di) ir galinių (aiii, biii, ciii, diii) sparnų mazgų vaizdai. aii, bii, cii, dii vaizduoja priekinio sparno pjūvį, aiv, biv, civ, div – galinio sparno pjūvį.	23
12 pav. Laumžirgio sparno aerodinaminių savybių tyrimas. Skirtingos aplinkos spalvos žymi skirtingus sparną aptekančio oro greičius	24
13 pav. Sūkurių struktūros prie 115 ms (A ir B), 118 ms (C ir D), 122 ms (E ir F) ir 125 ms (G ir H). Sūkurių kontūras ir srauto linijos prie 115 ms (I) ir 122 ms (J)	25
14 pav. Laumžirgio pilvelio deformacijos skrydžio metu. A – vaizdas stebint iš priekio, B – stebint iš apačios.....	26
15 pav. Tiriami skerspjuviai, skerspjuvis nr. 1 – arčiau sparno šaknies, skerspjuvis nr. 2 – arčiau sparno galo	27
16 pav. Pirmojo, antrojo skerspjuvių ir plokštelės keliamosios ir pasipriešinimo jėgų priklausomybės nuo atakos kampo [37].....	27
17 pav. Oro srauto aptekėjimas (priekinio sparno pjūvis) esant įvairiems atakos kampams	28
18 pav. Atlikto tyrimo rezultatai, a-f paveikslai vaizduoja sparno judėjimo metu sukuriamus sūkurius [44].....	29
19 pav. Keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų priklausomybės nuo laiko, kai $Re = 1000$, o atakos kampas – $12,5^\circ$	30
20 pav. Tyrimo metu sudarytas 6 skirtingų tankių tinklelis [48]	31
21 pav. Pilnai susietos sistemos ir nesusietos sistemos metodų schemas, kur S^f ir S^s atitinkamai žymi skysčio ir struktūros sprendinius [56].....	34
22 pav. SEM veikimo principas	36

23 pav. SEM sandara.....	37
24 pav. SEM tyrimo darbo standas: 1 – kompiuteris, 2 – skenuojantis elektronų mikroskopas, 3 – tyrimo bandinys	38
25 pav. SEM tiriamos zonos: 1 – pagrindinė gysla, 2 – gyslų persidengimas, 3 – mazgelis, 4 – sparno šaknis, 5 – mechanoreceptoriai, 6 – gyslų susijungimas, 7 – gyslų išsiliejimas.....	38
26 pav. Laumžirgio priekinio sparno šaknis ir mechanoreceptoriai	39
27 pav. Pagrindinė priekinio sparno gysla bei dantiyta jos struktūra.....	40
28 pav. Priekinio sparno mazgelio ir gyslų sujungimų SEM vaizdas.....	40
29 pav. Neredukuotas sparno modelis, raudonos linijos žymi gyslas, kurios yra paliekamos redukuotame sparno modelyje	44
30 pav. Sparno modelis su įtvirtinimu, tinkleliu ir apkrova. Raudonu stačiakampiu pažymėtas mazgelis	46
31 pav. Analizės metu nustatyti poslinkiai.....	47
32 pav. Analizės metu nustatyti įtempiai	46
33 pav. Mazgelio skaičiuojamoji schema	47
34 pav. Mazgelio poslinkis.....	48
35 pav. Mazgelio įtempiai.....	48
36 pav. Virpesių tyrimo darbo standas.....	49
37 pav. Pirmojo sparno smūginio bandymo rezultatai, mėlyna kreivė žymi natūralius sparno virpesius, brūkšninės vertikalios linijos žymi svyravimo viršūnes	50
38 pav. Antrojo sparno smūginio bandymo rezultatai, mėlyna kreivė žymi natūralius sparno virpesius, brūkšninės vertikalios linijos žymi svyravimo viršūnes	51
39 pav. Pirmojo sparno priverstinio žadinimo bandymo rezultatai, brūkšninės vertikalios linijos žymi atstumą tarp svyravimo viršūnių, brūkšninė horizontali linija žymi sparno svyravimo viršūnes	52
40 pav. Antrojo sparno priverstinio žadinimo bandymo rezultatai, brūkšninės vertikalios linijos žymi atstumą tarp svyravimo viršūnių, brūkšninė horizontali linija žymi sparno svyravimo viršūnes	53
41 pav. Eksperimentinio tyrimo stovas	54
42 pav. Rastų laumžirgių rūšys	56
43 pav. Laumžirgio sukuriamos jėgos kitimo laike grafikas	57

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

LEV – priekinė kraštinė gysla (angl. *Leading-edge vein*)

MAV – skraidantis mikroaparatas (angl. *Micro Aerial Vehicle*)

FSI – skysčio ir deformuojamo kūno sąveika (angl. *Fluid-Structure interaction*)

Įvadas

Žmogus jau ilgą laiką semiasi idėjas iš gamtos tam, kad palengvintų savo gyvenimą [1]. Natūralūs procesai vykstantys gamtoje yra mimikuojami ir pritaikomi įvairiose srityse jau daugiau, nei 100 metų. Žmogus pastebėjęs jam įdomų procesą bando išsiaiškinti jo veikimo principus ir pritaikyti savo naudoms. Taip paukščio skrydis įkvėpė žmones sukurti lėktuvą [2].

Biomimikrijos mokslo taikymas kasmet vis labiau populiarėja. Uodas įkvėpė sukurti mažiau skaudžias adatas, banginio pelekai įkvėpė mokslininkus sukurti vėjo jėgaines, o ryklio oda – olimpinis kostiumus plaukikams [1].

Laumžirgis yra vienas ir geriausių pasaulio grobuonių pasižymintis galimybe sklęsti, kristi atbulai, kyboti vietoje ir staigiai keisti savo skrydžio trajektoriją. Šis skrydžio modelis įkvėpė tyrėjus gilintis į laumžirgio morfologiją ir skrydžio principus.

Pastaruosius kelis dešimtmečius laumžirgio ir kitų skraidančių vabzdžių tyrimai vyko gan intensyviai, tačiau mokslininkų atliekančių inžinerinius tyrimus būtent su laumžirgiais nėra itin daug. Didelė dalis tyrimų žvelgia į laumžirgį iš biologijos mokslo pusės.

Laumžirgio skrydžio trajektorijos, jo itin staigūs ir tikslūs skrydžio krypties pakeitimai gali padėti ne tik civiliniame pasaulyje, tačiau ir karinėse misijose – toks mažas skraidantis aparatas gali puikiai pasitarnauti vietose kurios yra sunkiai prieinamos žmogui, aplinkos, kurios yra žmogui tiesiog neišgyvenamos, ar fronto stebėjimui karinėse misijose.

Tyrimo tikslas – iširti laumžirgio priekinio sparno mikrostruktūrą ir dinamines savybes.

Tyrimo uždaviniai:

1. iširti laumžirgio priekinio sparno morfologiją;
2. atlikti laumžirgio sparno eksperimentinius tyrimus: keliamosios galios, SEM, dinamikos;
3. sudaryti laumžirgio sparno matematinį ir skaitinį modelį;
4. atlikti sparno dinamikos modeliavimą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Bionikos pritaikymas aviacijoje

Nuo seniausių laikų žmonės, matydami gamtos reiškinius ir aplinkinį pasaulį, stengėsi atkurti stebimus dalykus. Žmonija naudojosi žemės suteiktais ištekliais, norėdama patenkinti kasdienius savo poreikius, tačiau tik palyginti neseniai į gyvuosius organizmus ir jų išgyvenimo metodus buvo pradėta žiūrėti iš inžinerinės pusės [3].

Yra išskiriamos bent trys aviacijos kryptys, grįstos bionikos tyrimais:

- sklandytuvų ir parasparnių modeliavimas, remiantis paukščio skrydžiu;
- konstrukcijos su stacionariais sparnais bei ornitopterai;
- bepiločių skraidyklių, bei skraidančių mikroaparatus kūrimas ir modeliavimas, remiantis skraidančių vabzdžių fiziologija ir skrydžiu [3].

Aviacijos įmonės siekia orlaivius konstruoti kuo greičiau ir pigiau. Tačiau ilgainiui kainoms, darbuotojų uždarbiui, tai daryti darosi vis sunkiau. Nėgana to, norima orlaivius padaryti dar labiau aptakius, naudojant naujas medžiagas, kurios ne tik sumažintų orlaivio masę, bet ir būtų pigesnės. Šias problemas išspręsti galima atliekant bionikos tyrimus [3].

Bionika – mokslas, tiriantis gyvojo pasaulio organizmų struktūrą ir gyvybinės veiklos principų panaudojimą technikoje. Idėją panaudoti gyvąjį pasaulį mokslui iškėlė Leonardo da Vinci, bandydamas sukurti sparnais mosuojantį skraidymo aparatą [4].

Nors L. da Vinci sukurta skraidanti mašina niekada ir neskraidė, įvairūs paukščiai ir žinduoliai, pvz., rajos, šikšnosparniai, įkvėpė tobulinti technologijas. JAV aviacijos ir kosmoso pramonės inžinieriai sukūrė 150 – 600 mm ilgio dronų prototipus, galinčius įskristi ir išskristi iš ankštų vietų miestuose. Jų paslaptis – žuvėdrų įkvėpti sparnai, kurie vos vienu nuotolinio valdymo pulto mygtuko paspaudimu skrydžio metu gali stipriai pakeisti formą, o tai lemia dronų stabilumą ir judrumą. Iš paukščių bei jūros gyvūnų galima išmokti, kaip naudoti ir perduoti energiją. Venos ir arterijos kūne yra išdėstytos paraleliai arba sujungtos šuntu, o arterijomis tekantis šiltesnis kraujas sušildo vėsesnį veninį kraują [5].

Delfinai ir šikšnosparniai turi integruotą biologinę sonarinę technologiją, kuri yra gerokai pažangesnė už bet kokią žmogaus išrastą. Šie gyvūnai naudoja sonarą, kad atskirtų ir atpažintų objektus ir jų savybes. Mokslininkai įrašinėja šikšnosparnių echolokacinius garsus ir tikisi, kad tokios technologijos turės didelį poveikį medicinoje ir geologiniame vaizdavime, daugiausia dėmesio skiriant medžiagų apibūdinimui ir neardomajam vertinimui. Tai ypač gali praversti ieškant naftos, dujų ir kitų gamtinių išteklių uolienų mėginiuose [5].

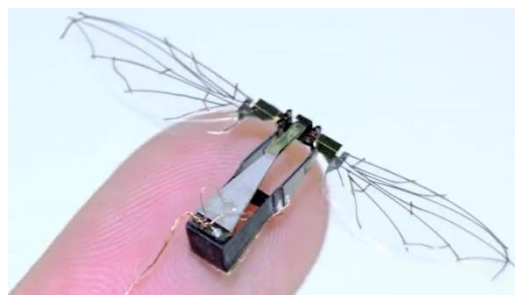
Tyrėjai iš Pitsburgo universiteto sukūrė nedidelį, vabzdžio fiziologijos įkvėptą robotą (1 pav.), kuris gali atlikti užduotis sunkiai pasiekiamose ir neišgyvenamose aplinkose. Robotas sukaupia energiją, vėliau ją išleidžia impulsu ir taip juda į priekį. Išlenktas polimerinis kompozitas leidžia kaupti energijai, kai yra maitinamas. Kuriant kompozite esančių molekulių išdėstymo būdą, įkvėpimo semtasi iš gamtos pasaulio, kur jų bendras veikimas sukuria energiją struktūroje. Tai pasiekama

naudojant ne daugiau kaip kelis voltus elektros energijos. Šis aparatas buvo sukurtas iškelus problemą, kad dirbtiniai raumenys veikia gana lėtai [6].



1 pav. Vabzdžio fiziologija įkvėptas robotas[3]

Bepiločiai skraidantys aparatai vis dažniau naudojami karinėse operacijose, norint apsaugoti žmonių gyvybes ar, kaip minėta anksčiau, skristi į sunkiai prieinamas ar išgyvenimui nepritaikytas terpes [7]. Jungtinių Amerikos Valstijų karinės oro pajėgos sukūrė skraidančių vabzdžių skrydžiu grįstą mikrodroną (2 pav.), kuris galimai bus naudojamas stebėti, oro operacijoms bei fronto informacijai perduoti [8].



2 pav. JAV karinių oro pajėgų mikrodronei [6]

Laukinė gamta ir organizmai yra didžiulė žinių ir įkvėpimo terpė tyrėjams ir inžinieriams, suteikianti galimybę bionikos mokslui vystytis itin greitai. Atliekamų tyrimų rezultatai pasižymi patobulintomis savybėmis ir didesniu efektyvumu, palyginti su klasikiniiais inžineriniais sprendimais. Be to, naujai atliekami tyrimai pasižymi aplinkosauga ir ekologija. Panašu, jog bionika grįstų inžinerinių sprendimų ateityje bus matoma vis daugiau [3].

1.2. Laumžirgio skrydis

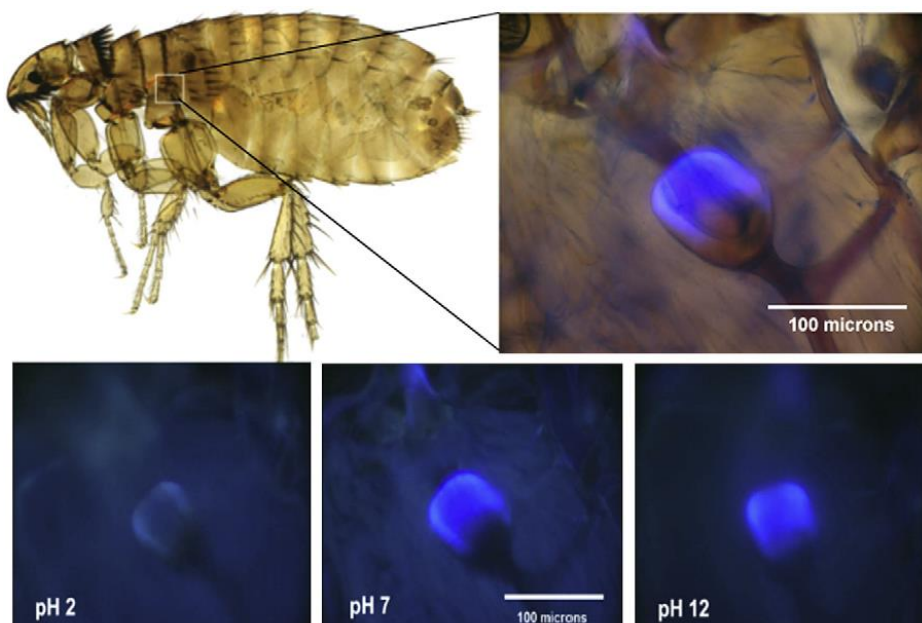
Laumžirgiai – vieni geriausių medžiotojų, turintys 97 proc. tikimybę sugauti savo grobį [9]. Tokių itin gerų rezultatų pavyksta pasiekti dėl vabzdžio skrydžio ir ypatingų sparnų. Kaip ir kitų skraidančių vabzdžių, laumžirgio sparnai yra sudaryti iš membranos ir gyslų. Tačiau laumžirgiai iš kitų vabzdžių išsiskiria savo sudėtinga sparnų struktūra [10]. Skraidančių vabzdžių sparnai yra skirti ne tik skristi, tačiau ir kovoti, gintis, termoreguliacijai, maistui ir vandeniui rinkti ir t.t. Sparnai dažnai sudaro iki 1 – 6 proc. bendros vabzdžio kūno masės [11]. Sparno storis kai kuriose vietose nesiekia net 0,5 μm [12].

Laumžirgio sparno struktūrinius komponentus pagal jų funkcijas galima suskirstyti į dvi dalis: atraminius ir mobilizuojančius. Atraminiai elementai yra tie, kurie užtikrina atramą sparnui ir sutvirtina jo konstrukciją nuo lenkimo ir sukimo. Sustiprintos sparnų sritys, gyslos, membrana ir su sąnariais susilieję spygliukai yra atraminiai elementai. O štai mobilizuojantys elementai yra tie, kurie pagerina sparno deformuojamumą. Manoma, kad šie elementai atlieka svarbų vaidmenį laumžirgių

skrydžio metu, nes padidina aerodinaminės keliamosios jėgos kūrimą. Abiem grupėms galima priskirti ir kai kuriuos kitus sparno komponentus. Vienas iš pavyzdžių yra sparno raukšlėtumas. Nelygumas padidina sparno standumą lenkiant, taip pat palengvina jo deformacijas, kai sparnas yra sukamas. LEV (angl. *leading edge vein*) ir gyslų ultrastruktūra – tai kiti sparno komponentai, kurių funkcija iš esmės tokia pati, kaip ir sparno raukšlėtumas [13].

1.2.1. Baltymai

Kai kurių vabzdžių sparnuose randamas hidrofilinis baltymas – resilinas. Šis baltymas yra labai elastingas. Laumžirgių venų sąnariai anksčiau buvo klasifikuojami į standžius ir lanksčius pagal resilino pasiskirstymą juose. Vėliau sąnariai buvo pradėti klasifikuoti pagal resilino kiekį laumžirgių sparnuose, juos tiriant fluorescencine mikroskopija. Resilinas yra elastomeras, esantis daugumos vabzdžių odelėje, ir pirmą kartą buvo aprašytas Weis Fogh praėjusio amžiaus septintojo dešimtmečio pradžioje. Jį sudaro atsitiktinai orientuotos susuktos polipeptidinės (amino rūgščių) grandinės, kurios pasižymi dideliu lankstumu ir elastingumu. Atliekant biologinius tyrimus, buvo rasta kad, veikiant ultravioletinei šviesai, resilinas yra matomas mėlyna spalva, o tai padeda nustatyti tikslią medžiagos vietą ir jos kiekį vabzdžio sparne (3 pav.) [14].



3 pav. Vabzdį apšvietus ultravioletine šviesa, gyslose matomas resilinas[14]

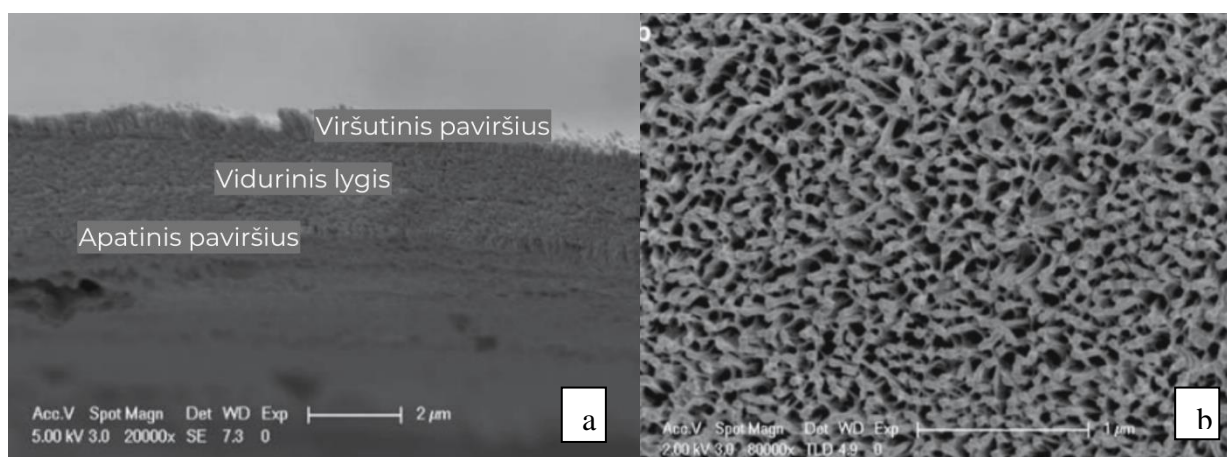
Resilinas pasižymi į gumą panašiomis fizinėmis savybėmis, tokiomis kaip mažas standumas, didelis plastiškumas, puikus elastingumas ir didelė nuovargio trukmė. Taip pat resilinas puikiai slopina mechaninius smūgius [15]. Ši medžiaga pasižymi mažu standumu (Jungo modulis – 0,6–2,0 MPa), gali išsitempti iki 3 kartų nuo savo pradinio ilgio bei turi didelę nuovargio ribą – daugiau nei 300 mln. darbo ciklų. Taip pat pasižymi dideliu atsparumu karščiui ir dirgikliams [16].

1.2.2. Membrana

Vabzdžių sparnų membrana daugiausia yra sudaryta iš struktūrinių baltymų. Tyrejai nurodė, kad dauguma vabzdžių sparnų membranų skrydžio metu smarkiai lenkiamos ir sukamos ir tai gali pakeisti

aerodinaminės jėgos susidarymo kryptį ir dydį. Sparnų membranų deformacijos padidina traukos susidarymą ir sukuria jėgos asimetriją tarp pusės plasnojimo judesio. Tai gali padidinti keliamąją jėgą, nes sparnai susisuka ir sukuria aukštyn nukreiptą jėgą per visą plasnojimo ciklą. Todėl sparno membranos medžiagos ir mechaninės savybės, taip pat sparno gyslų ir venų savybės lemia, kaip sparno forma keisis reaguojant į patirtas jėgas [17].

Be to, membrana yra ne tik kliūtis orui sklisti per sparną, bet, bent jau kai kuriose vietose, atlieka struktūrinį vaidmenį, kaip įtempta oda, standinanti sparną. Membranos sluoksniai parodyti 4 paveiksle.



4 pav. Laumžirgio sparno membranos sluoksniai, priartinti a – 20 000 kartų ir b - viršutinis membranos sluoksnis, priartintas 80 000 kartų [15]

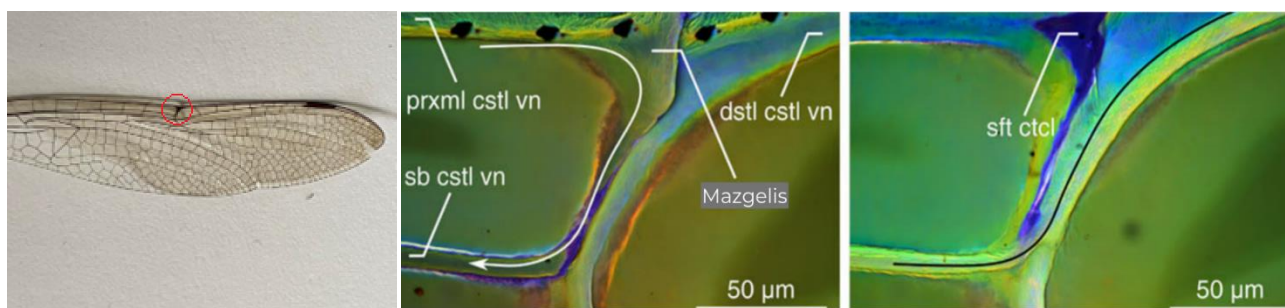
Tačiau pagrindinės membranos savybės nėra labai gerai ištirtos. Pavyzdžiui, membranos Jungo modulis, išmatuotas tempimo bandymo metodu, buvo apie 1 GPa, o nustatytas nanoindentavimo metodu – apie 1,5 GPa. Tikslūs membranos mechaninių savybių matavimai iki šiol lieka neiškūs, nors pastaraisiais metais buvo atlikta daug tyrimų, susijusių su laumžirgių skrydžio mechanizmu ir jo pritaikymu itin mažiems skraidymo aparatams [18].

1.2.3. Jungtys ir gyslos

Sparne esančios gyslos tarpusavyje yra sujungtos panašiais į sąnarius mazgeliais, kurie viso sparno plote yra pasiskirstę skirtingomis formomis, dydžiais ir sudaryti iš skirtingų medžiagų [19]. Šios jungiamosios dalys suteikia sparnui skirtingas deformacijos galimybes, taip skirdamos mazgelius į dvi kategorijas: lanksčiuosius ir standžiuosius. Pirmuoju atveju susijungdamos gyslos tarpusavyje susilieja dideliame plote, o antruoju – dvi besijungiančios gyslos neturi jokio kontakto tarpusavyje ir yra jungiamos resilino turinčia jungiamąja struktūros dalimi [20].

Laumžirgio venos sudarytos iš 3 – 6 kutikulinių sluoksnių, kurių dauguma turi kelis posluoksnius. Venose yra minkštas, labai elastingas, daug resilino turintis mazgelis. Šis mazgelis padidina vidinį gyslų atsparumą ir prisideda prie jų atsparumo įtrūkimų plitimui. Venos tarpusavyje jungiasi sąnarinėmis struktūromis, vadinamosiomis venų mikrojungtimis. Skirtingai nuo visų kitų gyslų mikrojungčių, mazgelis nėra susikirtimo taškas, kuriame susikerta dvi ar daugiau venų, bet jis yra veikiau ten, kur vena nutrūksta. 5 paveiksle pavaizduota, kaip nugarinėje sparno pusėje proksimalinė kraštinė vena sulinksta ir susijungia su subkostaline vena. Priekinėje sparno pusėje subkostalinė vena pereina į distalinę kostalinę veną. Šioje srityje proksimalinė ir distalinė venos dalys jungiasi

tarpusavyje minkštą, resilino turinčią kutikulę (melsvi regionai 5 pav.). Preliminari mazgelio vieta pateikta 5 paveikslo kairiajame vaizde [9].



5 pav. Mazgelis priekinio sparno venose [9]

Laumžirgių gyslos yra sudarytos iš α chitino ir resilino [21]. Gamtoje dažniausiai pasitaiko būtent šio tipo chitinas [21]. Tačiau skirtingų laumžirgių rūšių sparnuose esančio chitino mechaninės savybės skiriasi [22]. Taip pat sparno mechaninės savybės skiriasi priklausomai nuo to, kuri sparno vieta yra tiriama [22]. Skirtinguose moksliniuose straipsniuose rastos α chitino mechaninės savybės pateiktos 1 lentelėje.

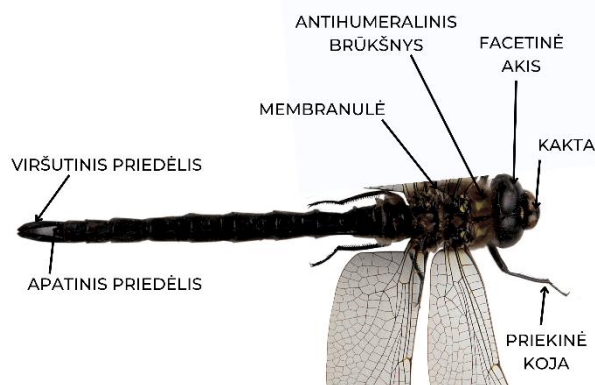
1 lentelė. Chitino mechaninės savybės, remiantis skirtingų autorių duomenimis

Savybė	A. Wei, J. Fu, F. Guo [21]	B. Kesel, U. Philippi, W. Nachtigall [23]	H. Rajabi et al. [24]	Z. Zhang et al. [25]	H. Ren et al. [26]
Jungo modulis	48 GPa	6,1 GPa	6,17 GPa	6,324±0,717 GPa 6,839±0,517 GPa	1,65 GPa
Puasono santykis	0,25	0,25	0,3	–	–
Tamprumo modulis	21 GPa	–	2,85 GPa	–	–
Šlyties modulis	3 GPa	–	–	–	–
Maksimalūs įtempiai	–	–	–	209,8±20,3 MPa (kostalinė gysla) 281,6±35,3 MPa (subkostalinė gysla)	–

Sparnų gyslų vidiniuose sluoksniuose taip pat randama resilino. Nors sparnų gyslų išorinis sluoksnis yra gan standus ir sklerotizuotas (kietėjantis), vienas iš vidinių sluoksnių – endokutikula – yra gan minkštas ir elastingas dėl jame esančio resilino. Priklausomai nuo vietos ir ryšio su kitomis kutikulių struktūromis, resilinas ne tik pagerina savybes (pvz., atsparumą, lankstumą, elastingumą, energijos kaupimą, atsparumą pažeidimams), tačiau dažnai net ir mažą dalį resilino turinčios struktūros turi poveikį visam sparnui, pvz., sumažina bendras deformacijas, pagerina aerodinamines charakteristikas [16].

1.2.4. Laumžirgio biologija

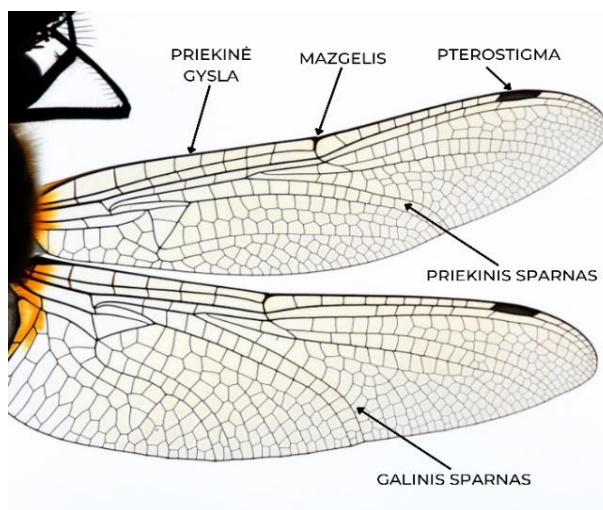
Laumžirgio kūnas skirstomas į tris segmentus – galvą, krūtinę ir pilvelį. Kūnelyje yra trys poros kojų, taip pat ant kūnelio yra dvi poros sparnų. Sparnus turintys segmentai yra didesni dėl juose esančių sparnų raumenų. Vabzdžio pilvelis sudarytas iš dešimties skirtingo ilgio segmentų, o pilvelio gale yra priedėliai. Pilvelyje taip pat yra širdis, sistema iš oro kamerų, virškinimo traktas ir lytinės liaukos [27]. 6 paveiksle pateikta laumžirgio kūno struktūra.



6 pav. Laumžirgio kūno struktūra

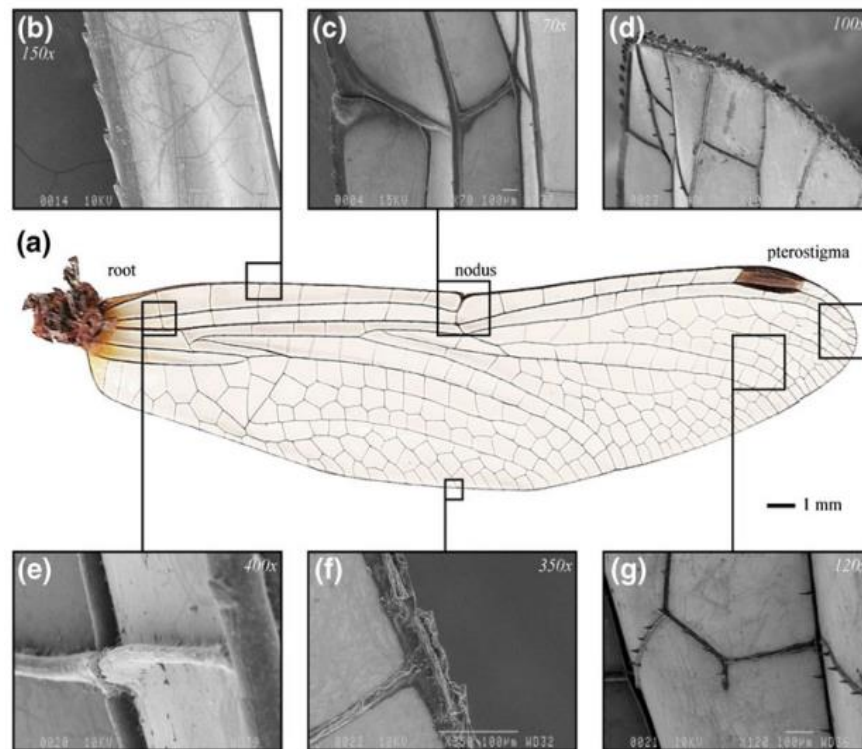
Laumžirgio krūtinės paviršiuje yra gausu spygliukų ir plaukelių, kurie turi įtakos ne tik oro srauto kryptiai ir greičiui, bet ir gali tiesiogiai paveikti fluidų dinamiką, kai oro srautas teka per sparną, skatindami laminarinio – turbulentinio srauto virsmą pasienio sluoksnyje. Kai kurių laumžirgių priekinio sparno krašto skersinis pjūvis yra T formos [28].

Nors įvairių laumžirgių rūšių sparnų struktūra bėgant laikui evoliucionavo į skirtingas formas bei pakito sparnų kiekis, jie atlieka panašias funkcijas [29]. 7 paveiksle pavaizduotos pagrindinės laumžirgio sparnų dalys.



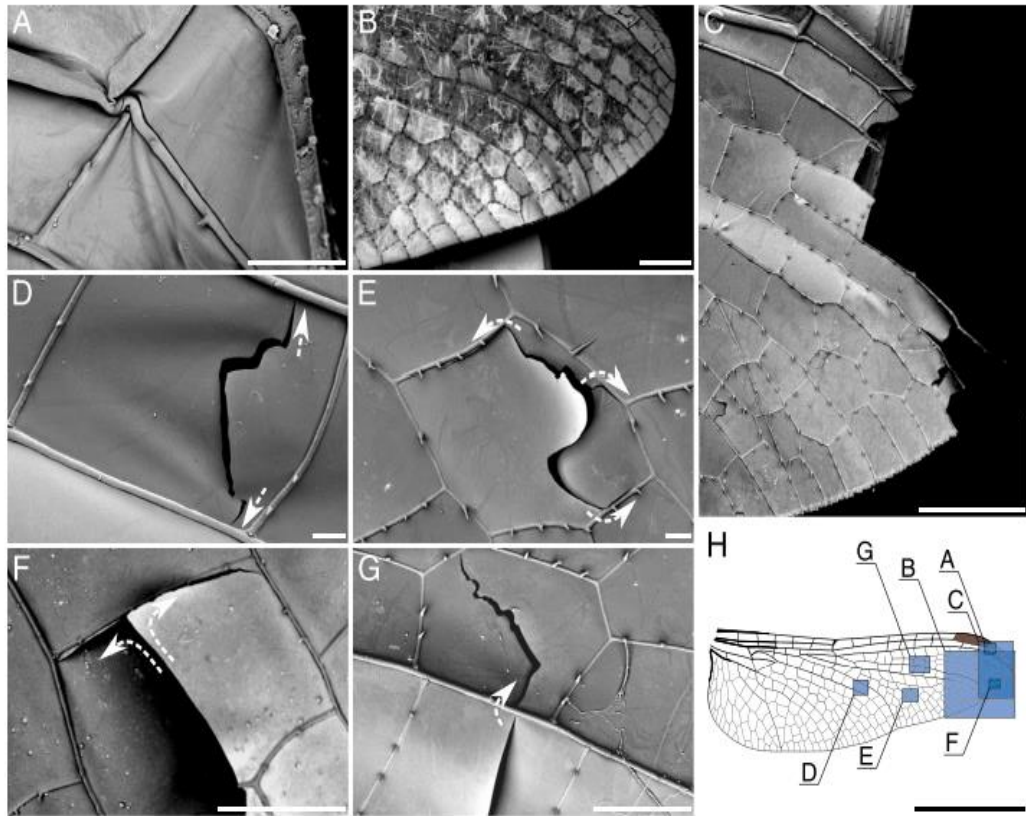
7 pav. Laumžirgio sparno struktūra

2010 metais buvo atliktas laumžirgio sparno tyrimas mikrokompiuterine tomografija. Šiuo tyrimu pavyko itin tiksliai nustatyti gyslas, mazgus ir membraną. Skenavimui buvo pasirinkti 28,8 mm ir 26,8 mm ilgio mostų sparnai, kurie prieš tai 12 valandų buvo džiovinti kambario temperatūros aplinkoje. Nors džiovinimas deformuoja sparną, tai reikia atlikti norint gauti ryškiausias nuotraukas. Nuotraukų rezoliucija – 7,2 μm (kiekvieno pikselio dimensijos lygios 7,2 μm × 7,2 μm). Atliekant skenavimą, pavyko gauti netgi 96 proc. laumžirgio sparno ploto nuotraukas. Likusios sparno dalies nuotraukų išgauti nepavyko dėl labai mažo sparno storio, o likę 4 proc. nesiekė 3,6 μm storio (pusės mikrotomografo rezoliucijos). 8 paveiksle matomi tyrimo metu gauti rezultatai [30].



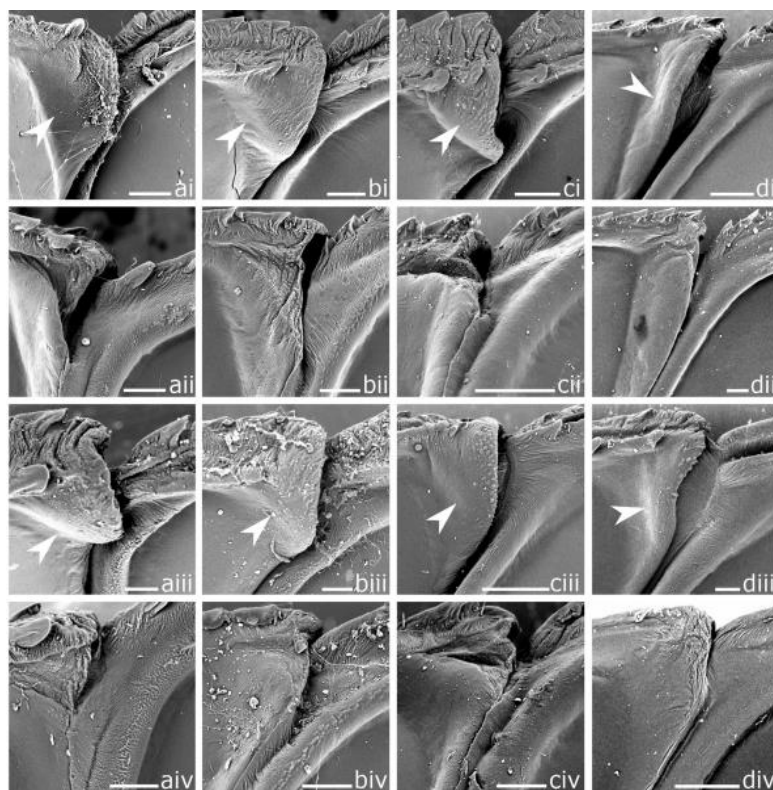
8 pav. Laumžirgio priekinio sparno gyslos ir jungtys. (a) tirta laumžirgio *Sympetrum vulgetum* sparnas su preliminaromis tyrimo vietomis; (b) sparno priekinės gyslos kraštas; (c) mazgelis; (d) sparno galas; (e) jungtis; (f) apatinis sparno kraštas; (g) sparno paviršius netoli sparno galo [30]

2019 metais SEM metodu buvo atliktas skraidančių vabzdžių sparno pažeidimų tyrimas. Tyrimo metu sparnui buvo daromi natūralaus susilankstymo, susidėvėjimo, kirpimo, lenkimo bandymai. Eksperimento metu buvo tiriamas sparno ploto praradimas, dėl patirtų pažeidimų. Buvo tirti 68 *Striolatum* laumžirgių 136 sparnai skraidymo sezono metu. 9 paveiksle pavaizduoti tyrimo rezultatai. Atlikto tyrimo išvados: sparnų pažeidimai daugiausia atsiranda dėl keturių deformavimo būdų, kurie apima natūralų susilankstymą, susidėvėjimą, kirpimą ir lenkimą. Dėl lūžių prarandama sparno gale ir sparno apačios pakraštyje esanti sritis, kuri visu skrydžio sezonu patiria didesnius virpesius. Tikėtina, kad didesnę ploto praradimo dažnį šiose sparno dalyse lemia tai, kad šiuose sparnų regionuose nėra mikrojungčių, turinčių resilino. Tyrimo metu pastebėta reikšminga koreliacija tarp laumžirgių amžiaus ir sparnų pažeidimų kiekio. Sparnų ploto nykimo analizė rodo, kad vabzdžių sparnai apskritai yra labai atsparūs pažeidimams [11].



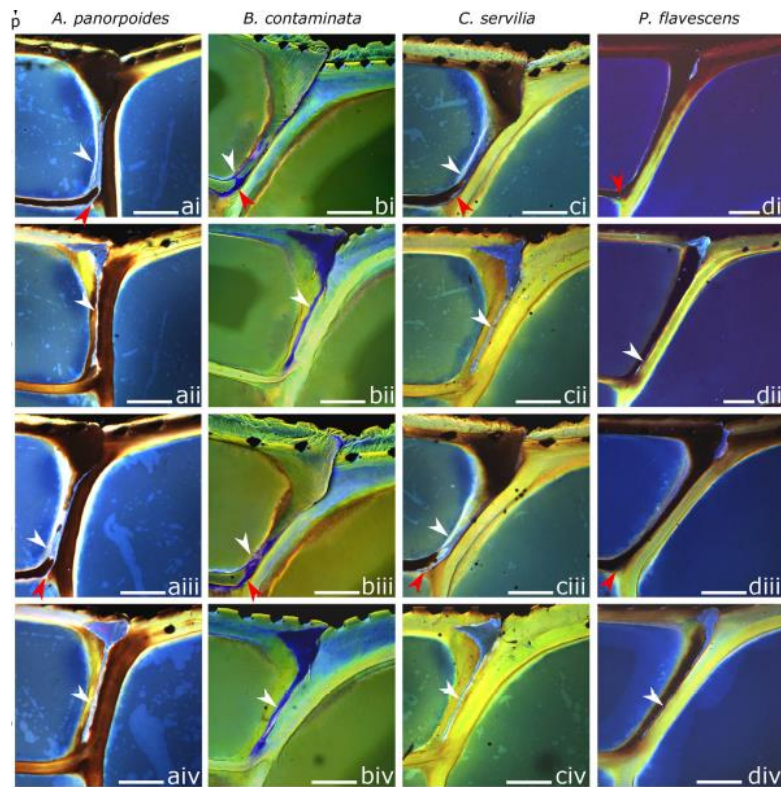
9 pav. Sparno mechaniniai pažeidimai, tirti SEM metodu. *S. Sympetrum* sparno patirti plastiškumo (A), nusidėvėjimo (B), kirpimo (C) ir lenkimo (D-G) pažeidimai tirti elektronų mikroskopu. H – apytikslės padėtys. Mastelis: 100 μm (A, D, E), 1 mm (B, C, F), 500 μm (G), 1 cm (H) [11]

2017 metais buvo atliktas laumžirgio sparno mazgelio tyrimas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Šiam tyrimui atlikti pasirinktos keturios laumžirgių rūšys, gyvenančios Kinijos Nanjing regione. Rūšys buvo pasirinktos dėl skirtingų skraidymo ypatybių, t. y. vieni laumžirgiai skraido mažose teritorijose, o kiti – didelėse. Sparnai buvo džiovinti kambarėje, tuomet buvo atskirti mazgeliai, kurie vėliau buvo pritvirtinti prie aliumininių laikiklių naudojant lipnius anglies skirtukus. Padengus mazgelius ~9 nm aukso ir paladžio sluoksniu, buvo pradėtas tyrimas, naudojant 3 kV įtampą. Sparnų dalys, įskaitant mazgelį, buvo išpjautos ir 12 val. rehidratuotos. Prieš eksperimentą rehidratuoti pavyzdžiai buvo trumpai nuplauti 70 proc. etanoliumi ir kelias valandas laikomi glicerine. Tyrimo rezultatus galima matyti 10 paveiksle [31].



10 pav. SEM metodu tirtu sparno mazgelio rezultatai. a stulpelyje stebimas *Acisoma panorpoides* laumžirgio mazgelis, b – *Brachythemis contaminata*, c – *Crocothemis servilia*, d stulpelyje – *Pantala flavescens*. Baltos rodyklės rodo mazgo formos struktūrą priekinio sparno nugarinėje pusėje (ai, bi, ci, di) ir galiniame sparne (aiii, biii, ciii, diii), mazgelis nematomas priekinėje pusėje (aii, aiv, bii, biv, cii, civ, dii, div). *Servilia* (ci, ciii), bet ne *P. flavescens* (di, diii) sparnuose. a – priekinė sparno pusė; b – proksimalinė sparno pusė; d – distalinė sparno pusė; p – galinė sparno pusė. Mastelis: 20 mm (aiv); 50 mm (biv, civ, div) [28].

To paties tyrimo metu buvo padarytos nuotraukos, kuriose galima matyti resilino kiekį kiekvienos rūšies laumžirgio sparnų mazgeliuose. Šios nuotraukos padarytos greito skenavimo lazeriniu mikroskopu (toliau – CLSM). Sparnų dalys aplink mazgelį, įskaitant jį, buvo išpjautos ir rehidratuotos 12 val. Prieš eksperimentą rehidratuoti mazgeliai buvo trumpai nuplauti 70 proc. etanoliumi ir kelioms valandoms panardinti į gliceriną. CLSM buvo atlikta naudojant *Zeiss LSM 700* mikroskopą (*Carl Zeiss Microscopy*) su keturiais kietojo kūno lazeriais (405 nm, 488 nm, 555 nm ir 639 nm). Didžiausio intensyvumo projekcijos sukurtos naudojant programinę įrangą *ZEN 2011*. Gauti CLSM vaizdai buvo naudojami resilino dominuojančiais daliais mazgelio plote įvertinti naudojant *ImageJ* programinę įrangą. Matavimai atlikti toje pačioje kiekvieno sparno pavyzdžio srityje, sparno distalinėje kostalinėje gysloje. Rezultatai pateikti 11 paveiksle [31].



11 pav. Resilino kiekis mazgelyje tirtas greito skenavimo lazeriniu mikroskopu. *A. panorpoides* (a), *B. contaminata* (b), *C. servilia* (c) ir *P. flavescens* (d) priekinių (ai, bi, ci, di) ir galinių (aiii, biii, ciii, diii) sparnų mazgų vaizdai. aii, bii, cii, dii vaizduoja priekinio sparno pjūvį, aiv, biv, civ, div – galinio sparno pjūvį.

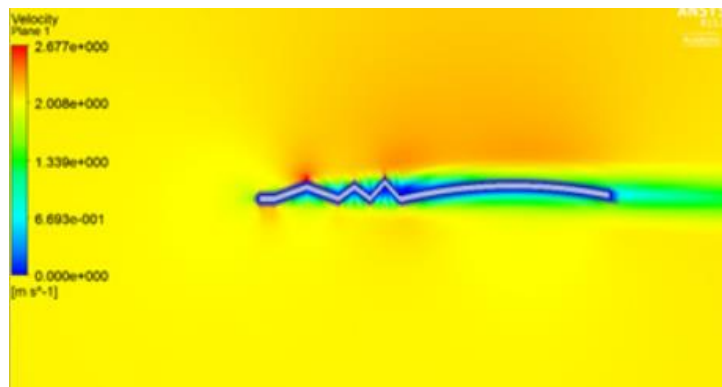
11 paveiksle mėlyna, žalia ir rausva spalvos žymi resilino buvimą mazgelyje. Visose tirtose rūšyse kai kurios gyslos dalys, esančios prie proksimalinio mazgelio, yra padengtos minkštu sluoksniu, kuriame yra daug resilino ir kuris paveiksle pasižymi mėlyna fluorescencija. Baltos rodyklės rodo resilino buvimą proksimalinėje kryžminėje gysloje ir kiekį tarp šios ir distalinės kryžminės gyslos. Raudonos rodyklės rodo resilino buvimą apatinėje proksimalinėje ir distalinėje gyslose.

Remdamiesi šio tyrimo rezultatais, autoriai padarė išvadą, kad mazgelio mikromorfologinės charakteristikos gali būti pritaikytos siekiant palengvinti jų specifinį skrydį. Tyrimas taip pat parodė, kad mikromorfologinės savybės gali būti tokios pat svarbios, kaip sparno makromorfologija, jei yra stengiamasi suprasti sparno funkcinę morfologiją.

1.2.5. Laumžirgio skrydžio fizika

Laumžirgio skrydis yra unikalus: jis gali skraidyti visomis kryptimis, sklandyti neplasnodamas sparnais ir išbūti viename taške ir horizontaliai, ir vertikalčiai. Jų savybė judinti kiekvieną sparną atskirai įvairiomis amplitudėmis ir dažniais leidžia laumžirgiams greitai stabdyti, staigiai pakeisti kryptį ir netgi skristi atbulai. Laumžirgių sparnų sąnariai yra sujungti su krūtinėje esančiais raumenimis, kurie leidžia sparną sukroti [32]. Dėl sparno struktūros suteiktos savybės jam lankstytis, yra sudėtinga nuspėti vabzdžio sparno elgesį skrydžio metu [33].

Vabzdžio sparno profilis, kaip galima matyti 13 paveiksle, yra netolygus. 2019 metais buvo atliktos CFD (angl. *computational fluid dynamics*) ir struktūrinės sparno analizės, pritaikius Navier-Stokes lygtį. CFD analizė buvo atlikta esant 0, 2, 4 ir 8 laipsnių atakos kampams ir 2,1 m/s oro srauto greičiui ANSYS programinėje aplinkoje. Šios analizės rezultatus, kai atakos kampo reikšmė lygi 0, galima matyti 12 paveiksle.



12 pav. Laumžirgio sparno aerodinaminių savybių tyrimas. Skirtingos aplinkos spalvos žymi skirtingus sparną aptekancio oro greičius

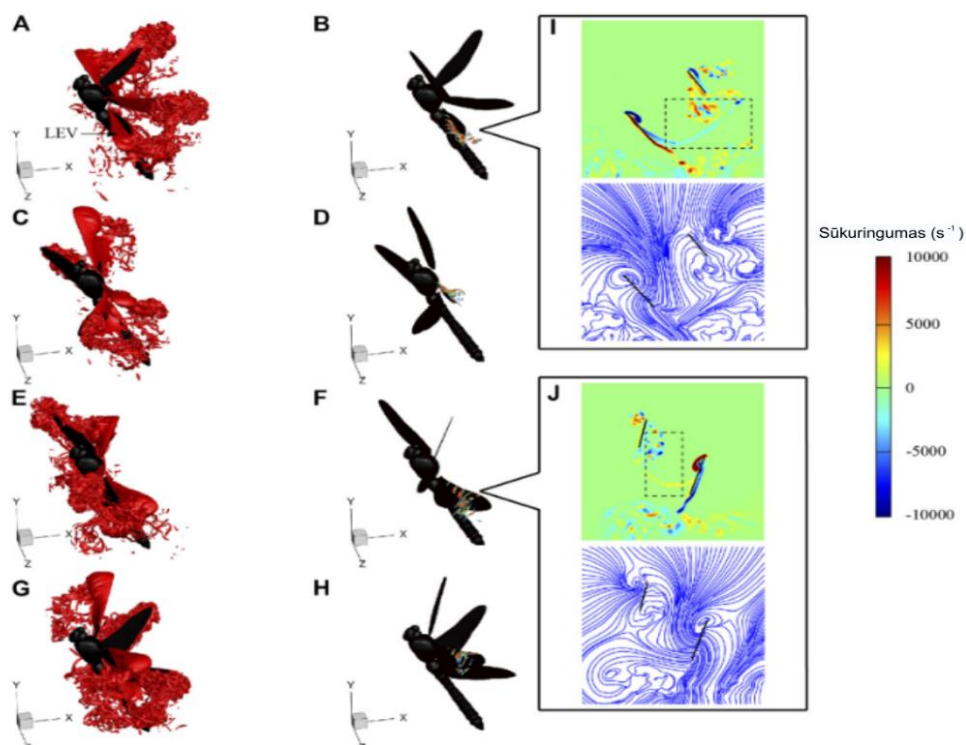
Oro srautas nuo sparno profilio pradeda atsiskirti akimirksniu, tačiau dėl jo nelygumų, žalia spalva pažymėtose vietose, oro srautas yra sulaikomas ir atsiskiria vėliau. Didžiausias srauto greitis stebimas ties pirmąja ir trečiąja viršūnėmis. Tačiau didėjant atakos kampui, didžiausias greitis yra ties profilio pradžia. Atlikus struktūrinę analizę, nustatyta, kad jei vieno iš sparno struktūrinių elementų nebebūtų, sparnui suteiktas apkrovas jis atlaikytų, neleidamas sparnui lūžti. Taip pat šios analizės metu nustatyta, jog sparnui patiriant vis didesnes deformacijas, jis tampa mažiau lankstus [33].

Vėliau buvo atliktas tyrimas esant tokiems pat atakos kampams ir oro srauto greičiui, su tokio pat ilgio ir pločio juostele, tačiau ši juostelė buvo lygi. Nustatyta, kad taikomi projektavimo kriterijai ir atliktas gofruoto sparno modeliavimas, esant mažam Reynoldso skaičiui, duoda daug geresnių rezultatų. Srautas, atsiskyręs nuo netolygaus paviršiaus, iš karto vėl prisitvirtina prie paviršiaus ir jo nelygumuose, todėl srauto atsiskyrimas trunka ilgesnį laiką. Nelygaus sparno aerodinaminės savybės, palyginti su tiesaus, yra geresnės, t. y. didesnis L/D santykis, o tai pagerina sklendimą. Struktūrinė analizė rodo, kad nelygi konstrukcija gali atlaikyti inercines apkrovas ir kirpimą. Jei, tarkime, vienas nelygaus sparno elementas lūžta, kitas elementas gali atlaikyti tą apkrovą, todėl skrydžio metu visas laumžirgio sparnas nelūžta. Dėl išgaubtumo sparnas deformuojasi žemyn, todėl iš išgaubtosios pusės veikiant jėgoms, sparnas yra standesnis nei iš išgaubtosios pusės, o sparnai yra standesni ir geriau pritaikyti skrydžiui. Taigi daroma išvada, kad banguotas sparnas gali atlaikyti įvairias apkrovas, o tai tinka projektuojamoms skraidyklėms.

Kito tyrimo metu lazeriniu vibrometru buvo tiriama laumžirgio priekinio sparno priekinė gysla. Lazerinis vibrometras gali be kontakto su kūnu matuoti jo vibracijas. Toks lazeris, nukreipus spindulį į objektą, matuoja atsispindėjusio spindulio dažnį arba fazės poslinkį. Atliekant eksperimentą kaip detektorius buvo naudojamas lazerinis vibrometras, o kaip žadintuvas – vibracijas keliantis įrenginys, prie kurio yra tvirtinama tiriama sparno dalis. Prieš atliekant tyrimą, buvo rastas optimalus dažnio diapazonas, kuriuo vibracijas keliantis įrenginys sužadina tiriamą sparno dalį. Buvo nustatyta, jog geriausiai veikia 0–50 Hz dažnis, tad tyrimo metu buvo naudojamas būtent šis dažnių diapazonas.

Tyrimo metu autoriai nustatė, kad ką tik nuo krūtinės atskirto sparno tamprumo modulis yra lygus 30 MPa, o džiovinto sparno – $E = 615$ MPa. Toks didelis skirtumas yra dėl skysčių (vandens, kraujo, baltymų ir kt.) sparne praradimo džiovinant. Nustatyti ką tik atskirto nuo krūtinės ir džiovinto sparnų tamprumo moduliai atitinka gumos ir mažo tankumo polietileno tamprumo modulius [32].

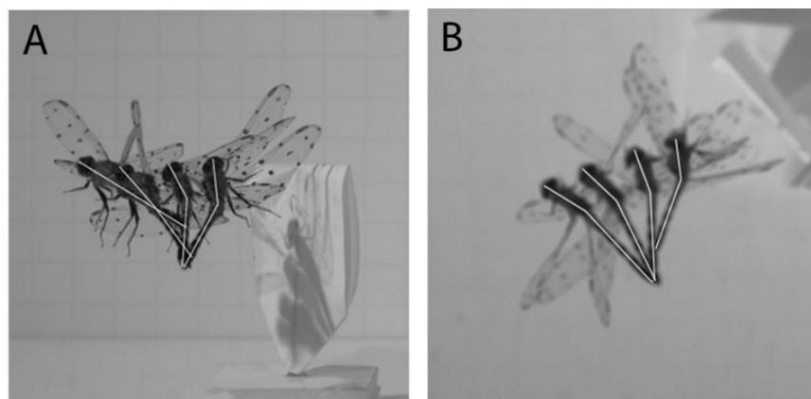
2022 metais buvo atlikta kinematinė laumžirgio aukštėjimo analizė. Šiame tyrime buvo pateikiama išsami laumžirgių aukštėjimo analizė, naudojant didelio greičio fotogrametriją, trimatį atkūrimą ir skaičiuojamąją fluidų dinamiką (angl. – *computational fluid dynamics*). Tyrime laumžirgio aukštėjimas užfiksuotas dvejais didelių greičių fotoaparatais su stačiomis optinėmis ašimis. Dėl taškų suderinimo ir trijų matmenų atkūrimo buvo tiksliai užfiksuota 22 tirtų laumžirgių kūno ir sparnų kinematika aukštėjimo metu. Eksperimento rezultatai rodo, kad aukštėjimo kampai η yra pasiskirstę $10^\circ - 80^\circ$ ribose ir daugiausiai sutelkti dviejuose intervaluose, $60^\circ - 70^\circ$ (36 proc. rezultatų) ir $20^\circ - 30^\circ$ (32 proc. rezultatų), kurie atitinkamai apibrėžiami kaip didelio kampo aukštėjimas ir mažo kampo aukštėjimas. Siekiant ištirti aukštėjimo aerodinamiką, remiantis biologinių stebėjimų rezultatais, pasirinkti laumžirgio kinematiniai parametrai rasti tiriant didelio ir mažo kampo aukštėjimą. Rezultatai rodo, kad aukštėjimo kampas η ir sparnų kinematika yra susiję. Yra nemažai skirtumų sparnų kinematikoje aukštėjant skirtingu kampu η . Tačiau sparno kinematika nesikeičia aukštėjant panašiu kampu η . Padidėjus kampui η , fazių skirtumas λ tarp priekinio ir galinio sparno mažėja, galinio sparno pozicinio kampo amplitudė didėja, o priekinio sparno – išlieka beveik nepakitusi. Naudojant skaitmeninį didelio ir mažo kampo aukštėjimo modeliavimą, nustatyta, kad kylant su skirtingu η , sparno kinematika turi reikšmingą įtaką aerodinaminėms savybėms. Mažo kampo aukštėjimo metu padidėja λ , o galinio sparno pozicinio kampo amplitudė sumažėja, taip sumažinant oro sraute susidariusius sukurius prie priekinio sparno ir pagerinant skrydžio efektyvumą [34]. Tyrimo rezultatai parodyti 13 paveiksle.



13 pav. Sūkurių struktūros prie 115 ms (A ir B), 118 ms (C ir D), 122 ms (E ir F) ir 125 ms (G ir H). Sūkurių kontūras ir srauto linijos prie 115 ms (I) ir 122 ms (J)

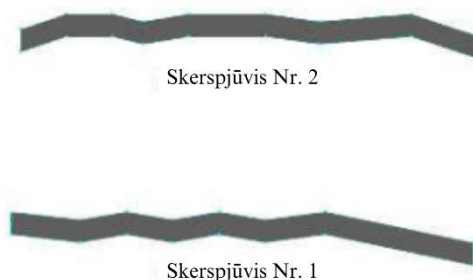
Laumžirgio sparnai suteikia įžvalgų kuriant efektyvų skraidantį mikroaparata. 2020 metais atliktame tyrime pagrindinis dėmesys skiriamas pterostigmos apkrovoms ir jos padėties erdvėje poveikio laumžirgio priekiniams sparnams, remiantis fluido ir struktūros tarpusavio sąveika (toliau – FSI). Šis tyrimas taip pat tiria sparno elastingumo ir tankio pasikeitimo daromą įtaką sparno elgesiui. Priekinio sparno modelis, kuris imituoja tikrąjį laumžirgio sparną, yra plokščias, turi 47,5 mm ilgio stygą ir yra 0,4 mm storio. Sparnas buvo nustatytas skristi 3 m/s greičiu, nuolat plevenant 25 Hz dažniu. Šis tyrimas rodo, kad nedidelis pterostigmos apkrovos padidėjimas (11 proc. sparno svorio) sparno gale stipriai pagerina keliamosios ir pasipriešinimo jėgų santykį CL/CD , kuris, palyginti su pterostigma be apkrovos, padidėja 129,16 proc. Kėlimo ir pasipriešinimo santykis priklauso nuo pterostigmos vietos, jai suteiktų apkrovų, tamprumo modulio ir tankio [35].

Skrydžio metu laumžirgio pilvelis deformuojasi, t. y. jame esantys segmentai lankstosi. 2015 metais buvo iškelta hipotezė, kad šios kūno deformacijos padeda sumažinti energijos išekvojimą skrydžio metu. Tai yra įvertinama pagal skrydžio manevro metu sukuriama sukimo momento dydį. Siekiant patikrinti iškeltą hipotezę, buvo sukonstruotas laumžirgio kūno modelis, turintis galimybę lenktis ties krūtinės ir pilvelio jungtimi. Iš 3D modelio buvo nustatytas masės centras ir kiekvienos padalyto laumžirgio dalies tūris. Vėliau kiekviena atskira dalis buvo laikyta kaip cilindras, kurio tūris atitiko tikrąjį dalies tūrį, siekiant įvertinti dalelių įtaką inercijos momentui. Ekvivalentinio cilindro ilgis yra toks pat kaip ir dalelės. Kiekvienos dalelės masė apskaičiuojama laumžirgį padalijus į tris dalis: galvą, krūtinę ir pilvelį. Priimta prielaida, kad tankis yra pastovus kiekviename pjūvyje. Visiems ilgio dydžiams išmatuoti naudojamas tikrasis vabzdžio kūno ilgis. Buvo nustatyta, kad pilvelio įlinkio dydis tiesiogiai koreliuoja su kūno posūkio greičiu. Rezultatai rodo, kad, norint atlikti tą patį oro manevrą, vabzdžiui su lanksčiu kūnu reikia žymiai mažesnio sukimo momento, palyginti su vabzdžiu, turinčiu identišką morfologiją, tačiau standų kūną. Be to, didžiausią įtaką sukimo momento mažėjimui turėjo kūno masės pasiskirstymo pokyčiai [36]. 14 paveiksle pavaizduota laumžirgio pilvelio deformacija.



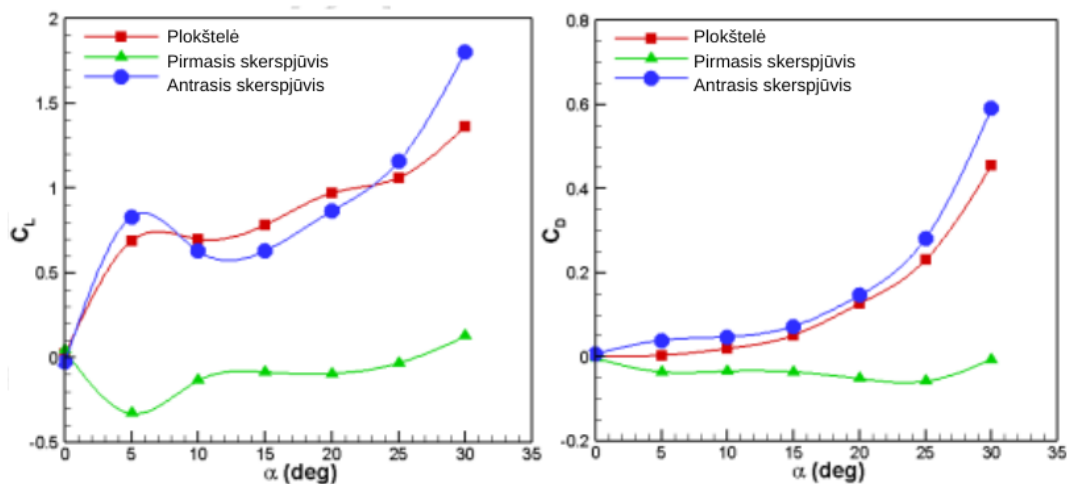
14 pav. Laumžirgio pilvelio deformacijos skrydžio metu. A – vaizdas stebint iš priekio, B – stebint iš apačios

2020 metais atliktame tyrime pateikiamas empirinis laumžirgio sparno ir jo šaknies modelių, bei plokštelės lygiu paviršiumi palyginimas aerodinaminiam vėjo tunelyje. Pagrindinis tyrimo tikslas – ištirti sparno galiukų ir sparno šaknų paviršiaus nelygumų poveikį aerodinaminėms jėgoms ir oro srautui, esant $Re = 10000$ ir atakos kampui nuo 0° iki 30° . Šiuo tikslu iš sparno šaknies (pirmasis skerspjūvis) ir sparno galo (antrasis skerspjūvis) išgaunami du skerspjūviai. Skerspjūvių formos pateiktos 15 paveiksle.



15 pav. Tiriama skerspjuviai, skerspjuvis nr. 1 – arčiau sparno šaknies, skerspjuvis nr. 2 – arčiau sparno galo

Pirmajame skerspjuvyje stebimi didesni nelygumai nei antrame skerspjuvyje. Rezultatai rodo, kad, turintys daugiau paviršiaus nelygumų modeliai turi neigiamą poveikį aerodinaminėms jėgoms, be to antrojo skerspjuvio rezultatai buvo labai arti tirtos tiesios plokštelės rezultatų. Antrasis skerspjuvis gali sukurti didesnes aerodinamines jėgas, palyginus su pirmuoju skerspjuviu. Esant $\alpha=25^\circ$, antrojo skerspjuvio α generuojamas keliamosios jėgos koeficientas yra atitinkamai 90 proc. ir 25 proc. didesnis nei pirmojo skerspjuvio ir plokštelės su lygiu paviršiumi. Remiantis rezultatais, galima daryti išvadą, kad sparno šaknies skerspjuvio paviršiaus nelygumai turi lemiamą vaidmenį vabzdžių sparnų tvirtumui, tačiau nelygumai šalia sparno galo vaidina svarbų vaidmenį generuojant aerodinamines jėgas. Palyginimas, atliktas tyrimo metu, atskleidžia, kad antrasis skerspjuvis yra tinkamesnis lygaus paviršiaus plokštelės pakaitalas kuriant skraidančius mikroaparatus, nes sukuria daugiau būtinų jėgų skrydžiui [37].

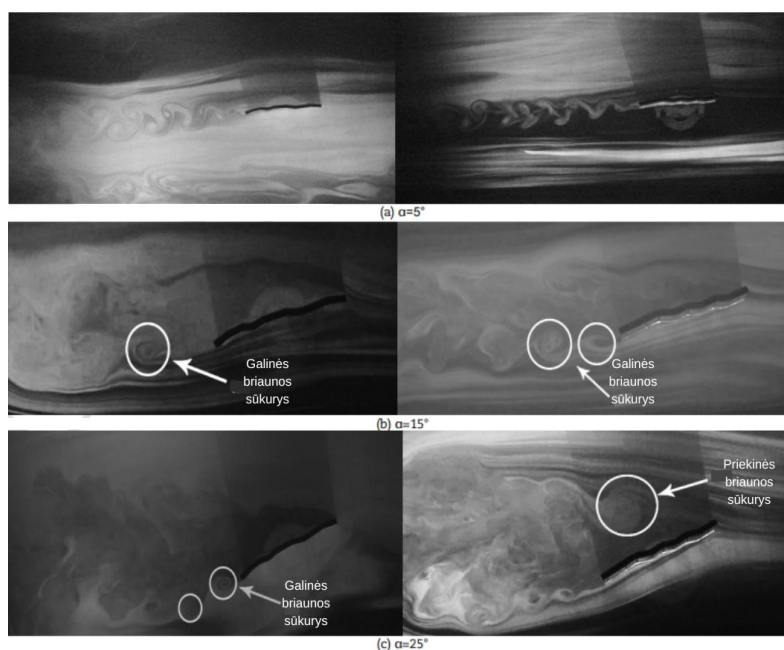


16 pav. Pirmojo, antrojo skerspjuvių ir plokštelės keliamosios ir pasipriešinimo jėgų priklausomybės nuo atakos kampo [37]

16 paveiksle pavaizduoti keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų priklausomybės nuo atakos kampo, kai $Re = 10\,000$. Remiantis plokštelės slėgio pasiskirstymu, prie mažesnių atakos kampų, plokštelės keliamosios jėgos koeficientas labai padidėja, tačiau didėjant atakos kampui, šio koeficiento didėjimas tampa lėtesnis. Priešingai, stebima atvirkštinė pasipriešinimo koeficiento tendencija didėjant atakos kampui, kuomet pasipriešinimo koeficiento nuolydis didėja greičiau. Didėjant plokštelės atakos kampui, didėja slėgio skirtumas tarp viršutinio ir apatinio paviršių. Esant $\alpha > 15^\circ$, slėgio skirtumas stipriai padidina pasipriešinimo koeficientą. Taip pat, oro srautas yra linkęs

anksčiau atsiskirti nuo viršutinės profilio briaunos, kai atakos kampo reikšmės yra didesnės. Atskyrimo sritis kiekviename paviršiuje paprastai veda į pastovų slėgio pasiskirstymą tame paviršiuje. Taip pat viršutinėje briaunoje prie priekinio krašto susidaro du sūkūriai, trukdantys srautui atsiskirti. Kai atakos kampas didėja, slėgio sumažėjimas pastebimas viršutiniame paviršiuje šalia galinio krašto ir slėgio padidėjimas apatinėje briaunoje. Padidėjus atakos kampui, slėgio sumažėjimas stebimas viršutiniame paviršiuje šalia galinio krašto, o slėgio pokyčio nematyti apatiniame paviršiuje. [37]

Remiantis pirmojo skerspjūvio keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientais, slėgio pasiskirstymai (mažesnis slėgis apatiniame paviršiuje, palyginti su viršutiniu) pirmame skerspjūvyje lemia nereikšmingus kėlimo ir pasipriešinimo koeficientų pokyčius. Tačiau koeficientai pasiekia lėtą augimą esant didesniai atakos kampui. Oro srautas aplink pirmąjį ir antrąjį skerspjūvius matomas 16 paveiksle. [37]



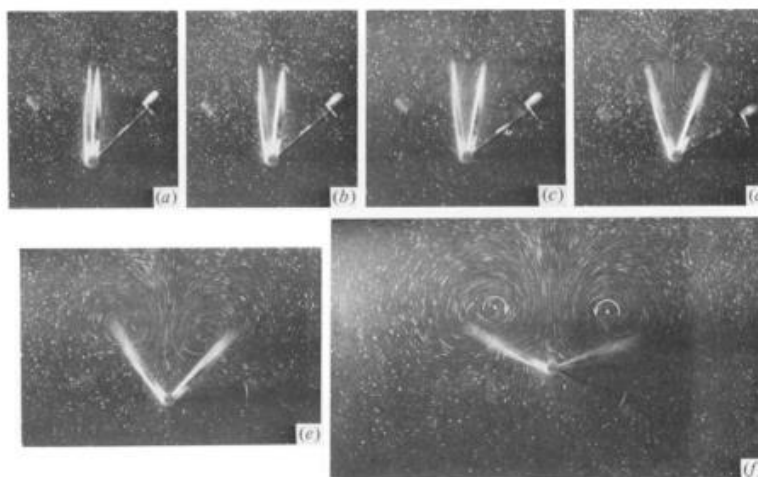
17 pav. Oro srauto aptekėjimas (priekinio sparno pjūvis) esant įvairiems atakos kampams

Padidinus atakos kampą, slėgis padidėja ir viršutinio, ir apatinio paviršių galuose. Rezultatai rodo, kad antrojo skerspjūvio ir plokštelės koeficientai yra gana panašūs. Tačiau esant atakos kampo reikšmei $\alpha = 5^\circ$, antrojo skerspjūvio keliamosios jėgos koeficientas yra didesnis nei plokštelės. Priešingai, esant $\alpha = 15^\circ$, antrojo skerspjūvio keliamosios jėgos koeficientas sumažėja 24 proc., o plokštelės keliamosios jėgos koeficientas yra didesnis nei antrojo skerspjūvio. Kadangi pasipriešinimo koeficientas yra pastovus, gaunamos jėgos sumažėjimas yra susijęs su keliamuoju koeficientu. Esant $\alpha = 25^\circ$, slėgio skirtumas tarp viršutinio ir apatinio skerspjūvio paviršių smarkiai padidėja, todėl smarkiai padidėja keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos koeficientai.

Lankstūs sparnai gali sugeneruoti ženkliai didesnę keliamąją jėgą palyginus su standžiais, mažesnę deformaciją turinčiais [38]. Dėl sumažėjusio sparnų sukimo standumo gerėja aerodinaminės savybės, prie kurių taip pat prisideda ir sparno savybė išsilenkti [39]. Panašiai veikia laumžirgių ir kitų skraidančių vabzdžių sparnai [40]. Tačiau sparnų savybė būti lankstiems yra reikalinga tik iki tam tikrų aplinkos sąlygų. Jei sparnas yra itin lankstus, jis gali neatlaikyti skrydžio metu patirtų apkrovų.

Tam reikalinga lankstumo ir standumo pusiausvyra. Standumas yra išgaunamas ne tik iš sparne esančių sąnarių, membranos ir gyslų, tačiau ir sumažinus lanksčių sparno struktūros dalių deformacijas, skrydžio metu didėjant jėgoms[9].

Laumžirgio skrydis yra sunkiai paaiškinamas įprasto skrydžio principais [41]. Vienas pirmųjų žmonių, paaiškinusių sklendimą ore, buvo Weis-Fogh [42]. Vėliau buvo atliekami tyrimai, kurių metu buvo stebimi laumžirgio sparnų sukuriami sūkuriai, filmuojant ir fotografuojant juos greito filmavimo ir fotografavimo metodais. Vienas tokių tyrimų buvo atliktas tiriant sparno dinamiką [43]. Šio tyrimo rezultatus galima stebėti pateiktame 18 paveiksle [44].



18 pav. Atlikto tyrimo rezultatai, a-f paveiksliukai vaizduoja sparno judėjimo metu sukuriamus sūkurius [44]

Tikėtina, kad šiuolaikinių laumžirgių skrydis yra panašus į paleozojaus laikotarpio vabzdžių skrydį, nes yra stebimas abiejų vabzdžių morfologinis skraidymo aparato panašumas ir kiti požymiai, kurie rodo medžioklę ore, pavyzdžiui, spygliukai ant priekinių kojų. Nepaisant to, kad laumžirgiai, kaip ir jų pirmtakai, turi keturis nepriklausomai valdomus plazdančius sparnus, jie yra laikomi mažuma tarp išlikusių vabzdžių. Jie turi galimybę keisti sparnų judesių dažnį, amplitudę. Kreiserinio skrydžio metu naudojamas priešpriešinis skrydis (lėtėjama), o sparnai, atliekant manevrus, su dideliu pagreičiu eikvoja didelę energijos kiekį. Kaip ir daugelis vabzdžių, laumžirgiai nepajėgia išlaikyti kūno svorio, naudodami visų sparnų maksimalių aerodinaminių jėgų koeficientų sumą, kai oro srautas yra nusistovėjęs. Todėl jie naudojami savo sparnų struktūra, padedančia sukurti didelę keliamąją jėgą, kai aštrus priekinis sparnų kraštas verčia oro srautą atsiskirti nuo paviršiaus [28].

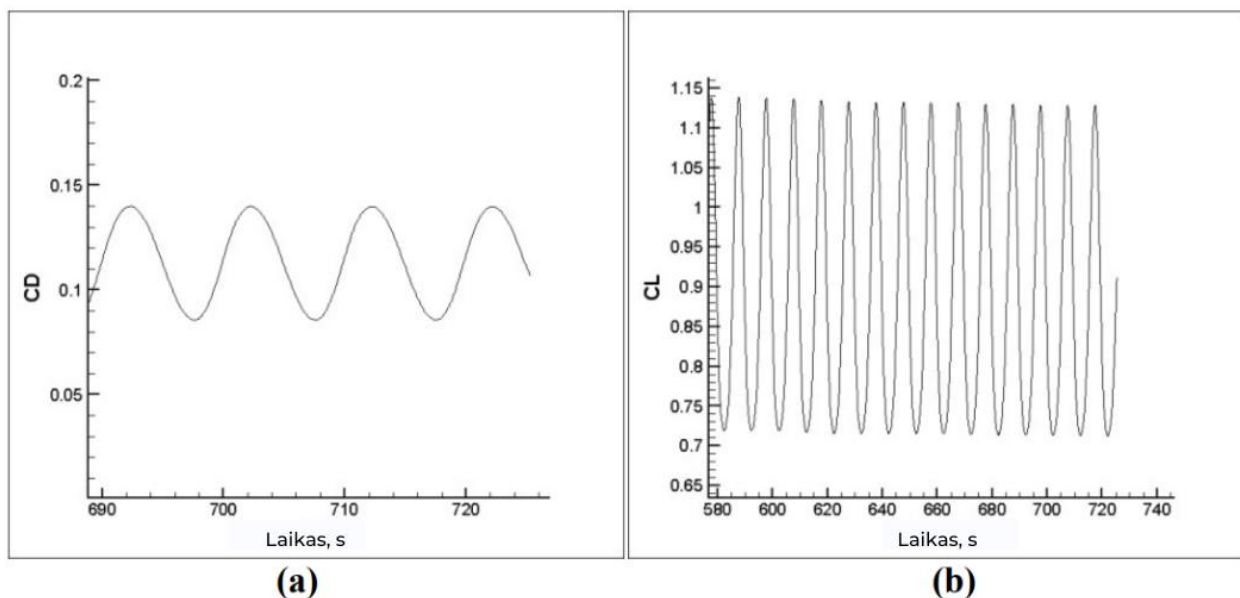
1.3. Laumžirgio sparno skaitiniai modeliai

Iš ankstesnių skyrių jau žinoma, kad vabzdžio skrydis gali būti dviejų tipų. Pirmasis ir labiausiai dominuojantis tipas – plasnojimas, antrasis – sklendimas. Laumžirgio skrydis pasižymi ir pirmuoju, ir antruoju.

2014 metais buvo atlikta pastovaus ir nepastovaus oro srauto skaitinė analizė sklendančio laumžirgio sparnui. Tyrimas buvo atliktas esant itin mažiems Reinoldso skaičiams: 100, 200, 500 ir 1000, kai atakos kampų reikšmės buvo 0, 5, 10, 12,5, 15. Prieš atliekant simuliaciją programinėje aplinkoje, tyrimas apibrėžiamas Navier – Stokes lygtimis [45]. Navier – Stokes lygtys nagrinėja kūno judėjimą klampiam fluide ir aprašo greičio, tankio, temperatūros ir slėgio tarpusavio priklausomybę. Kartu su

šiomis lygtimis naudojant baigtinių elementų ir kitus metodus, programose šios lygtys yra išsprendžiamos lengviau [46].

Nustatyta, kad visų atliktų simuliacijų metu oro srautas visada išliko pastovus ties $Re = 100$ ir 200 , kuomet atakos kampų reikšmės svyravo nuo 0° iki 15° . Pirmasis netolygus srautas buvo gautas, kai $Re = 500$, atakos kampas – 10° . Tačiau srautas visada išliko pastovus ties atakos kampo reikšmėmis 0° ir 5° , esant visoms Reinoldso skaičiaus reikšmėms [45].

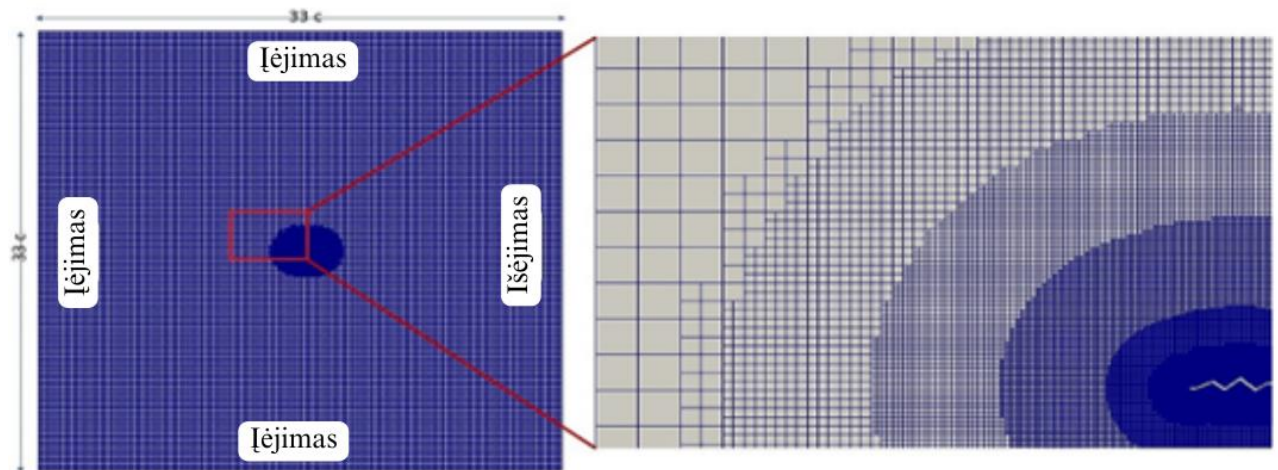


19 pav. Keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų priklausomybės nuo laiko, kai $Re = 1000$, o atakos kampas – $12,5^\circ$

Esant pastoviam srautui, CD ir CL grafikas rodo pastovią liniją, kur, kaip srautui esant nepastoviam, yra tam tikras CD ir CL grafiko pokytis laiko atžvilgiu (19 pav.). 20 paveiksle galima matyti, kaip sparno profilis pasiekia didžiausią $CL = 1,048$, kai $Re = 1000$, o atakos kampas yra 15° , tačiau, esant $Re = 1000$, kai atakos kampas yra 0° , pasiekama mažiausia reikšmė $CL = 0,1715$. O štai didžiausia CD vertė yra $0,4$, kai $Re = 100$ ir atakos kampas – 0° , o mažiausia CD vertė – $0,0873$, kai $Re = 1000$ ir atakos kampo reikšmė – 15° [45].

Tiriant sparnų mechanines savybes, buvo norima nustatyti laumžirgių gyslų sąnarių poveikį sparno mechanikai, pasinaudojant baigtinių elementų metodu. Šiame tyrime autoriai sumodeliavo penkių skirtingų gyslų sąnarių, pastebėtų laumžirgio sparnuose, trimačius baigtinių elementų modelius. Tyrimo rezultatuose teigiama, kad skirtingi sąnarių deriniai gali labai paveikti sparno deformacijas. Gauti rezultatai rodo, kad išilginių ir skersinių gyslų jungtyse esantis resilinas gali gerokai padidinti viso sparno struktūros elastiškumą. Resilino dominuojami sąnariai gali dar labiau prisidėti prie tolygesnio įtempių pasiskirstymo ir gerokai mažesnio įtempių dydžio vabzdžių sparnuose. Kita vertus, netolygumai, esantys sąnariuose, sumažina jų kampines deformacijas ir taip apsaugo nuo struktūrinių pažeidimų ir aerodinaminio nestabilumo dėl itin didelių deformacijų. Tyrimo rezultatuose taip pat teigiama, kad sąnarys gali sukelti skirtingas kampines deformacijas, kai jį supa skirtingų tipų jungtys su gysla. Sukurti modeliai taip pat leido imituoti skirtingas modelių formas ir įtempių pasiskirstymą [47].

2020 metais buvo atliktas tyrimas apie dviejų dimensijų sklendimą ir trijų dimensijų skridimą vietoje. Sklendimo analizei atlikti buvo pasirinkta *OpenFOAM v5* aplinka. Reynoldso skaičiaus reikšmė –10 000, 6 skirtingų tankumų tinkeliai, retėjantys tolstant nuo kūno (20 pav.). Atlikus šiuos veiksmus, buvo padaryta jautrumo analizė, kad būtų parinktas reikiamas elementų skaičius. Pasirinkus tinkelio tipą, buvo atlikta jautrumo analizė. Taikant bandymo - klaidos metodą, lyginant du vienas po kito einančius tinkelius, buvo leistinas mažesnis nei 5 proc. skirtumas dėl pasipriešinimo jėgos, o skaičiuojant keliamąją jėgą, buvo pasirinkta taikyti tik 1 proc. toleranciją. Skaičiavimams atlikti buvo pasirinkta *SimpleFoam* aplinka. Tyrimo rezultatai tiksliai atkūrė trauką oro, kuris apteka laumžirgio sparną [48].



20 pav. Tyrimo metu sudarytas 6 skirtingų tankių tinkelis [48]

Kai oro srautas apteka laumžirgio sparną, jis tampa labai netolygus, susidaro sūkuriai, tad šiam srautui apibūdinti tinka Navier – Stokes lygtys.

2. Teorinė dalis

2.1. Aerodinamika

Norint suprasti laumžirgių skrydžio aerodinamiką, reikia gerai išmanyti ir biologinę laumžirgių struktūrą, ir fluidų dinamiką. Per pastaruosius keletą metų tyrėjai, siekdami geriau suprasti laumžirgių skrydžio aerodinamiką, naudojo pažangias technologijas, tokias kaip didelės spartos videografija, dalelių vaizdo velocimetrija (PIV) ir kompiuterinis fluidų dinamikos (CFD) modeliavimas.

Viena iš pagrindinių sąvokų, padedančių suprasti laumžirgių skrydį, yra keliamosios jėgos susidarymas. Aerodinamikos kontekste keliamoji jėga nustatoma pagal keliamosios jėgos lygtį [49]:

$$L = 0,5 \cdot CL \cdot p \cdot V^2 \cdot A \quad (1)$$

Čia:

L – yra keliamoji jėga,

CL – keliamosios jėgos koeficientas, kuris priklauso nuo kūno formos ir atakos kampo,

p – oro tankis,

V – oro greitis kūno atžvilgiu,

A – kūno plotas, statmenas judėjimo kryptiai.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S} \quad (2)$$

Čia:

C_D – pasipriešinimo jėgos koeficientas,

D – pasipriešinimo jėga.

$$Re = \frac{\rho V x}{\mu} \quad (3)$$

Čia:

ρ – oro tankis, m³/kg

x – kūno ilgis, m

μ – fluído dinaminės klampos koeficientas.

Laumžirgiai gali keisti sparnų atakos kampą kildami ir leisdami, todėl jie gali sukurti keliamąją jėgą per visą sparnų plasnojimo ciklą, priešingai nei daugelis vabzdžių, kurie didžiąją dalį keliamosios jėgos sukuria kildami žemyn. Šis prisitaikymas leidžia laumžirgiui kaboti ir atlikti sudėtingus manevrus. Tam, kad sparnas galėtų sklęsti, reikia, kad masės centras būtų prieš aerodinaminį centrą ir netoli jo. Dėl sparnų paviršiaus tekstūros arba šiurkštumo padidėja didžiausias keliamosios jėgos koeficientas CL_{max}, didžiausias keliamosios jėgos ir traukos santykis (L/D)_{max} ir keliamosios jėgos koeficientas ties (L/D)_{max}, C_{L,(L/D)max} [49].

Laumžirgio sparnas pasižymi geromis aerodinaminėmis savybėmis, esant mažiems Reynoldso skaičiams (Re = 10³). Kai dvimatis plokščias sparnas impulsyviai startuoja iš ramybės būsenos,

susidaro vientisas sūkurys, vadinamas lambda sūkuriumi, kurio ženklas yra priešingas LEV. Kai sparnas yra trimatis ir nelygaus paviršiaus, lambda sūkurys suyra ir užstringa V formos struktūrose netoli priekinio sparno krašto [50].

2.2. Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas (BEM) – tai skaitmeninis metodas, skirtas rasti apytikslius dalinių diferencialinių lygčių sprendinius. Šiuo metodu didelis uždavinys padalijamas į mažesnes, paprastesnes dalis, kurios vadinamos baigtiniais elementais. Tada šios paprastos lygtys sujungiamos į didesnę lygčių sistemą, kuri modeliuoja visą uždavinį.

Laumžirgių skrydžio kontekste BEM gali būti naudojamas skysčio ir struktūros sąveikai (FSI) ir aeroelastingumui suprasti, kuris apima aerodinaminių jėgų ir laumžirgių sparnų struktūrinės dinamikos sąveiką.

2.3. Deformacijos

Deformacijų ir poslinkių, atsirandančių skraidant laumžirgiams, tyrimas visų pirma apima supratimą, kaip laumžirgio sparnai juda ir lankstosi veikiami aerodinaminių jėgų ir kaip šie pokyčiai veikia skrydžio savybes. Nors priekinio ir galinio sparno struktūros šiek tiek skiriasi, jų sukamosios deformacijos gali būti priimanamos kaip tokios pat [52].

Nelygaus priekinio sparno sukimosi kampas yra didesnis nei plokščiojo priekinio sparno, tačiau mažesnio skridimo kampo. Vienas iš svarbiausių veiksnių yra išilginių gyslų skerspjuvio poveikis nelygaus priekinio sparno elgsenai, kuri akivaizdžiai skiriasi nuo plokščiojo priekinio sparno elgsenos. Sukimo deformacija atsiranda dėl struktūrinės reakcijos per priekinio sparno plasnojimo procesą, kuri labai priklauso nuo natūralios struktūros gofruoto sparno skerspjuvio, gyslų ir jungčių tarp gyslų ir membranos [52].

Laumžirgio sparnai sudaryti iš plonos, lanksčios membranos, kurią palaiko gyslų tinklas. Sparnai nėra standūs, bet gali lankstytis ir suktis tiek pasyviai, reaguodami į aerodinamines jėgas, tiek aktyviai, kai juos valdo laumžirgio raumenys. Sparnai taip pat atlieka plazdėjimo judesį, kuris apima vertikalų judesį aukštyn ir žemyn bei sukimąsi.

Vienas iš įprastų deformacijos kiekybinio įvertinimo būdų yra deformacija, kuri yra matas, parodantis poslinkį tarp medžiagos kūno dalelių atskaitos ilgio atžvilgiu. Laumžirgio sparno kontekste deformaciją galima apibrėžti taip:

$$\varepsilon = (L - L_0)/L_0 \quad (4)$$

Čia:

L - dabartinis ilgis (arba atstumas tarp dviejų taškų), m

L₀ - pradinis ilgis, m

Sparno poslinkiui ir deformacijai aprašyti tyrėjai dažnai naudoja kinematinis modelius, kurie aprašo sparno padėtį, greitį ir pagreitį, kaip laiko funkciją. Šiuose modeliuose paprastai atsižvelgiama ir į sparno masės centro judėjimą, ir į sparno orientacijos pokyčius.

Galiausiai sparnų deformacijos ir poslinkiai taip pat turi įtakos sparnų mechaniniam patvarumui. Sparnų gyslos suteikia struktūrinę atramą ir padeda paskirstyti skrydžio metu atsirandančius įtempius, o tai gali padėti apsaugoti sparnus nuo pažeidimų dėl daugkartinio jų lenkimo ir sukimo.

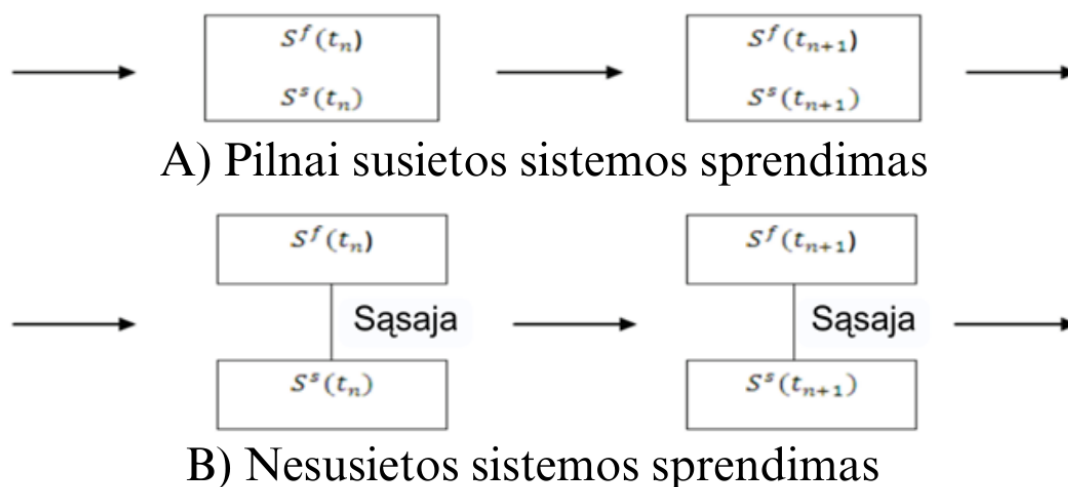
2.4. FSI

Skysčio ir deformuojamo kūno sąveika (angl. *Fluid-structure interaction*, FSI) laumžirgių skrydžio metu yra svarbi tyrimų sritis, nes skrydžio dinamika apima sudėtingą lanksčių laumžirgių struktūrų (būtent sparnų) ir aplinkinio skysčio (oro) sąveiką. Ši sąveika yra labai svarbi norint suprasti mechanizmus, leidžiančius laumžirgiams atlikti skrydžio manevrus.

Vienas iš laumžirgių skrydžio FSI aspektų yra sparnų plasnojimas. Plazdėdami sparnai sąveikauja su juos supančiu oru ir sukuria keliamąją jėgą ir trauką. Tuo pat metu lanksti sparnų struktūra leidžia jiems deformuotis veikiant aerodinaminėms jėgoms – šis reiškinys vadinamas aeroelastingumu. Ši deformacija gali turėti įtakos oro srautui aplink sparnus ir taip pakeisti juos veikiančias aerodinamines jėgas.

Sprendžiant skysčio ir struktūros sąveikos uždavinius, viena ar daugiau kietųjų struktūrų sąveikauja su vidiniu ar aplinkiniu skysčio srautu. FSI problemos yra svarbios daugelyje mokslo ir inžinerijos sričių, tačiau išsamus tokių problemų tyrimas tebėra iššūkis dėl jų didelio netiesiškumo ir daugiadiscipliniškumo. Daugumos FSI problemų atveju neįmanoma gauti analitinių modelio lygčių sprendinių, o laboratoriniai eksperimentai yra ribotos apimties, todėl norint gauti tikslesnius duomenis, susijusius su skysčių ir kietųjų kūnų sąveika, gali būti taikomos skaitinės simuliacijos [53].

FSI uždaviniams spręsti, skiriami du metodai: monolitinis metodas ir metodas su skaidiniais. Monolitinis metodas skysčio ir struktūros dinamiką nagrinėja toje pačioje matematinėje sistemoje, sudaro vieną visos problemos sistemos lygtį, kuri vienu metu sprendžiama vienu algoritmu. Šis metodas potencialiai gali padėti pasiekti didesnę tikslumą sprendžiant daugiadisciplinį uždavinį, tačiau jis gali reikalauti gerokai daugiau išteklių, kad būtų galima sukurti ir palaikyti tokį specializuotą kodą. Priešingai, taikant skaidinių metodą, skystis ir struktūra priimami kaip du skaičiavimo laukai, kurie gali būti sprendžiami atskirai, naudojant atitinkamas tinklelių



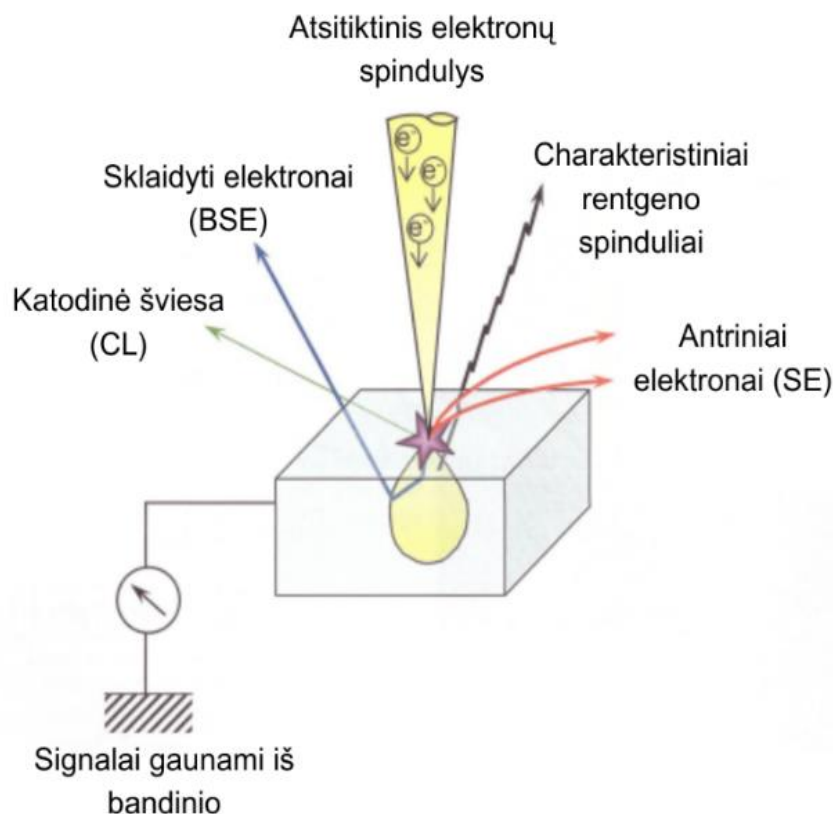
21 pav. Pilnai susietos sistemos ir nesusietos sistemos metodų schemas, kur S^f ir S^s atitinkamai žymi skysčio ir struktūros sprendinius [56]

diskretizacijas ir algoritmus. Sąsajos sąlygos aiškiai naudojamos informacijai tarp skysčio ir struktūros sprendinių perduoti [53].

Skaidymo metodo sunkumas yra koordinuoti disciplininius algoritmus, kad būtų pasiektas tikslus ir veiksmingas skysčio ir konstrukcijos sąveikos sprendimas minimaliai modifikuojant kodą. Visų pirma, sąsajos vieta, skirianti skysčio ir struktūros sritis, nėra iš anksto žinoma, tad, taikant skaidymo metodą, reikia sekti naująją erdvę, o ne iš anksto žinomą, nes ji paprastai keičiasi laike, taip pat keičiasi ir su ja susiję dydžiai, o tai gali būti sudėtinga. Kita bendra FSI sprendimo procedūrų klasifikacija pagrįsta tinklelių traktavimu: tinklelius atitinkantys tinklelių metodai ir tinklelių neatitinkantys tinklelių metodai. Atitinkantys tinklelio metodai sąsajos sąlygas laiko fizinėmis kraštinėmis sąlygomis, pagal kurias sąsajos vieta laikoma sprendinio dalimi, ir reikalauja tinklelių, kurie atitinka sąsają. Dėl kietosios struktūros judėjimo ir (arba) deformacijos, sprendiniui judant į priekį, reikia tinklelio atnaujinimo. Kita vertus, taikant neatitinkančių tinklelių metodą, ribos vieta ir su ja susijusios sąsajos sąlygos laikomos modelio lygtimis nustatytais apribojimais, todėl naudojami neatitinkantys tinkleliai. Todėl skysčio ir kietojo kūno lygtis galima patogiai spręsti nepriklausomai viena nuo kitos su atitinkamais tinkleliais, o tinklelių atnaujinimų nereikia [53].

3. Laumžirgio sparno SEM tyrimas

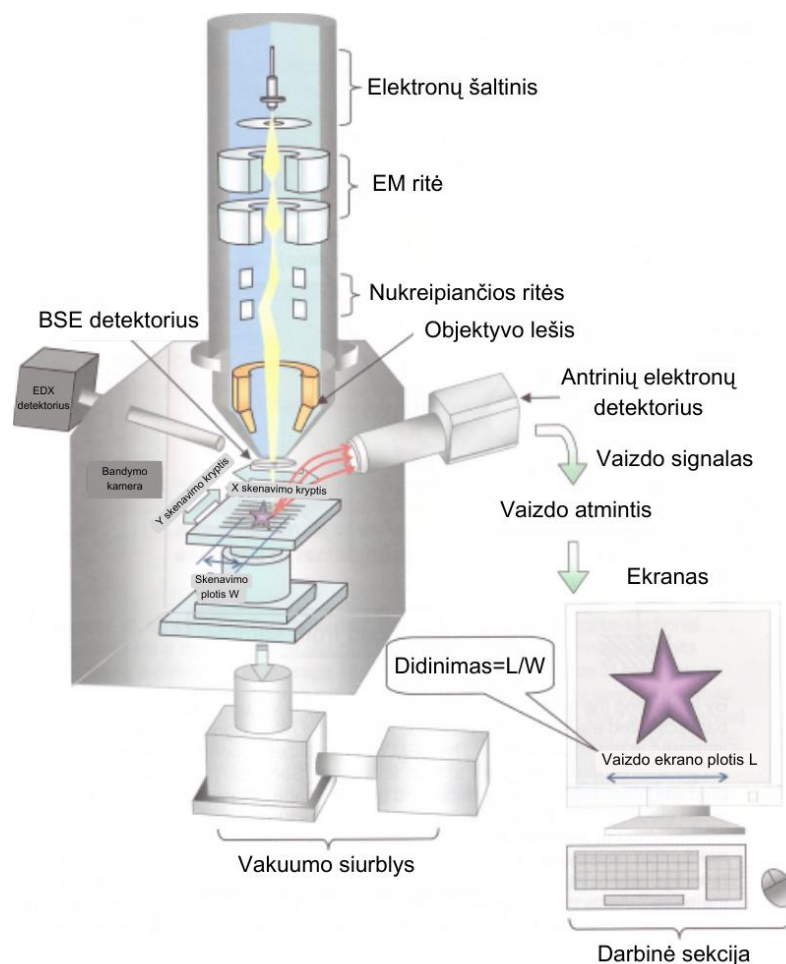
Mikrostruktūrų išsidėstymas biologiniuose audiniuose mechaninės darbo itin didelę įtaką audinių savybėms [37]. Vienas iš šio projekto tikslų buvo ištirti *Aeshna Cyanea* laumžirgio priekinio sparno mechanines savybes. Tam, kad būtų galima tirti savybes, pirmiausia reikia ištirti sparno struktūrą – tam buvo pasitelkiamas skenuojantis elektronų mikroskopas (SEM). Taip pat šis SEM tyrimas pasitarnaus ateities tyrimuose, kuomet pasitelkus programinę įrangą bus modeliuojamas sparnas. Paveiksle nr. 22 yra pavaizduotas skenuojančio elektronų mikroskopo veikimo principas.



22 pav. SEM veikimo principas

Skenuojantis elektronų mikroskopas veikia paveikus bandinį, šiuo atveju laumžirgio priekinį sparną, elektronų pluoštu vakuuminėje kameroje. Paveikus bandinį yra sugeneruojami įvairūs signalai – antriniai elektronai, grįžtamai išsklaidyti elektronai, rentgeno spinduliai ir kt. Šie signalai leidžia atkurti itin detalius bandinio vaizdus, taip leidžiant stebėti bandinio struktūrą įvairiais masteliais [54].

Skenuojantį elektronų mikroskopą sudaro cilindro formos vakuuminė kolona, kurioje yra išdėstyti: elektronų šaltinis, elektromagnetiniai lęšiai, kurie palaidus elektronus konverguoja į elektronų pluoštą. Toliau yra išdėstytos išlinkimo ritės nukreipiančios elektronų pluoštą bandinio link. Toliau seka bandinio kamera su bandinio stendu, goniometras ir antrinių elektronų ieškiklis ir, priklausomai nuo skenuojančio elektronų mikroskopo tipo, grįžtančių išskaidytų elektronų ir /arba rentgeno spindulių ieškiklis. Prie mėginio kameros yra prijungiamas vakuumo siurblys, kuris viso tyrimo metu palaiko norimą vakuumo tipą. SEM sandara pavaizduota paveiksle Nr. 23 [54].



23 pav. SEM sandara

Šiame tyrime naudojamas SEM yra mažesnis, nei anksčiau aprašytieji, tačiau jo veikimo principas ir sandara yra tokia pati kaip ir didesnių SEM [55].

3.1. Naudota aparatūra ir bandinio paruošimas

Armgate įmonės parodomose stalinio skenuojančio elektronų mikroskopo demonstracijoje buvo pademonstruotos skenuojančios elektroninės mikroskopijos (SEM) galimybės tam, kad būtų galima ištirti sudėtingą priekinio laumžirgio sparno struktūrą. Tyrimo metu buvo naudotas "Hitachi" TM4000 serijos SEM, pasižymintis didelio didinimo galimybėmis ir universaliomis vaizdavimo galimybėmis. Šis SEM modelis pasižymi iki 5000 kartų didinimu, pasirenkama pagreičio įtampa nuo 5 kV iki 20 kV ir įvairiomis atvaizdavimo galimybėmis: išsklaidytų elektronų, antrinių elektronų arba jų derinio. SEM pritaikomumas apima ir įvairių tipų vakuumus, įskaitant laidininkų, standartinį ar krūvio mažinimo, taip užtikrinant optimalias įvairių bandinių vaizdavimo sąlygas. Su šiuo SEM TM4000 modeliu, galima tirti iki 80 mm skersmens ir 50 mm storio bandinius [55].

Ruošiantis tyrimui, buvo paruoštas priekinis laumžirgio sparnas, kuris prie laikiklio buvo priklijuotas dvipuse anglies juoste. Bandinys su laikikliu buvo įdėtas į tyrimo kamerą ir pasirinktas standartinis vakuumas. Sparnas buvo tiriamas esant 5 kV įtampai. Paveiksle nr. 24 pateiktas kompiuteris (1), SEM (2) ir paruoštas, užklijuotas ant laikiklio bandinys (3).

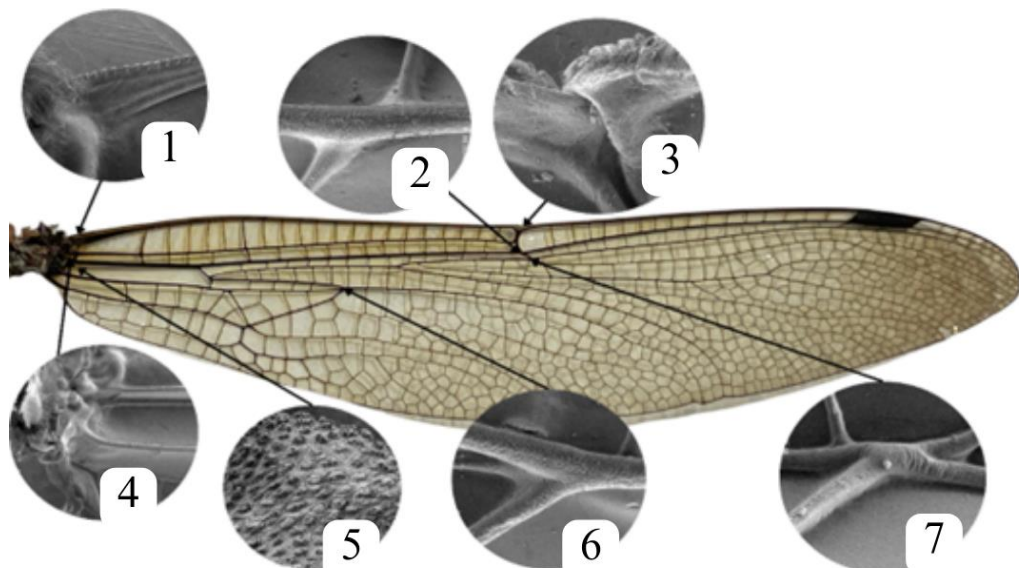


24 pav. SEM tyrimo darbo stendas: 1 – kompiuteris, 2 – skenuojantis elektronų mikroskopas, 3 – tyrimo bandinys

Buvo tirti du sparnai, pirmojo sparno (pavaizduoto paveikslo viršuje, dešinėje) tiriamoji dalis – sparno centras – dalis ant laikiklio. Antrojo tyrimo metu buvo tiriama sparno šaknis. Taip pat paveiksle viršuje matoma, kad bandinys yra užklijuotas prie laikiklio dvipuse lipnia anglies juostele. Dažniausiai yra naudojama anglies arba vario juostelė tam, kad būtų išvengta įsielektravimo.

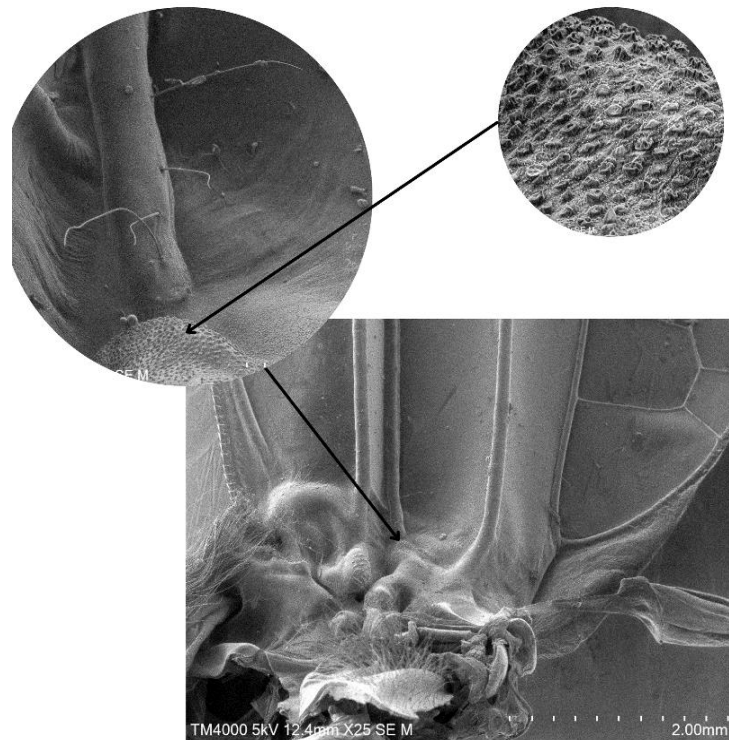
3.2. SEM tyrimo rezultatai

Tyrimo metu buvo stebėtos įvairios sparno zonos, kurias galima matyti 25 paveiksle. SEM tyrimas atskleidė daugybę itin mažų sparno struktūros dalių, kurios buvo padidintos nuo 25 iki 1200 kartų, taip užfiksuojant itin detalius vaizdus. Mažesnis didinimas buvo naudojamas tam, kad būtų stebimas didesnis sparno plotas, o didesnis didinimas buvo naudojamas tam, kad būtų stebimos mažiausios sparno detalės (mechanoreceptoriai ir dantytas priekinės gyslos paviršius). Taip pat tyrimo metu ant sparno buvo pastebėtos dulkės, sparno įlinkimai ir kiti nešvarumai. Taip galėjo atsitikti, nes sparnas buvo džiovinamas ir laikomas gyvenamosiose patalpose.



25 pav. SEM tiriamos zonos: 1 – pagrindinė gysla, 2 – gyslų persidengimas, 3 – mazgelis, 4 – sparno šaknis, 5 – mechanoreceptoriai, 6 – gyslų susijungimas, 7 – gyslų išsiliesimas

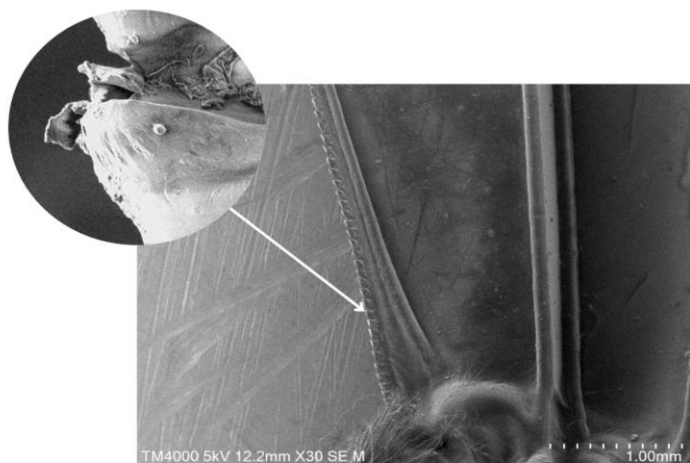
Tyrimo metu buvo stebima sparno šaknis (padidinta 25 kartus). Kaip galima matyti 26 paveiksle šaknis yra labai netolygi. Taip yra dėl itin didelės gyslų koncentracijos mažame sparno plotyje, didelio kiekio įvairių receptorių, padedančių laumžirgiui realiu laiku stebėti aplinkos pasikeitimus, sparnų būklę ir kitus parametrus, bei raumenų, jungiančių sparną ir vabzdžio krūtinę. Literatūroje taipogi yra minima, jog šie nelygumai suteikia sparnui standumo ir stiprumo [30] [56].



26 pav. Laumžirgio priekinio sparno šaknis ir mechanoreceptoriai

Taip pat tyrimo metu buvo stebėta pagrindinė kraštinė sparno gysla (angl. Leading-edge vein) bei ją sudarantis dantytas paviršius. Atitinkamai gysla buvo priartinta 30 ir 1200 kartų norint iš arčiau stebėti itin smulkų dantytą gyslos paviršių. Tokia gyslos paviršiaus forma pagerina sparno aerodinamines savybes. Taip pat buvo atlikti tyrimai, kuriuose minima, jog šie spygliukai padeda mažinti sparno sukeliama triukšmą skrydžio metu. Literatūroje aprašomų tyrimų metu buvo nustatyta, jog kuo yra didesnis spygliukų aukštis, tuo sukuriama triukšmas yra labiau slopinamas, tačiau garso slopinimas vyksta tik iki tam tikro spygliuko aukščio. Tuo tarpu spygliuko plotis turi įtakos slėgio pasiskirstymui pagrindinėje gysloje. Kuomet spygliuko plotis didėja, slėgio pasiskirstymas nuo pagrindinės kraštinės gyslos slenkasi link vidurinės sparno dalies [57].

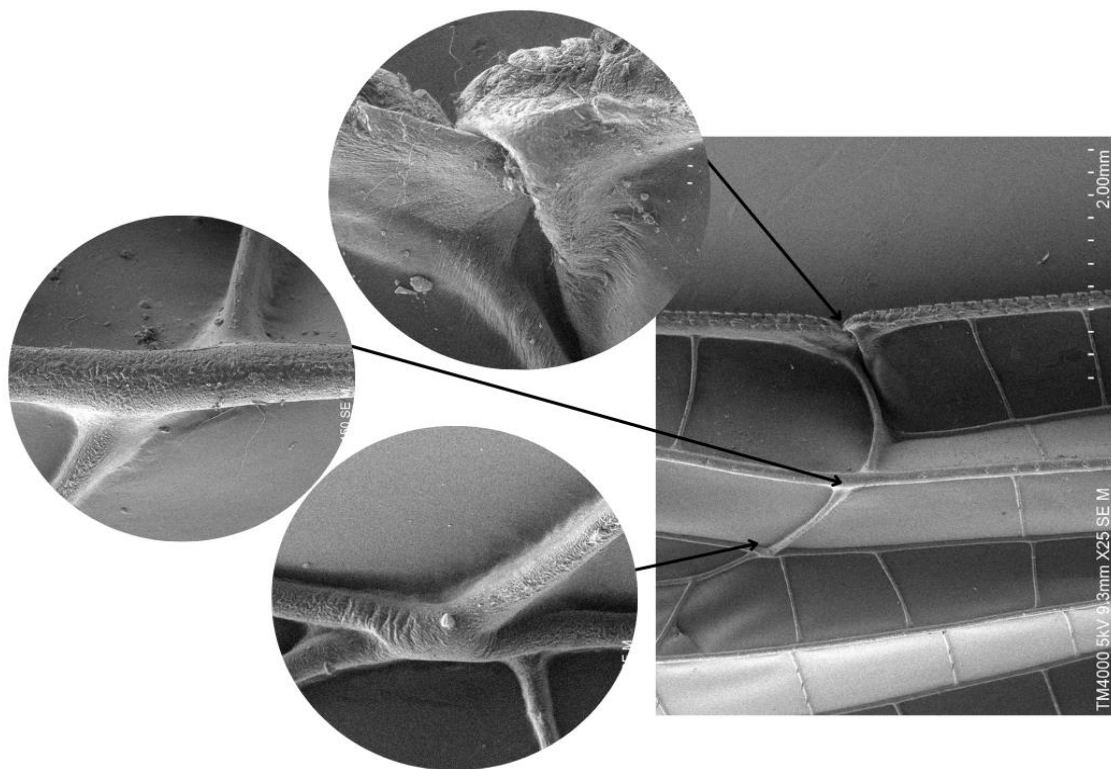
Itin daug priartinus sparno struktūrą galima pastebėti ir sparno anomalijas, atsirandančias dėl mechaninių pažeidimų, didelio kiekio skrydžio ciklų, galimų parazitų ir bakterijų, kaip galima stebėti paveikslo 27 paveikslėlyje. Tačiau šių pažeidimų tiksli kilmė nėra aiški, nes jie galėjo atsirasti ne tik dėl gamtoje nutikusių natūralių priežasčių, tačiau ir dėl netinkamo sparno laikymo iki tyrimo.



27 pav. Pagrindinė priekinio sparno gysla bei dantiyta jos struktūra

Kaip minėta anksčiau, sparno šaknis yra nelygi, dėl didelės gyslų koncentracijos. Tačiau toje vietoje ne tik gyslų yra daug, tačiau ties sparno šaknimi jos yra storiausios. Taip yra užtikrinamas sparno stabilumas, kuomet patiriama apkrova skrydžio metu. Gyslų skerspjūviai per visą sparno ilgį pasižymi skirtingomis formomis (nėra apskrita). Šios skerspjūvio formos nėra apskritos dėl to, jog natūraliai susiformavo taip, kad galėtų atlaikyti patiriamas apkrovas [22].

28 pav. galima stebėti 150 kartų priartintą sparno mazgelį (angl. *nodus*). Šis mazgelis jungia kostalinę, subkostalinę ir radialinę gyslas. Mazgelis – elastinga ir lanksti, resilino pripildyta sparno dalis, kuri neprarasdama tvirtumo leidžia lengviau lankstytis distalinėms gysloms bei absorbuoti apkrovas



28 pav. Priekinio sparno mazgelio ir gyslų sujungimų SEM vaizdas

skrydžio metu. Gyslų supančių mazgelį laisvės laipsniai yra suvaržyti, tačiau mazgelis juda laisviau – it šarnyras [22].

SEM tyrimai leidžia susipažinti su sudėtinga laumžirgių sparnų anatomija, atskleidžiant ne tik jų struktūrinę dalį, tačiau ir mechaninius pažeidimus patirtus skrydžio metu. Tokių tyrimų atlikimas ne tik padeda iš arčiau susipažinti su vabzdžio sparnu, tačiau ir padeda atliekant skaitinį sparno modeliavimą ateityje.

4. Laumžirgio sparno matematinis ir skaitinis modelis

4.1. Laumžirgio sparno matematinis modelis

Matematinis skysčio ir deformuojamo kūno sąveikos modeliavimas kelia daug iššūkių skaičiuojamoje inžinerijoje. Erdvinė sritis kurią užima skystis laikui bėgant keičiasi, nes skysčio ir deformuojamo kūno tarpusavio sąsaja juda. Kai yra norima tiksliai atvaizduoti skysčio ir deformuojamo kūno tarpusavio sąveiką itin tiksliai, turi teisingai būti pritaikytas matematinis modelis [58].

Laumžirgio skrydis apima sudėtingus aerodinamikos principus, ir Navier – Stokes lygtys juose atlieka svarbų vaidmenį. Šios lygtys aiškina skysčių ir dujų judėjimą ir yra pagrįstos antruoju Niutono dėsniumi, taip darant prielaidą, kad nagrinėjamas skystis yra kontinuumas, t.y. jį galima dalyti be galo, nesikeičiant skysčio savybėms [59]. Pagrindines Navier – Stokes lygtis sudaro trys momentų erdvės lygtys x , y , z , koordinatinių sistemoje, tęstinumo lygtis ir energijos tvermės lygtis [46]. Tęstinumo lygtis yra supaprastinta Navier – Stokes lygčių forma, kurioje teigiama, kad į sistema įeinančio skysčio masė turi būti lygi iš sistemos išeinančio skysčio masei. Jėgos momento lygtis apibūdina, kaip skysčio jėgos momentas keičiasi laiko tėkmėje ir šio momento reakciją į slėgio ir kitų jėgų pokyčius. Energijos lygtis aprašo, kaip laikui bėgant kinta energija ir šilumos perdavimas [60].

Daugelis oro srautų inžinerijoje yra turbulentiniai. Jie iš prigimties yra trimačiai, netiesiniai ir netolygūs, o būtent tokiomis sąlygomis buvo išvestos Navier – Stokes lygtys. Šios lygtys turėtų padėti nuspėti turbulenciją nesuspaudžiamuose skysčiuose, tačiau tokio tipo srautui yra būdingas didelis skaičius trimačių sukurių, kurie yra skirtingų dydžių. Todėl turbulencija apima platų ilgių ir laiko skalių spektrą. Šis spektras yra toks platus, kad kelia skaičiavimo požiūriu sunkiai išsprendžiamą problemą: norint pasiekti apytikslius turbulentinių srautų sprendinius naudojant CFD algoritmus, pagrįstus Navier - Stokes lygtimis, erdvės ir laiko diskretizacija turėtų būti pakankamai tiksli, kad būtų galima perteikti mažiausių esamų sukurių charakteristikas [58].

$$\rho \left(\frac{\delta u}{\delta t} + u \cdot \nabla u - f \right) - \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6)$$

Čia:

u – fluido srauto greičio komponentė i kryptimi, m/s

f – išorinės deformuojamo kūno jėgos

ρ – fluido tankis, kg/m³

t – laikas, s

σ – įtempių tenzorius

Formulė nr. 5 aprašo klampaus skysčio judėjimą. Šiose lygtyse naudojami atitinkami ilgio ir greičio atitikmenys, šio tyrimo atveju – sparno stygos ilgis ir laisvojo kritimo pagreitis bei Reynoldso skaičius. Įtempių tenzorius apibūdina jėgų pasiskirstymą deformuojamame kūne (jėga kuri tenka medžiagos ploto vienetui) [61]. 6 formulė aprašo fluido srauto nesuspaudžiamumo sąlygą, kurioje dalinė fluido srauto greičio komponentė koordinatės kryptimi yra lygi nuliui aprašo klampaus skysčio judėjimą [62].

Formulė nr 7 aprašo laumžirgio sparno judėjimo lygtį.

$$\rho^s \left(\frac{d^2 y}{dt^2} + \eta \frac{dy}{dt} - f^s \right) - \nabla \cdot \sigma^s = 0 \quad (7)$$

Čia:

ρ^s – deformuojamo kūno tankis, kg/m³

η – slopinimo koeficientas

t – laikas, s

y – deformuojamo kūno poslinkiai

f^s – tūrinis jėgos vektorius veikiantis deformuojamą kūną

∇ – gradientas kintamųjų atžvilgiu

σ^s – įtempių tenzorius

7 formulėje laumžirgio sparno matematinio modelio atveju ρ^s aprašo sparno tankį, $\frac{d^2 y}{dt^2}$ – aprašo antrąją sparno poslinkio išvestinę laiko atžvilgiu (pagreitį), $\frac{dy}{dt}$ – sparną slopinanti jėga, o $\nabla \cdot \sigma^s$ – aprašo vidines jėgas veikiančias sparno konstrukcijos elementus, čia ∇ – gradiento operatorius žymintis įtempių tenzoriaus divergenciją [58]. 7 formulė aprašo sparno patiriamas deformacijas ir įtempius jam plasnojant [58].

8 formulėje pateikiama lygtis aprašanti laumžirgio sparno įtempius:

$$S^{ij} = (\bar{\lambda}_m G^{ij} G^{kl} + \mu_m [G^{il} G^{jk} + G^{ik} G^{jl}]) E_{kl} \quad (8)$$

Čia:

S^{ij} – itempių tenzorius

λ_m – Lamė konstantos vidutinė vertė

G^{ij} – Grino (angl. *Green's*) deformacijos tenzorius

μ_m – šlyties modulis

E_{kl} – deformacijos tenzorius

8 formulėje esantis S^{ij} – apibūdina vidinių jėgų pasiskirstymą sparne, λ_m – Lamė konstantos vidutinė vertė aprašo įtempių ir deformacijų santykį. Grino deformacijos tenzorius apibūdina kaip sparnas deformavosi palyginus su pradine jo būseną. E_{kl} – kiekybiškai parodo kiek deformavosi sparnas veikiant įtempiams. Apskritai ši formulė parodo kaip sparnas elgiasi, kuomet yra veikiamas jį apkrovus [58].

5, 6 ir 7 formulės yra diskretizuojamos ir linearizuojamos suvedant jas į netiesinių algebrinių lygčių sistemą. Pritaikant baigtinių elementų metodą šio uždavinio sprendimui bus naudojamos judančio tinklelio technologijos.

Kai 5, 6 ir 7 formulės yra sudedamos į lygčių sistemą, jos yra sprendžiamos iteraciniu būdu kiekviename laiko žingsnyje. Ši lygčių sistema gali būti aprašoma:

$$N_1(d_1, d_2) = F_1 \quad (9)$$

$$N_2(d_1, d_2) = F_2 \quad (10)$$

Čia N_1 ir N_2 – jėgos veikiančios sparną skirtinguose taškuose d_1 ir d_2 , F_1 ir F_2 aprašo jėgas veikiančias laumžirgio sparną [58]. Šių lygčių sistemos sprendimas yra taikomas sprendžiant Niutono – Rafsono metodą:

$$A_{11}x_1 + A_{12}x_2 = b_1 \quad (11)$$

$$A_{21}x_1 + A_{22}x_2 = b_2 \quad (12)$$

Čia b_1 ir b_2 – netiesinės lygčių sistemos liekanos, x_1 ir x_2 yra d_1 ir d_2 pataisos, A_{11} ir A_{12} aprašo tinkelio judėjimo įtaką [58]. Galiausiai lygčių sistema yra išsprendžiama:

$$P_{11}\Delta y_1 + P_{12}\Delta y_2 = b_1 - (A_{11}x_1 + A_{12}x_2) \quad (13)$$

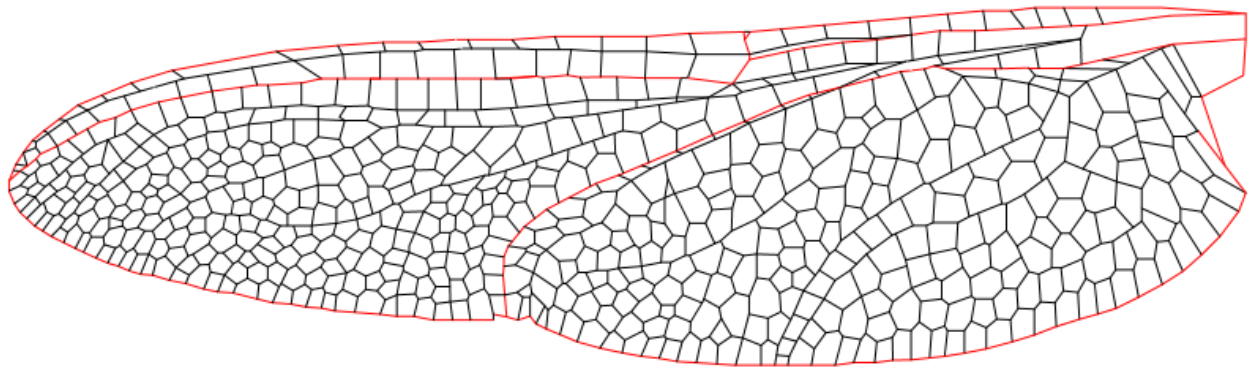
$$P_{21}\Delta y_1 + P_{22}\Delta y_2 = b_2 - (A_{21}x_1 + A_{22}x_2) \quad (14)$$

Čia y_1 ir y_2 yra x_1 ir x_2 pataisos, o P – išankstinio sąlygojimo matricos blokas.

Šios formulės nesukuria sparno matematinio modelio, o tik aprašo būdą lygtimis išspr

4.2. Laumžirgio sparno skaitinis modelis

Norint ištirti sparno gyslų ir membranos patiriamas deformacijas bei įtempius, buvo atlikta statinė sparno analizė. Šio projekto metu buvo sumodeliuotas supaprastintas priekinis laumžirgio sparnas, t. y. buvo paliktos tik pagrindinės gyslos. Supaprastinti sparną buvo pasirinkta ne tik dėl paprastesnių skaičiavimų, tačiau ir dėl to, jog įtempių skirtumas tarp nesupaprastinto sparno (29 pav.) ir supaprastinto yra vos iki 1 proc. [63].



29 pav. Neredukuotas sparno modelis, raudonos linijos žymi gyslas, kurios yra paliekamos redukuotame sparno modelyje

Sparno modeliavimas buvo atliekamas programine įranga perbraižant turimą priekinio laumžirgio sparno nuotrauką bei išmatavimus. Modelio supaprastinimui gyslų storis buvo parinktas nekintantis, sparno storis per visą ilgį buvo toks pats, membrana taip pat. Sparno dimensijos pateiktos 2 lent.

2 lentelė. Sparno modelio išmatavimai

Savybė	Reikšmė	Dydis
Ilgis	47,91	mm

Plotis (per plačiausią vietą)	11,48	mm
Gyslos plotis	0,8	mm
Membranos storis	0,4	mm

Sparno gyslų modeliui buvo pritaikytos α chitino savybės kurios buvo aprašytos literatūros šaltiniuose ir pateiktos 1.2.3 skyrelyje. Savybių, kurių reikšmės skirtinguose literatūros šaltiniuose skiriasi, naudotos reikšmės, kurios šaltiniuose kartojosi dažniausiai. Sparno gyslų modelio savybės pateiktos 3 lent.

3 lentelė. Sparno gyslų savybės pritaikytos modelyje

Savybė	Reikšmė	Dydis
Tamprumo modulis	3	GPa
Puasono santykis	0,25	–
Šlyties modulis	3	GPa
Tankis	1200	kg/m ³
Jungo modulis	6,17	GPa

Sparno membranos savybės taipogi buvo pritaikytos iš rastų literatūros šaltiniuose [18, 30]. Nors skirtingų membranos sluoksnių savybės skiriasi, visam membranos modeliui buvo pritaikytos tos pačios savybės, kurios yra pateiktos 4 lentelėje:

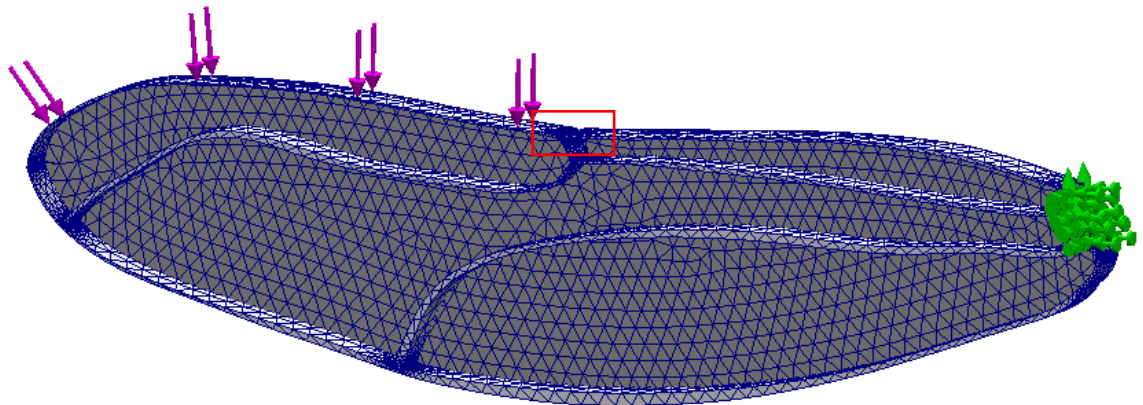
4 lentelė. Sparno membranos savybės pritaikytos modelyje

Savybė	Reikšmė	Dydis
Tamprumo modulis	1	GPa
Puasono santykis	0,27	–
Šlyties modulis	0,5	GPa
Tankis	1200	kg/m ³
Jungo modulis	1	GPa

Membraniniai elementai esantys modelyje gali perduoti tik plokštumoje esančias jėgas, tačiau negali perduoti momentus. Taip pat tokio tipo elementai neturi standumo lenkimui. Plokštės tipo elementai dažnai yra naudojami ploniems ir plokštiems elementams kurie pasižymi dideliu lenkimo standumu ir yra apkraunami ne plokštumos kryptimi, modeliuoti. Kevaliniai (angl. *shell*) elementai yra membraninio ir plokštės tipo elementų derinys. Kevaliniai elementai yra naudojami ploniems, plokštiems arba lenktiems elementams, kurie pasižymi dideliu standumu lenkimui, modeliuoti.

Kevalinius elementus gali veikti apkrovos esančios ir plokštumoje, ir ne plokštumoje. Šio projekto metu membrana buvo laikoma kevaliniu elementu.

Sparno modelis buvo tiriamas „SolidWorks“ aplinkoje. Šiame sparno tyrimo etape pasirinkta atlikti sparno statinę analizę standžiai įtvirtinant sparno šaknį, bei apkraunant priekinę kraštinę gyslą 6,7 N jėga nuo mazgelio iki sparno galo (30 pav.). Tokio dydžio jėga buvo pasirinkta aprauti sparną dėl literatūroje aprašyto tyrimo, kurio metu buvo nustatyta, jog kuomet laumžirgis sklendžia, jo vienas sparnas yra apkraunamas 6,7 N jėga [64]. Programinėje įrangoje parinktas tinklelio dydis – tankiausias siūlomas.

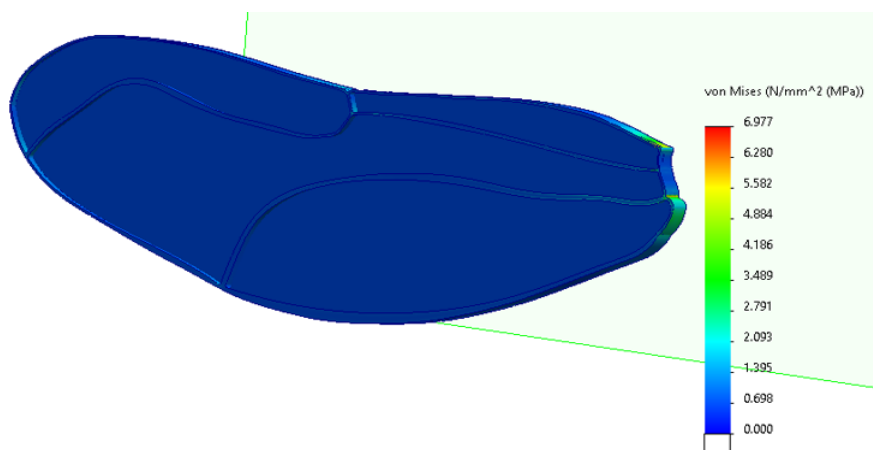


30 pav. Sparno modelis su įtvirtinimu, tinkleliu ir apkrova. Raudonu stačiakampiu pažymėtas mazgelis

Toliau paveiksluose yra pateikiami statinės analizės rezultatai (31 pav. ir 32 pav.). Lentelėje nr. 5 pateiktos didžiausi nustatyti poslinkiai ir įtempiai:

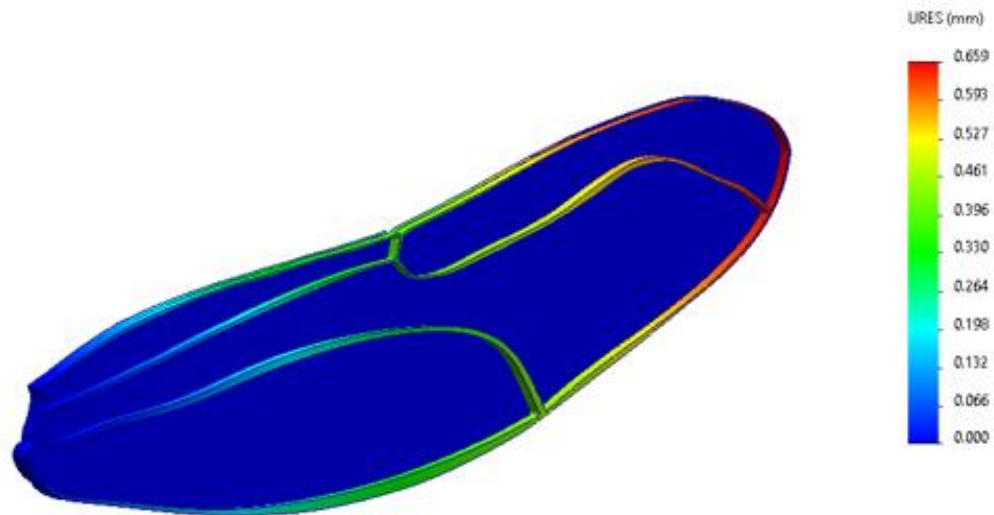
5 lentelė. Statinės analizės rezultatai

Didžiausi poslinkiai, mm	Didžiausi įtempiai, MPa
0,659	6,977

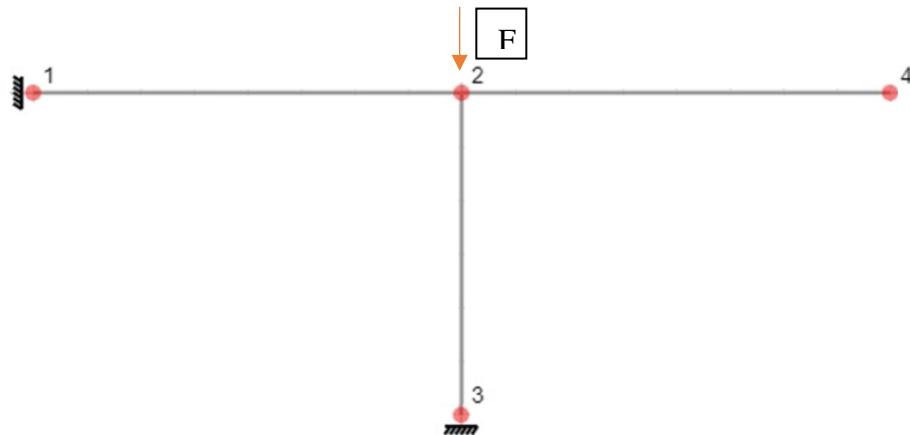


31 pav. Analizės metu nustatyti įtempiai

Kaip galima matyti iš pateiktų rezultatų, didžiausi nustatyti modelio poslinkiai buvo ties sparno galu, dėl to, jog sparno šaknis buvo standžiai įtvirtinta. Didžiausia nustatyta poslinkių reikšmė – 0,66 mm. Analizės metu buvo nustatyta, jog didžiausi įtempiai yra pasiskirstę ties įtvirtinta sparno dalimi, o jų didžiausia pasiekta reikšmė siekia 6,98 MPa.

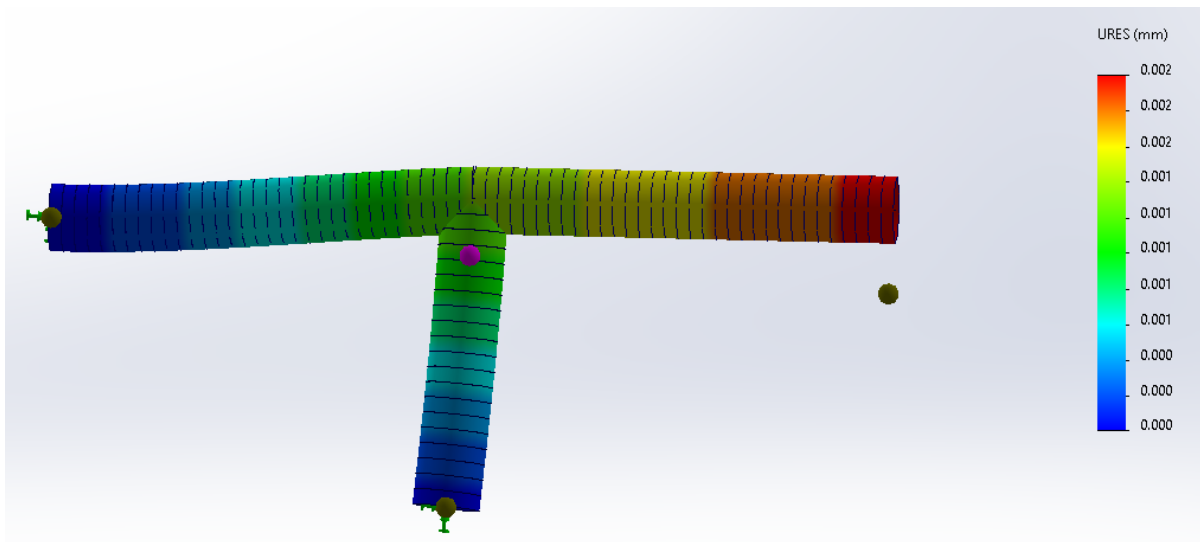


32 pav. Analizės metu nustatyti poslinkiai

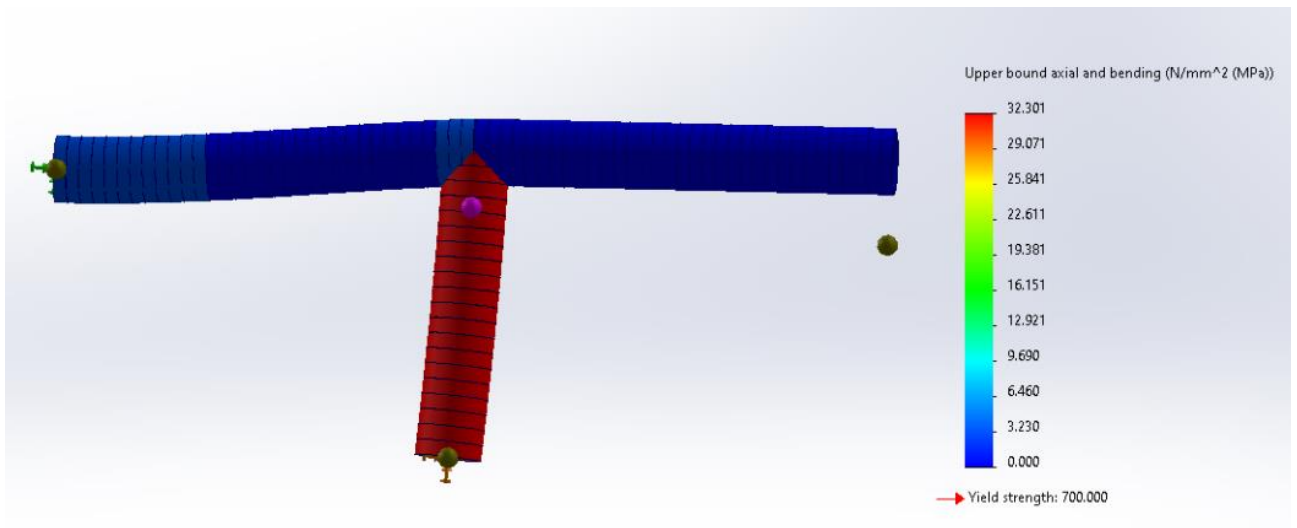


33 pav. Mazgelio skaičiuojamoji schema

Tyrimo metu taip pat buvo padaryta redukuoto mazgelio statinė analizė, pritaikant gysloms tas pačias savybes kaip ir pilno sparno modelyje. Modeliuojama sparno dalis apibrėžta raudonu stačiakampiu 30 paveiksle. Mazgelis buvo apkrautas 6,7 N jėga. Mazgelio skaičiuojamoji schema pateikta 33 paveiksle. Rezultatus galima stebėti 34 ir 35 paveiksluose.



34 pav. Mazgelio poslinkis

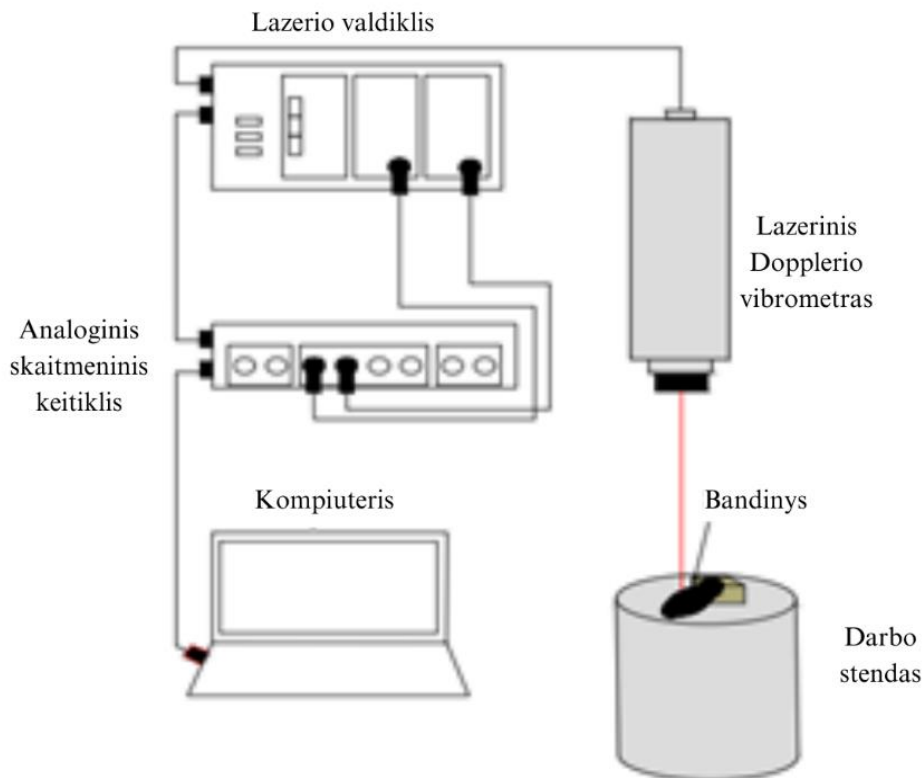


35 pav. Mazgelio įtempiai

Ateities tyrimų metu yra planuojama nustatyti trūkstamus duomenis ir kuo tiksliau atkurti natūralų sparną, pritaikant jį skraidantiems mikro aparatams.

5. Sparno dinamikos tyrimas

Norint rasti pirmąją *Aeshna Cyanea* laumžirgio priekinio sparno rezonansinį dažnį, buvo atlikti du tyrimai: „Bump“ testas ir priverstinio žadinimo bandymas. Buvo tiriama du sparnai, kiekvienam iš jų atlikti abu bandymai. Testai buvo atliekami tame pačiame bandymo stende kurio sandara pateikta 36 paveiksle.

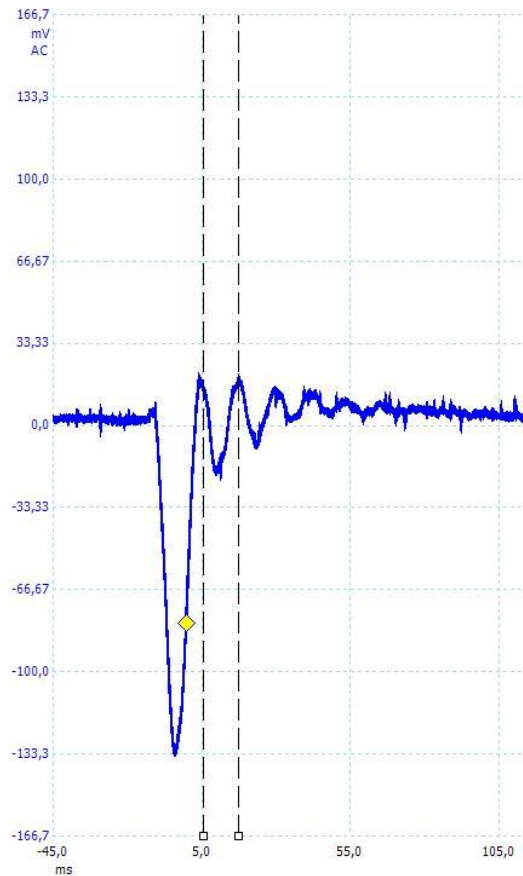


36 pav. Virpesių tyrimo darbo stendas

Laumžirgio sparno šaknis buvo priklijuota prie medinio blokelių specialiaisiais kontaktiniais klizais, blokelis buvo pritvirtintas prie Dopplerio vibrometro, kuris buvo prijungtas prie Polytec OFV-5000 valdiklio. Tuomet buvo bandoma rasti tinkamą sparno vietą, per kurią lazerio spindulys nepereitų kiaurai, tačiau tai padaryti buvo gan sunku dėl sparno gale esančių gyslų pločio ir permatomos membranos. Tačiau po kelių bandymų pavyko rasti storesnę gyslą, pro kurią lazerio spindulys nepraejo. Tyrimo metu gauti sparno virpesių duomenys buvo apdoroti PicoScope 6 aplinkoje.

Smūginis bandymas, dar žinomas „Bump“ testo pavadinimu – bandymo metodas naudojamas norint nustatyti bandinio savąjį dažnį. Testo metu darbo stendas yra sužadinamas lengvu, tačiau staigiu smūgiu. Šio bandymo metu, smūgio jėga nėra matuojama, tačiau matuojamas bandinio atsakas į smūgį.

Toliau yra pateikiami smūginio testo rezultatai su dvejais *Aeshna Cyanea* priekiniais sparnais, ordinačių ašis žymi įtampa, mV, abscisų ašis žymi laiką, ms:



37 pav. Pirmojo sparno smūginio bandymo rezultatai, mėlyna kreivė žymi natūralius sparno virpesius, brūkšninės vertikalios linijos žymi svyravimo viršūnes

Paveiksle galima stebėti pirmąjį svyravimą po smūgio (pirmasis grafiko svyravimas žemyn). Galima matyti jog natūralūs sparno svyravimai silpsta tolygiai, iki kol sparnas visiškai nustoja svyruoti ties maždaug 60 ms. Grafike galima matyti jog sparnas nustoja svyruoti po 6 pilnų svyravimų. Programos pagalba buvo nustatytas laiko intervalas tarp dviejų maksimumų, šis intervalas žymimas dvejomis vertikaliomis brūkšninėmis linijomis. Nustatytas svyravimo periodas buvo 12,26 ms. Pagal šią vertę galima rasti pirmąjį rezonansinį sparno dažnį:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12,26 \cdot 10^{-3}} = 81,57 \text{ Hz} \quad (15)$$

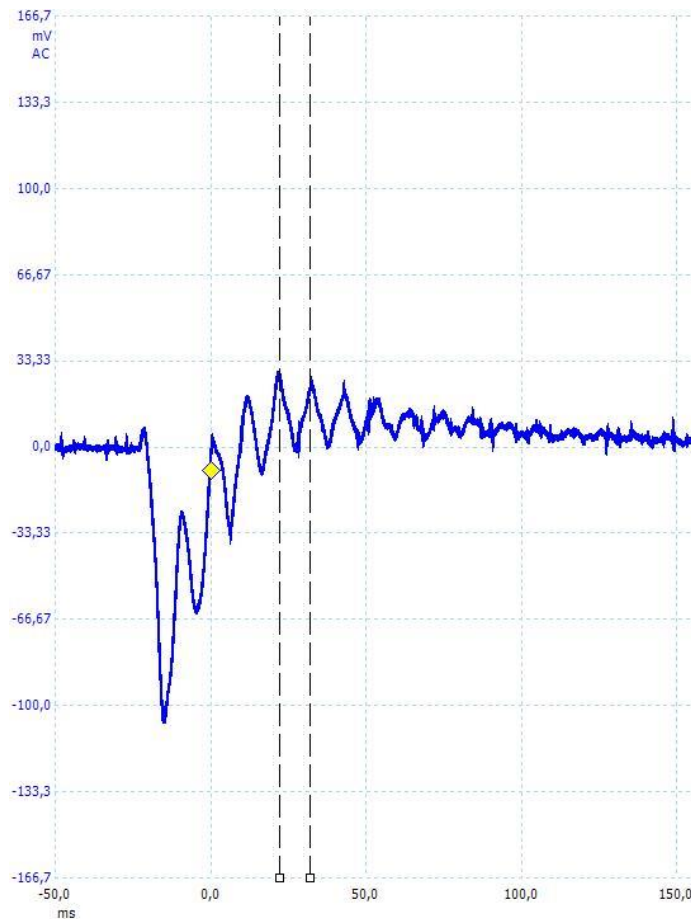
Čia:

T – periodas, s

f – dažnis, Hz

Tiriant vabzdžių sparnų natūraliuosius dažnius galima toliau gilintis į struktūrinės sparno savybes ir sparno aerodinamiką[65]. Natūralieji sparnų dažniai parodo kaip sparnas virpa, kuomet jį paveikia aplinka. Sužinojus sparno rezonansinius dažnius galima toliau tirti sparno standumą, jo stiprumą ir deformacijas[66]. Šiame tyrime yra tiriami tik sparno rezonansiniai dažniai, kitos laumžirgių mechaninės savybės planuojamos tirti ateities tyrimuose.

Toliau pateikiami antrojo sparno smūginio testo rezultatai:



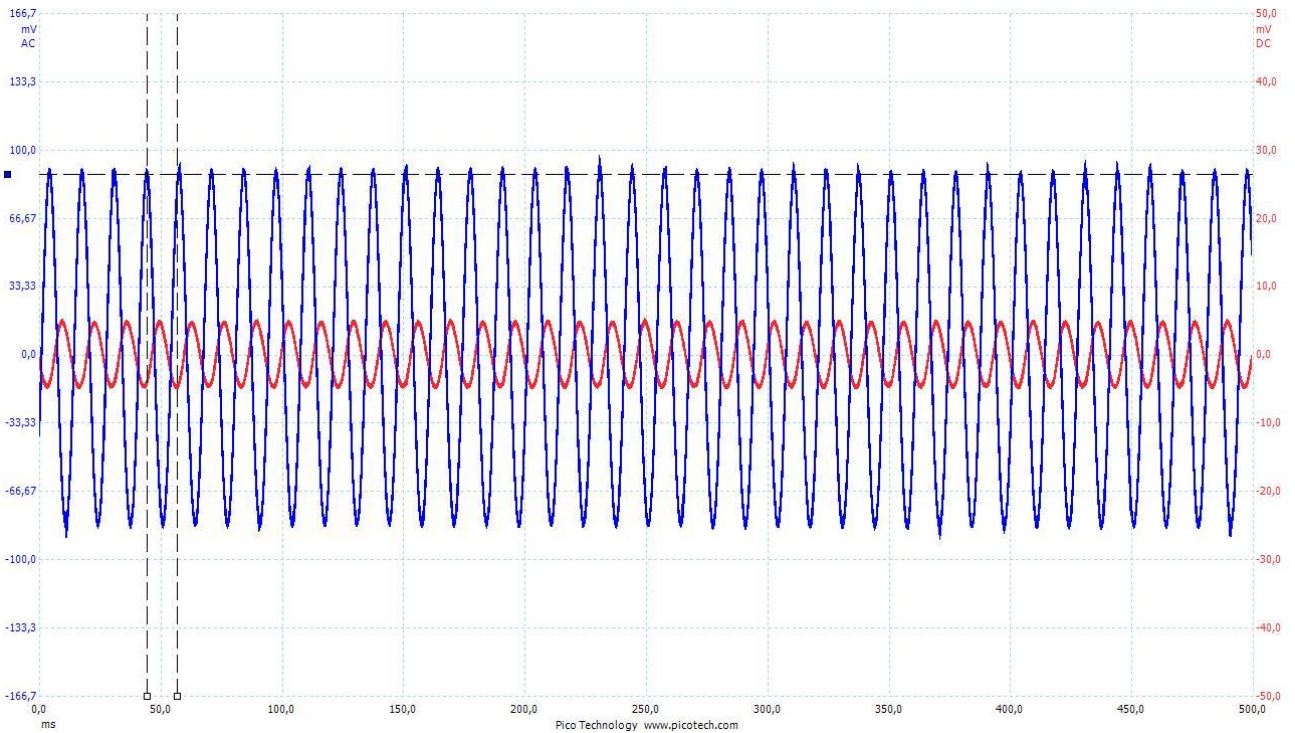
38 pav. Antrojo sparno smūginio bandymo rezultatai, mėlyna kreivė žymi natūralius sparno virpesius, brūkšninės vertikalios linijos žymi svyravimo viršūnes

Antrojo bandinio grafikas turi daugiau svyravimų iki tol, kol nustoja svyruoti, palyginus su pirmuoju bandiniu. Taip pat galima stebėti, jog sparnas virpa ilgesnį laiką, nei pirmasis – antrasis sparnas nustoja svyruoti ties maždaug 100 ms. Nustatytas laikas tarp dviejų maksimumų – 9,828 ms. Pritaikius 1 formulę ir atliktus skaičiavimus nustatyta, jog antrojo sparno pirmasis rezonansinis dažnis yra 101,75 Hz.

Nors abu sparnai priklauso tai pačiai laumžirgių rūšiai (*Aeshna Cyanea*), jų pirmieji rezonansiniai dažniai skiriasi (pirmojo bandinio – 81,57 Hz, antrojo bandinio – 101,75 Hz). Šis dažnių skirtumas gali būti dėl sparno plotų skirtumo, gyslų išsidėstymo sparne ir kitų sparno struktūrinių savybių. Taip pat įtaką gali daryti ir medinė lentelė bei klijai, kuriais klijuojamas sparnas, nes tyrimo bandinio masė ir dydis yra labai maži.

Turint smūginio bandymo rezultatus galima atlikti tolimesnius tyrimus, siekiant ištirti sparno dinamiką kontakte su oru ir toliau tirti *Aeshna Cyanea* rūšies laumžirgių pritaikymą mikro skraidantiems aparatams. Smūginis bandymas buvo atliktas siekiant išsiaiškinti ar apskritai galima rasti pirmąjį sparno rezonansinį dažnį su tokiu mažu tyrimu objektu.

Toliau buvo tiriamas pirmasis rezonansinis dažnis priverstinio žadinimo metodu. Buvo nustatytas pastovus darbo stendo vibracinis dažnis ir buvo stebima kaip virpa sparnas. Stendo vibracijos grafikuose vaizduojamos raudona kreive, o tuo tarpu sparno virpesiai žymimi kaip ir pirmojo bandymo metu – mėlynai.



39 pav. Pirmojo sparno priverstinio žadinimo bandymo rezultatai, brūkšninės vertikalios linijos žymi atstumą tarp svyravimo viršūnių, brūkšninė horizontali linija žymi sparno svyravimo viršūnes

39 paveiksle galima stebėti, jog didžiausia sparno pasiekta įtampa buvo 88,4 mV. Programinės įrangos pagalba buvo nustatytas svyravimų periodas paveiksle žymimas dvejomis vertikalėmis brūkšninėmis linijomis – 12,71 ms. Pagal formulę nr. 15 buvo apskaičiuotas pirmasis rezonansinis dažnis - 78,67 Hz. Palyginus su smūginio bandymo rezultatu, skirtumas tarp pirmojo ir antrojo bandymų periodų yra lygus 0,45 ms. Santykinė dviejų bandymų rezultatų paklaida skaičiuojama pagal formulę:

$$b = \frac{|x-a|}{x} \cdot 100\% = \frac{|81,57-78,67|}{81,57} \cdot 100\% = 3,55 \% \quad (16)$$

Čia:

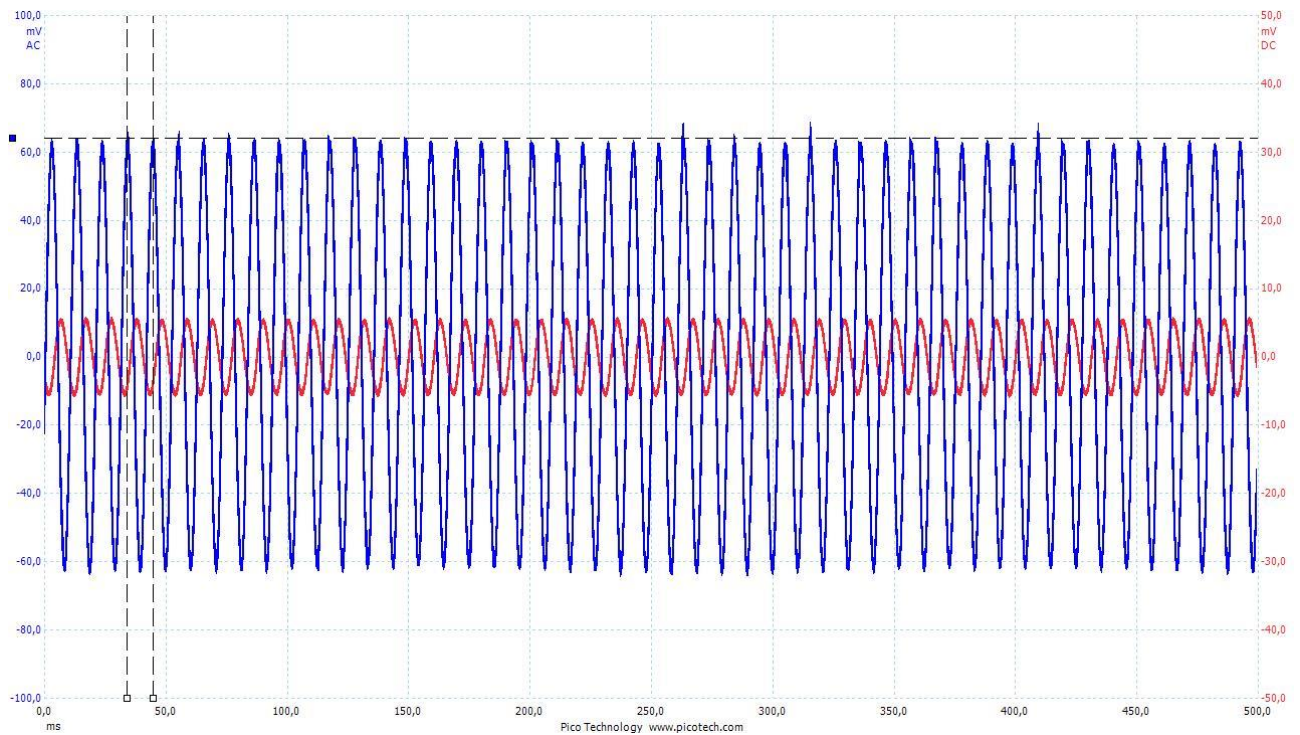
x – smūginio bandymo metu rasta periodo reikšmė

a – priverstinio žadinimo bandymo metu rasta periodo reikšmė

b – santykinė paklaida, %

Gauta santykinė paklaida gali būti dėl ne itin tikslų pažymėtų periodų taškų abiejuose bandymuose, kadangi šis tyrimo žingsnis buvo atliktas ne programinės įrangos pagalba, o ranka. Taip pat įtakos virpesiams šiek tiek gali turėti ir klijų sustingimas, kadangi smūginis bandymas buvo atliktas tik priklijavus sparną prie medinės lentelės, o antrasis, apytiksliai, po valandos. Tačiau didžiausią įtaką paklaidai visi turėjo periodo nustatymas rankiniu būdu.

Kadangi to paties tirtu sparno skirtingais bandymo būdais santykinė paklaida siekia vos 3,55 proc., galima laikyti, jog abejais būdais tiriant sparno pirmąjį rezonansinį dažnį, gaunamos reikšmės bus tokios pat.



40 pav. Antrojo sparno priverstinio žadinimo bandymo rezultatai, brūkšninės vertikalios linijos žymi atstumą tarp svyravimo viršūnių, brūkšninė horizontali linija žymi sparno svyravimo viršūnes

Antrojo sparno priverstinio žadinimo bandymo rezultatai taipogi yra panašūs palyginus su smūginio testo rezultatais. Nustatytas svyravimų periodas siekė 10,4 ms. Aukščiausias kreivės taškas nustatytas ties 64,23 mV. Apskaičiuotas pirmasis rezonansinis dažnis yra lygus 96,15. Apskaičiuota santykinė paklaida 5,5 proc.

Galima laikyti, kad laumžirgio sparno masė per visą sparno plotą yra pastovi. Sparno standumas pradeda keistis kuomet atsiranda kontaktas su oru, nes oras turi pasipriešinimo ir spūdumo savybių. Taigi, kai padidėja sparno virpesių amplitudė, sparnas daugiau juda ore, todėl oras daro didesnę įtaką sparnui.

Abu atlikti virpesių tyrimai parodė, kad sparno pirmuosius rezonansinius dažnius galima tirti keliais metodais, o gautieji rezultatai bus vienodi. Kadangi skirtingų sparnų pirmųjų rezonansinių dažnių reikšmės skyrėsi, nustatytųjų reikšmių negalima laikyti bendru rūšies, ar apskritai laumžirgio kaip vabzdžio požymiu, nes sparno natūralus dažnis priklauso nuo sparno ploto, gyslų išsidėstymo ir jų storio, bei kitų parametru.

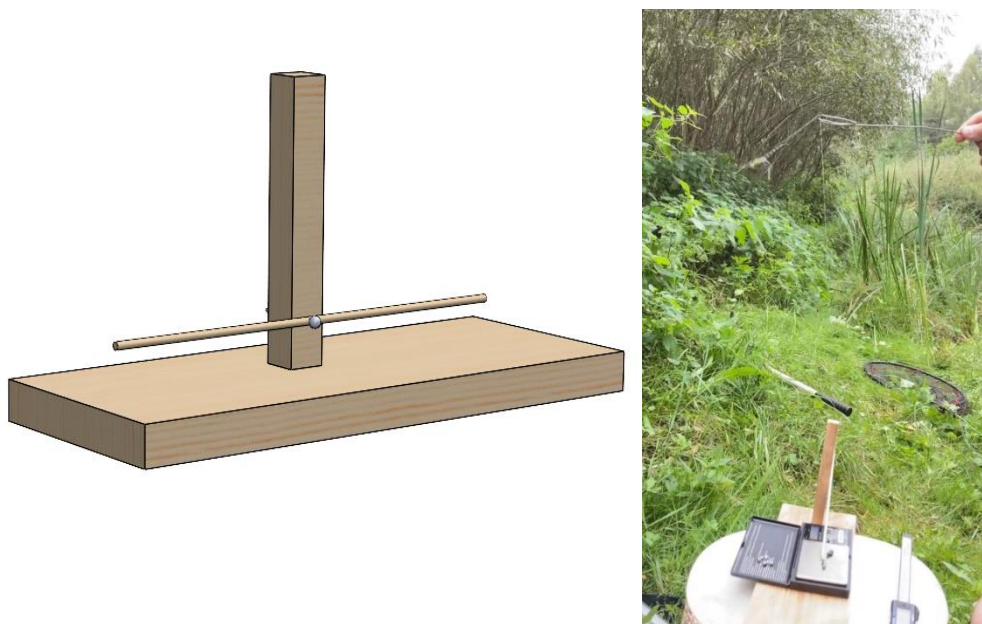
Skrydžio metu jėga veikianti laumžirgio sparnus yra periodinė. Dėl to sparnai yra veikiami inercinės jėgos, kuri atsiranda dėl sparnų masės pagreičio skrydžio metu, tamprumo jėgos, kuri priešinasi sparno deformacijai, išorinės jėgos, bei jėga, kurią sukuria sparno raumenys prie sparno šaknies.[66]

Šis natūralių sparno virpesių tyrimas suteikia įžvalgų ateities tyrimams ir laumžirgio pritaikymo mikro skraidančių aparatų kūrimui ir modeliavimui.

6. Eksperimentinis tyrimas

6.1. Eksperimentiniui tyrimui atlikti naudota įranga

Ekperimentiniam tyrimui atlikti buvo naudojamos GONEER įmonės juvelyrinės svarstyklės su 0,01 g matavimo tikslumu, filmavimui ir fotografavimui buvo naudojamas iPhone 12 telefonas, skaitmeninis slankmatis su 0,01 mm matavimo tikslumu, bei savadarbis medinis eksperimento stovas, su žiedu, padedančiu pririštą laumžirgį vesti norima kryptimi bei tam, kad laumžirgis nesusipintų su žvejybiniu valu. Eksperimento stovas pateiktas paveiksle:



41 pav. Eksperimentinio tyrimo stovas

Prie dešiniojo stovo horizontalaus strypelio galo pritvirtintas žvejybinis valas, kurio ilgis 0.5 m. Prie kito valo galo už dviejų galinių kojų yra rišamas laumžirgis. Kitoje stovo strypelio pusėje yra pritvirtinti žvejybiniai svareliai, kurie remiasi ant svarstyklių. Prieš kiekvieną naują tyrimo ciklą svarstyklės yra nutaruojamos.

6.2. Eksperimentinio tyrimo metu rastų laumžirgio rūšių aptarimas

Eksperimentinis tyrimas buvo Pietų Lietuvoje, Varėnos rajone prie dviejų vandens telkinių (54.21550, 24.29222 ir 54.23588, 24.25285). Viso buvo pagauti 48 laumžirgiai. Pagavus laumžirgį, jo kūnelis, sparnų plotis ir masė buvo pamatuota, taip pat buvo padarytos nuotraukos, norint tinkamai atskirti rūšis. Visa surinkta informacija buvo nusiųsta Ventės Rago ornitologinės stoties vedėjui V. Jusiui, kuris aprašė pagautas vabzdžių rūšis. Laumžirgių rūšys lietuvių ir lotynų kalbomis, koks autorius pirmasis aprašė šią rūšį, bei koks kiekvienos rūšies kiekis buvo pagautas atliekant eksperimentinį tyrimą pateiktas lentelėje:

6 lentelė. Sugautų laumžirgių rūšys

Rūšies nr. (atitinka paveiksle nr. 42)	Rūšis lotynų kalba	Rūšis lietuvių kalba	Kiekis
1	<i>Sympetrum sanguineum</i> (Müller, 1764)	kruvinoji skėtė, patinas	11
2	<i>Libellula fulva</i> (Müller, 1764)	rusvoji skėtė, patinas	2
3	<i>Orthetrum cancellatum</i> (Linnaeus, 1758)	tinkliškoji skėtė, patinas	2
4	<i>Somatochlora flavomaculata</i> (Vander Linden, 1825)	geltondėmė kordulija, patinas	1
5	<i>Somatochlora metallica</i> (Vander Linden, 1825)	blizgančioji kordulija, patinas	2
6	<i>Sympetrum sanguineum</i> (Müller, 1764)	kruvinoji skėtė, patelė	3
7	<i>Aeshna cyanea</i> (Müller, 1764)	mėlynžiedė ešna, mėlynasis laumžirgis, patelė	1
8	<i>Aeshna cyanea</i> (Müller, 1764)	mėlynžiedė ešna, mėlynasis laumžirgis, patinas	26

Kruvinoji skėtė (*Sympetrum sanguineum*) – Lietuvoje dažnai pasitaikanti laumžirgio rūšis. Kūnelio ilgis apie 40 mm, išskėstų sparnų plotis virš 55 mm [27].

Rusvoji skėtė (*Libellula fulva*) – kūnelio ilgis 42-45 mm, pilvelis platus [27].

Tinkliškoji skėtė (*Orthetrum cancellatum*) – dažnai Lietuvoje sutinkama rūšis, kūnelio ilgis apie 50 mm, atstumas tarp išskėstų sparnų – 80 mm. Rūšis linkusi skraidyti žemai ir trumpai, dažnai tupia, bei daro staigius posūkius [27].

Geltondėmė kordulija (*Somatochlora flavomaculata*) – kūnelio ilgis apie 55 mm, rūšis linkusi sustoti ir plasnėti vietoje [27].

Blizgančioji kordulija (*Somatochlora metallica*) – bendra ilgis apie 55 mm, kaip ir geltondėmė kordulija, šios rūšies laumžirgiai linkę sustoti ir plasnėti vietoje [27].

Mėlynžiedė ešna (*Aeshna cyanea*) – kūnelio ilgis apie 75 mm, atstumas tarp išskėstų sparnų galų iki 100 mm [27].

Toliau pateiktos visų rastų laumžirgių rūšių nuotraukos:



42 pav. Rastų laumžirgių rūšys

Dėl didžiausio surinktų mėlynžiežių ešų kiekio, norint gauti tiksliausius įmanomus rezultatus atliekant tolimesnį eksperimentinį tyrimą buvo pasirinkta būtent ši rūšis.

6.3. Eksperimentinio tyrimo eiga ir rezultatai

Laumžirgiai buvo gaudomi 2023 metų vasaros laikotarpiu, kuomet mėlynosios ešos buvo dažniausiai pasitaikiusi rūšis laumžirgių, eksperimento atlikimo vietose. Vabzdžiai buvo gaudomi tinkleliu, tuomet buvo pamatuojamas laumžirgio kūnelio ilgis bei atstumas tarp išskleistų sparnų. Vėliau buvo išmatuota laumžirgio masė ir pradedamas eksperimentas. Už dviejų galinių kojų buvo pririšamas žvejybinis valas, ir laumžirgis paleidžiamas skraidyti apie 10 sekundžių, o tuo pat metu svarstyklių rodmenys buvo filmuojami telefonu. Pabaigus filmuoti rodmenis, laumžirgio kojos buvo atrištos nuo valo ir vabzdys paleistas skraidyti toliau. Laumžirgio sukuriama jėga skaičiuojama pagal formulę:

$$F = m * g \quad (17)$$

Čia:

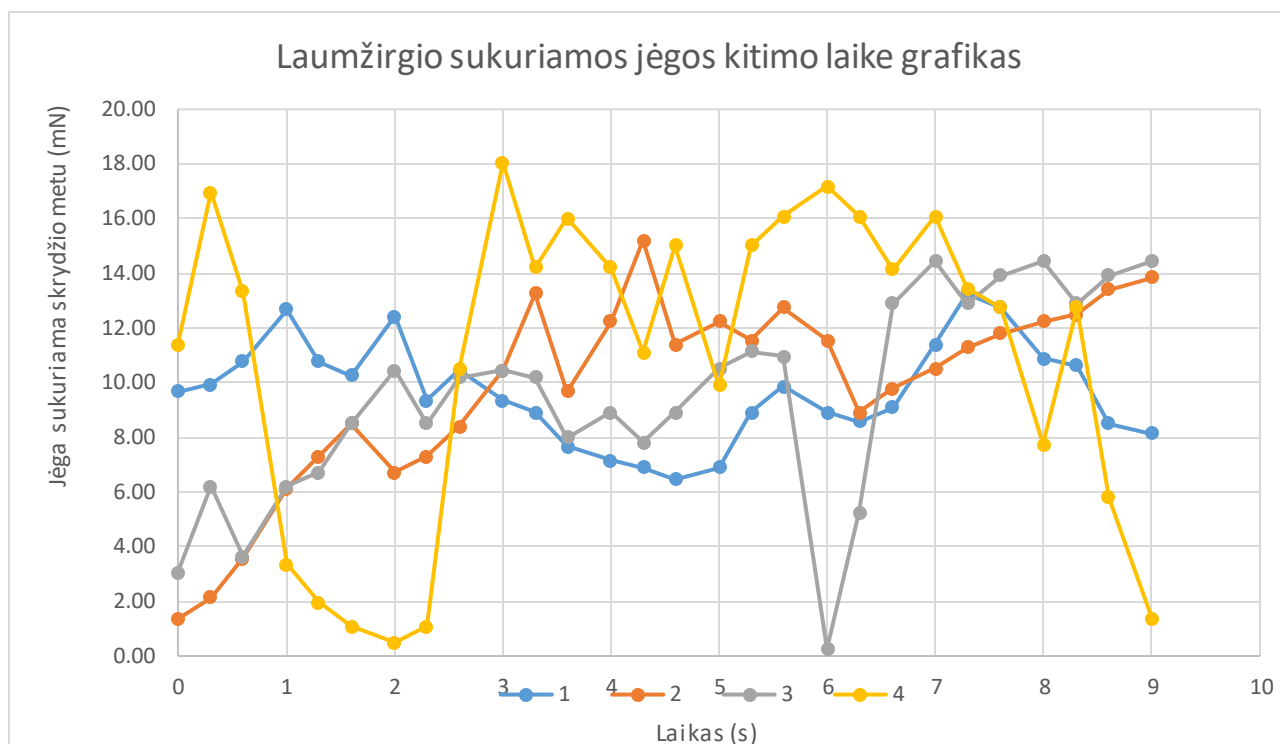
F – jėga, N

m – masė, g

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²

Dėl itin greitai besikeičiančios laumžirgio keliamosios jėgos, greitai keičiasi ir svarstyklių rodmenys. Per vieną sekundę svarstyklių rodmenys vidutiniškai keičiasi tris kartus. Kiekvienas atliktas tyrimas trunka 9 s, viso per šį laiką fiksuojamų skirtingų duomenų yra 28. Kaip galima stebėti eksperimentinio tyrimo rezultatų grafike (43 pav.), jėgos dydis, sukuriamas laumžirgio kinta itin greitai. Gali būti, jog keičiantis laumžirgio skrydžio režimui, kinta ir sukuriama jėga. Tuose laiko režiuose, kuriuose jėgos dydis kilo, galima teigti, jog laumžirgis arba skrido į viršų arba toliau nuo eksperimentinio stendo. Laiko režiuose, kuriuose jėgos dydis nekito arba kito nežymiai, laumžirgio skrydžio režimą galima

apibūdinti kaip plazdenimą vietoje. Mažėjantis jėgos dydis žymi laumžirgio žemėjimą arba artėjimą eksperimentinio stendo link.



43 pav. Laumžirgio sukuriama jėgos kitimo laike grafikas

Kaip matyti iš pateikto grafiko, pirmojo laumžirgio sukuriama jėga išlieka pastoviausia viso fiksuoto skrydžio metu, palyginti su kitais grafikais. Didžiausia pasiekta jėga yra 13,25 mN ties 7,3 sekundės, o mažiausia užfiksuota jėga yra 6,14 mN. Per visą laiko intervalą laumžirgis rodė pastovų kilimą arba leidimąsi, o staigių kilimų, nusileidimų ar apsisukimų neužfiksuota. Žvelgiant į pirmąjį grafiką, galima daryti prielaidą, kad laumžirgio skrydžio ciklas buvo sklendimas vietoje.

Antrajame grafike laumžirgis nuo skrydžio įrašymo pradžios iki 4,3 sekundės beveik tolygiai kyla nuo 1,36 mN iki 15,21 mN, o 2 ir 3,6 sekundės patiria nedidelius generuojamos jėgos kritimus. Po to laumžirgis ties 6,3 sekunde nusileidžia iki mažiausio 8,92 mN kuriamos jėgos taško ir vėl pradeda labai tolygiai kilti aukštyn.

Kaip matyti grafike, trečiasis laumžirgis per 9 sekundes 4 kartus pakeitė skrydžio ciklą. Pakilimas truko iki 2 sekundžių, ties 0 sekundžių užfiksuota jėga buvo 3,06 mN, 2-ąją sekundę jėga buvo jau 10,45 mN. Paskui iki 5,6 sekundės laumžirgis sklendė vietoje, todėl veikiančios jėgos dydis kito nežymiai, o nuo 5,6 iki 6 sekundės laumžirgis staigiai leidosi žemyn. Tada laumžirgis vėl staigiai pakilo ir pradėjo sklęsti vietoje.

Ketvirtojo laumžirgio skrydis labai kritiškas ir staigus, mažiausia fiksuota jėga buvo 0,49 mN, o didžiausia - 18,05 mN. Pradžioje laumžirgio skrenda taip, tarsi ruošūsi pakilti, bet staigiai neria žemyn, tada vieną sekundę tolygiai leidžiasi ir vėl staigiai kyla aukštyn arba staigiai keičia skrydžio kryptį. Kitas penkias sekundes laumžirgis išlaiko panašų aukštį ir galiausiai nusileidžia.

Kadangi tyrimo metu laumžirgio amžiaus nustatyti nepavyko ir negalima teigti, kad laumžirgio amžius turi įtakos jėgos susidarymui, šis parametras nebus laikomas turinčiu įtakos. Laumžirgio masė nėra vienas iš pagrindinių parametru darančių įtaką sukuriama jėgai, nes mažiausios masės laumžirgis sukūrė didžiausią jėgą, o antras pagal masę laumžirgis sukūrė antrą pagal dydį jėgą. Tą patį galima pasakyti ir apie kitus galimus laumžirgių parametrus - atstumą tarp sparnų galų ir sparno

plotą, grafike pavaizduotų laumžirgių parametrai pateikti lentelėje. Didžiausią jėgą sukūrė tas laumžirgis, kurio minėtieji parametrai nebuvo didžiausi. Todėl galima teigti, kad kiti parametrai turi didžiausią įtaką sukuriama jėgai. Galbūt tai galėtų būti laumžirgio amžius, mechaniniai sparno pažeidimai, o galbūt reikėtų fiksuoti ilgesnį skrydžio intervalą.

7 lentelė. Tirtų laumžirgių parametrai

Laumžirgio nr.	Laumžirgio masė:	Atstumas tarp sparnų galų:	Sparno plotas:
1	0.77 g	96.6 mm	375.56 mm ²
2	0.87 g	103.7 mm	435.24 mm ²
3	0.67 g	97.5 mm	395.42 mm ²
4	0.79 g	99 mm	405.85 mm ²

Norint įsitikinti, jog didesnės masės laumžirgis nebūtinai sukurs didesnę jėgą, palyginus su mažesnės masės, tos pačios rūšies laumžirgiu, stebimi visi laumžirgiai, su kuriais buvo atliktas eksperimentinis tyrimas (rezultatų lentelė pateikta priede Nr. 1). Mažiausią masę turėjęs laumžirgis nr. 18, sukūrė 13.44 mN jėgą, nors jo masė buvo 0.65 g, tuo tarpu laumžirgis nr. 19, kurio masė 0.97 g, sukūrė 9.52 mN jėgą. Du didžiausi pagauti laumžirgiai (nr. 14 ir nr. 17) atitinkamai sukūrė 19.82 mN ir 14.42 mN jėgas.

Didesnė jėga gali būti sukuriama dėl skirtingos sparnų formos, kas šio tyrimo atveju įtakos neturi, nes visi laumžirgiai buvo tos pačios rūšies, tačiau gali būti, kad mažesnę jėgą sukuriantys laumžirgiai, buvo patyrę mechaninių pažeidimų ar sparno nutrupėjimų. Toliau lentelėje pateikti duomenys apie laumžirgių sparno plotų, didžiausios sukurtos jėgos ir sparno mechaninio pažeidimo sąsają:

8 lentelė. Tirtų laumžirgių parametrai

Laumžirgio nr.	15	16	17	18	19	20
Sparno plotas, mm ²	419.79	446.52	366.09	380.24	417.85	408.63
Didžiausia sukurta jėga, mN	23.45	15.4	14.52	13.44	9.52	12.26
Ar sparnas patyręs mech. pažeidimą?	Ne	Ne	Taip	Ne	Taip	Taip

Kaip galima stebėti laumžirgių nr. 15 ir 19 pavyzdžiuose, sparno plotai yra labai panašūs, laumžirgio nr. 15 masė yra 0.77 g, o nr. 19 0.97 g, didžiausia sukurta jėga žymiai skiriasi. Sparnas nr. 15 nebuvo patyręs jokio mechaninio pažeidimo, o sparno nr. 19 dalis buvo nutrupėjusi. Taipogi stebint sparnus nr. 16 ir 17, kurių paviršiaus plotai gan ženkliai skiriasi, o didžiausia sukurta jėga skiriasi per mažiau nei 1 N, galima kelti hipotezę kad jei sparnas nr. 17 nebūtų pažeistas, jo sukurta jėga būtų didesnė nei nr. 16, nors ir pastarojo masė yra didesnė per 0.15 g. Iš šių duomenų galima teigti, jog mechaniniai pažeidimai sparne daro didelę įtaką laumžirgio sukuriama jėgos plasnojant dydžiui.

Išvados

1. Baigiamojo darbo metu buvo išnagrinėta bionikos reikšmė ir taikymas aviacijoje ir kitose srityse, laumžirgio anatomija, sparno morfologija bei pagrindinių medžiagų, iš kurių sudaryti sparno komponentai (α chitino ir membranos) savybės. Buvo aptarti kitų mokslininkų darbai, kuriuose buvo tiriamos laumžirgio bei laumžirgio priekinio sparno biologinės ir fizikinės savybės.
2. SEM tyrimo metu buvo tiriamos įvairios priekinio *Aeshna Cyanea* laumžirgio sparno zonos. Buvo stebima šaknis, kurioje yra daug gyslų, bei mechanosensorius, kuriuo laumžirgis gali stebėti aplinkos pasikeitimus realiu metu. Taip pat buvo stebėta priekinė kraštinė gysla ir ją sudaranti dantyta struktūra, kuri padeda mažinti garsą sukeliama skrydžio metu sukuriantis judantis sparnas. SEM tyrimo metu stebėtas mazgelis, kuriame yra resilino. Taip sparnas gali atlaikyti didesnes apkrovas ir būti elastingesnis. Taipogi stebėtos įvairios gyslos. Šis tyrimas padėjo susipažinti su sparno sandara itin dideliame mastelyje, nes sparnas buvo didinamas nuo 25 iki 1200 kartų, priklausomai nuo stebėtos struktūros dalies.
3. Baigiamojo projekto metu buvo atliktas matematinis ir skaitinis sparno modelis. Sudarant sparno matematinį modelį buvo nagrinėjamos įvairios lygtys ir stebima kaip tarpusavyje sąveikauja deformuojamas kūnas ir skystis supantis jį. Skaitinio modeliavimo metu buvo sudarytas redukuotas sparno modelis, kurio šaknis buvo standžiai įtvirtinta, o priekinė kraštinė gysla nuo mazgelio iki sparno galo apkrauta 6,7 N jėga. Atlikus statinę sparno analizę buvo nustatyta, jog didžiausi sparno patirti poslinkiai buvo 0,659 mm, o didžiausi įtempiai – 6,977 MPa. Taip pat buvo atliktas redukuotas mazgelio modelis kuriam buvo pritaikytos α chitino savybės. Jis taipogi buvo apkrautas 6,7 N jėga. Rezultatai teigė, jog didžiausi įtempiai – 32,301 MPa, o didžiausi poslinkiai – 0,002 mm.
4. Sparno pirmojo rezonansinio dažnio nustatymui buvo atlikti du tyrimai – smūginis ir priverstinio žadinimo. Tyrimo metu buvo studijuojami 2 sparnai. Abiems sparnams buvo atlikti abu tyrimai. Abiejų tyrimų rezultatai buvo panašūs - pirmojo sparno nustatytas pirmasis rezonansinis dažnis smūginiu metodu – 81,57 Hz, priverstinio žadinimo metodu – 78,67 Hz, tuo tarpu antrojo sparno rezultatai atitinkamai 101,57 Hz ir 96,15 Hz.
5. Norint nustatyti laumžirgio sukuriama jėgą skrydžio metu buvo atliktas eksperimentinis tyrimas. Jo metu buvo nustatoma kaip keičiasi laumžirgio sukuriama jėga keičiantis laikui. Taip pat šio tyrimo metu buvo galima stebėti skrydžio ciklą pasikeitimus. Tyrimo rezultatai nurodė, jog laumžirgio masė nėra vienas iš pagrindinių parametrų darančių įtaką sukuriamai jėgai, nes mažiausios masės laumžirgis sukūrė didžiausią jėgą, o antras pagal masę laumžirgis sukūrė antrą pagal dydį jėgą. Taip pat tyrimo metu nustatyta, jog patirti mechaniniai sparno pažeidimai daro didelę įtaką laumžirgio sukuriamos jėgos dydžiui skrydžio metu.

Literatūros sąrašas

1. *50 of the World's Best Biomimicry Examples (so far)*. [interaktyvus]. Prieiga internete: <https://www.learnbiomimicry.com/blog/best-biomimicry-examples>
2. *What are the similarities between aircraft and birds?*. [interaktyvus]. Prieiga internete: <https://www.grupooneair.com/similarities-between-aircraft-and-birds/>
3. SKALSKI, Paweł. *Bionics in Aviation. Transactions on Aerospace Research*. 1 rugsėjo 2018. Vol. 2018, no. 3, p. 103–113. DOI 10.2478/tar-2018-0025.
4. VAITKEVIČIUS, Petras Henrikas. *Bionika*. [interaktyvus]. Prieiga internete: <https://www.vle.lt/straipsnis/bionika/>
5. QUINN, Sonya ir GAUGHRAN, William. *Bionics—An inspiration for intelligent manufacturing and engineering. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. gruodžio 2010. Vol. 26, no. 6, p. 616–621. DOI 10.1016/j.rcim.2010.06.021.
6. UNIVERSITY OF PITTSBURGH. *Engineers Create Tiny Robot “Bugs” That Can Go Just About Anywhere*. . 4 kovo 2022.
7. YU, Xiao-lei, SUN, Yong-rong, LIU, Jian-ye ir CHEN, Bing-wen. *Autonomous navigation for unmanned aerial vehicles based on chaotic bionics theory. Journal of Bionic Engineering*. rugsėjo 2009. Vol. 6, no. 3, p. 270–279. DOI 10.1016/S1672-6529(08)60123-7.
8. MALYASOV, Dylan. *U.S. Air Force develops bio-inspired micro drones*. [interaktyvus]. 16 birželio 2021. Prieiga internete: <https://defence-blog.com/u-s-air-force-develops-bio-inspired-micro-drones/>
9. RAJABI, H. ir GORB, S.N. *How do dragonfly wings work? A brief guide to functional roles of wing structural components. International Journal of Odonatology*. 2 sausio 2020. Vol. 23, no. 1, p. 23–30. DOI 10.1080/13887890.2019.1677515.
10. *Dragonflies and Damselflies: Model Organisms for Ecological and Evolutionary Research | Oxford Academic*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://academic.oup.com/book/27826>
11. RUDOLF, J., WANG, L.-Y., GORB, S.N. ir RAJABI, H. *On the fracture resistance of dragonfly wings. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. lapkričio 2019. Vol. 99, p. 127–133. DOI 10.1016/j.jmbbm.2019.07.009.
12. *Functional Morphology of Insect Wings | Annual Review of Entomology*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.en.37.010192.000553>
13. RAJABI, H., GHOROUBI, N., STAMM, K., APPEL, E. ir GORB, S.N. *Dragonfly wing nodus: A one-way hinge contributing to the asymmetric wing deformation. Acta Biomaterialia*. rugsėjo 2017. Vol. 60, p. 330–338. DOI 10.1016/j.actbio.2017.07.034.
14. HOU, Dan, ZHONG, Zheng, YIN, Yajun, PAN, Yihui ir ZHAO, Hongxiao. *The Role of Soft Vein Joints in Dragonfly Flight*. . 2017.
15. ZHAO, Shuo, YE, Xiaogang, DAI, Xiangping, WANG, Xinqiu, YU, Shihua ir ZHONG, Boxiong. *Drosophila melanogaster resilin improves the mechanical properties of transgenic silk*.

- XU, Jian (sud.), *PLOS ONE*. 3 kovo 2023. Vol. 18, no. 3, p. e0282533. DOI 10.1371/journal.pone.0282533.
16. APPEL, Esther, MICHELS, Jan ir GORB, Stanislav N. *Resilin in Insect Flight Systems. Advanced Functional Materials*. 18 rugpjūčio 2023. P. 2215162. DOI 10.1002/adfm.202215162.
17. COMBES, S. A. ir DANIEL, T. L. *Flexural stiffness in insect wings I. Scaling and the influence of wing venation. Journal of Experimental Biology*. 1 rugsėjo 2003. Vol. 206, no. 17, p. 2979–2987. DOI 10.1242/jeb.00523.
18. XIAO, Kewei, BAI, Ke, WANG, Wensheng ir SONG, Fan. *Experimental study on the microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly. Acta Mechanica Sinica*. 12 birželio 2007. Vol. 23, no. 3, p. 281–285. DOI 10.1007/s10409-007-0070-9.
19. *Effects of wing deformation on aerodynamic forces in hovering hoverflies | Journal of Experimental Biology | The Company of Biologists*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://journals.biologists.com/jeb/article/213/13/2273/34074/Effects-of-wing-deformation-on-aerodynamic-forces>
20. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology | Home*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://www.springer.com/journal/10237>
21. WEI, Anran, FU, Jimin ir GUO, Fenglin. *Mechanical properties of chitin polymorphs: A computational study. Journal of Materials Science*. liepos 2021. Vol. 56, no. 20, p. 12048–12058. DOI 10.1007/s10853-021-06086-8.
22. SUN, Jiyu ir BHUSHAN, Bharat. *The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their role on flyability. Comptes Rendus Mécanique*. sausio 2012. Vol. 340, no. 1–2, p. 3–17. DOI 10.1016/j.crme.2011.11.003.
23. KESEL, Antonia B, PHILIPPI, Ute ir NACHTIGALL, Werner. *Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method. Computers in Biology and Medicine*. 1998.
24. RAJABI, H., SHAFIEI, A., DARVIZEH, A., DIRKS, J.-H., APPEL, E. ir GORB, S. N. *Effect of microstructure on the mechanical and damping behaviour of dragonfly wing veins. Royal Society Open Science*. vasario 2016. Vol. 3, no. 2, p. 160006. DOI 10.1098/rsos.160006.
25. ZHANG, Zhihui, ZHANG, Lan, YU, Zhenglei, LIU, Jingjing, LI, Xiujuan ir LIANG, Yunhong. *In-situ mechanical test of dragonfly wing veins and their crack arrest behavior. Micron*. liepos 2018. Vol. 110, p. 67–72. DOI 10.1016/j.micron.2018.05.003.
26. REN, Huaihui, WANG, Xishu, LI, Xudong ir CHEN, Yinglong. *Effects of dragonfly wing structure on the dynamic performances. Journal of Bionic Engineering*. kovo 2013. Vol. 10, no. 1, p. 28–38. DOI 10.1016/S1672-6529(13)60196-1.
27. GLIWA, Bernd ir ŠVITRA, Giedrius. *Lietuvos laumžirgiai*. 2016.
28. BOMPHREY, Richard J., NAKATA, Toshiyuki, HENNINGSSON, Per ir LIN, Huai-Ti. *Flight of the dragonflies and damselflies. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 26 rugsėjo 2016. Vol. 371, no. 1704, p. 20150389. DOI 10.1098/rstb.2015.0389.
29. *Details of Insect Wing Design and Deformation Enhance Aerodynamic Function and Flight Efficiency | Science*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1175928>

30. JONGERIUS, S. R. ir LENTINK, D. *Structural Analysis of a Dragonfly Wing*. *Experimental Mechanics*. lapkričio 2010. Vol. 50, no. 9, p. 1323–1334. DOI 10.1007/s11340-010-9411-x.
31. RAJABI, H., STAMM, K., APPEL, E. ir GORB, S.N. *Micro-morphological adaptations of the wing nodus to flight behaviour in four dragonfly species from the family Libellulidae (Odonata: Anisoptera)*. *Arthropod Structure & Development*. liepos 2018. Vol. 47, no. 4, p. 442–448. DOI 10.1016/j.asd.2018.01.003.
32. CHEN, Y.H., SKOTE, M., ZHAO, Y. ir HUANG, W.M. *Stiffness evaluation of the leading edge of the dragonfly wing via laser vibrometer*. *Materials Letters*. balandžio 2013. Vol. 97, p. 166–168. DOI 10.1016/j.matlet.2013.01.110.
33. KHAN, Md Akhtar ir PADHY, Chinmaya. *Aerodynamic and structural analysis of bio-mimetic corrugated wing*. *Fluid Mechanics research International Journal [interaktyvus]*. 26 birželio 2019. Vol. 3, no. 2. [Žiūrėta 10 gruodžio 2022]. DOI 10.15406/fmrij.2019.03.00053. Prieiga internete: <https://medcraveonline.com/FMRIJ/aerodynamic-and-structural-analysis-of-bio-mimetic-corrugated-wing.html>
34. PENG, Liansong, PAN, Tianyu, ZHENG, Mengzong, SONG, Shiyong, SU, Guanting ir LI, Qiushi. *Kinematics and Aerodynamics of Dragonflies (Pantala flavescens, Libellulidae) in Climbing Flight*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 16 kovo 2022. Vol. 10, p. 795063. DOI 10.3389/fbioe.2022.795063.
35. CHU, Yung Jeh, GANESAN, Poo Balan ir ALI, Mohamad Azlin. *Fluid–structure interaction simulation on flight performance of a dragonfly wing under different pterostigma weights*. *Journal of Mechanics*. 28 sausio 2021. Vol. 37, p. 216–229. DOI 10.1093/jom/ufaa013.
36. BODE-OKE, Ayodeji T, ZEYGHAMI, Samane ir DONG, Haibo. *Optimized Body Deformation in Dragonfly Maneuvers*. . P. 10.
37. HOJAJI, Mohammad, SOUFIVAND, Mohammad Reza ir LAVIMI, Roham. *An Experimental Comparison between Wing Root and Wingtip Corrugation Patterns of Dragonfly Wing at Ultra-low Reynolds Number and High Angles of Attack*. *Journal of Applied and Computational Mechanics [interaktyvus]*. spalio 2020. No. Online First. [Žiūrėta 11 gruodžio 2022]. DOI 10.22055/jacm.2020.33944.2310. Prieiga internete: <https://doi.org/10.22055/jacm.2020.33944.2310>
38. *Flow Phenomena in Nature Volume 2*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://www.witpress.com/books/978-1-84564-095-8>
39. *The Importance of Torsion in the Design of Insect Wings | Journal of Experimental Biology | The Company of Biologists*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://journals.biologists.com/jeb/article/140/1/137/5758/The-Importance-of-Torsion-in-the-Design-of-Insect>
40. *Wing flexibility enhances load-lifting capacity in bumblebees | Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 1 lapkričio 2022]. Prieiga internete: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2013.0531>
41. GUSTAFSON, Karl ir LEBEN, Robert. *Computation of dragonfly aerodynamics*. *Computer Physics Communications*. balandžio 1991. Vol. 65, no. 1–3, p. 121–132. DOI 10.1016/0010-4655(91)90163-F.
42. WEIS-FOGH, Torkel. *QUICKESTIMATES OF FLIGHT FITNESS IN HOVERING ANIMALS, INCLUDING NOVEL MECHANISMS FOR LIFT PRODUCTION*. . P. 62.

43. AZUMA, Akira ir WATANABE, Tadaaki. *FLIGHT PERFORMANCE OF A DRAGONFLY*. . P. 32.
44. MAXWORTHY, T. *Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. Part 1. Dynamics of the 'fling'*. *Journal of Fluid Mechanics*. 12 liepos 1979. Vol. 93, no. 1, p. 47–63. DOI 10.1017/S0022112079001774.
45. MEHDI, Husain, LAKHERA, Brajesh Kumar ir KAMBOJ, Anil. *Numerical Analysis of Steady and Unsteady Flow for Dragonfly Wing Section in Gliding Mode*. . P. 7.
46. VASILIAUSKAS, Eimantas. *DUSLINTUVO VIBRACIJOS ĮTAKA AERODINAMINĖMS CHARAKTERISTIKOMS*. 2019.
47. RAJABI, H., GHOROUBI, N., DARVIZEH, A., APPEL, E. ir GORB, S. N. *Effects of multiple vein microjoints on the mechanical behaviour of dragonfly wings: numerical modelling*. *Royal Society Open Science*. kovo 2016. Vol. 3, no. 3, p. 150610. DOI 10.1098/rsos.150610.
48. BENEDETTI, Lorenzo, BIANCHI, Giovanni ir BELLOLI, Marco. *A numerical study about the flight of the dragonfly: 2D gliding and 3D hovering regimes*. .
49. OKAMOTO, Masato, YASUDA, Kunio ir AZUMA, Akira. *Aerodynamic Characteristics of the Wings and Body of a Dragonfly*. *Journal of Experimental Biology*. 1 vasario 1996. Vol. 199, no. 2, p. 281–294. DOI 10.1242/jeb.199.2.281.
50. FUJITA, Yusuke ir IIMA, Makoto. *Aerodynamic performance of dragonfly wing model that starts impulsively: how vortex motion works*. *Journal of Fluid Science and Technology*. 2023. Vol. 18, no. 1, p. JFST0013–JFST0013. DOI 10.1299/jfst.2023jfst0013.
51. ZHENG, Hao, HABLICSEK, Marton ir AKBARZADEH, Masoud. *Lightweight structures and the geometric equilibrium in dragonfly wings*. .
52. REN, Huai-Hui, WANG, Xi-Shu, CHEN, Ying-Long ir LI, Xu-Dong. *Biomechanical behaviors of dragonfly wing: relationship between configuration and deformation*. *Chinese Physics B*. kovo 2012. Vol. 21, no. 3, p. 034501. DOI 10.1088/1674-1056/21/3/034501.
53. HOU, Gene, WANG, Jin ir LAYTON, Anita. *Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction — A Review*. *Communications in Computational Physics*. rugpjūčio 2012. Vol. 12, no. 2, p. 337–377. DOI 10.4208/cicp.291210.290411s.
54. *Let's Familiarize Ourselves with the SEM*. Hitachi High-Technologies Corporation.
55. *Hitachi TM4000II brochure*.
56. FABIAN, Joseph, SIWANOWICZ, Igor, UHRHAN, Myriam, MAEDA, Masateru, BOMPHREY, Richard J. ir LIN, Huai-Ti. *Systematic characterization of wing mechanosensors that monitor airflow and wing deformations*. *iScience*. balandžio 2022. Vol. 25, no. 4, p. 104150. DOI 10.1016/j.isci.2022.104150.
57. JIANG, Shan, HU, Yong, LI, Qiang, WANG, Hongde, LIN, Yang, ZHOU, Xiaoqin ir LIU, Qiang. *The Noise-Reduction Characteristics of Microstructure of Dragonfly Wing Leading Vein*. *Applied Sciences*. 26 kovo 2021. Vol. 11, no. 7, p. 2970. DOI 10.3390/app11072970.

58. TAKIZAWA, Kenji, TEZDUYAR, Tayfun E. ir BUSCHER, Austin. *Space–time computational analysis of MAV flapping-wing aerodynamics with wing clapping*. *Computational Mechanics*. birželio 2015. Vol. 55, no. 6, p. 1131–1141. DOI 10.1007/s00466-014-1095-0.
59. LEE-RAUSCH, Elizabeth M. ir BATINA, John T. *Wing flutter computations using an aerodynamic model based on the Navier-Stokes equations*. *Journal of Aircraft*. lapkričio 1996. Vol. 33, no. 6, p. 1139–1147. DOI 10.2514/3.47068.
60. WILLIAMS, P. T. *CCM Continuity Constraint Method: A Finite-Element Computational Fluid Dynamics Algorithm for Incompressible Navier-Stokes Fluid Flows*. 1993.
61. *Tensors*. [interaktyvus]. Prieiga internete: https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/mineral_physics/tensors.html
62. SHWETANSHU, Gaurav. *Investigation of Fluid Flow and Aerodynamic Performance of a Corrugated Dragonfly Wing section: A Review*. . 2017.
63. ESHGHI, Shahab, NABATI, Fatemeh, SHAFAGHI, Shaghayegh, NOORAEFFAR, Vahid, DARVIZEH, Abolfazl, GORB, Stanislav N. ir RAJABI, Hamed. *An image based application in Matlab for automated modelling and morphological analysis of insect wings*. *Scientific Reports*. 17 rugpjūčio 2022. Vol. 12, no. 1, p. 13917. DOI 10.1038/s41598-022-17859-9.
64. OORSCHOT, Brett Klassen Van. *AERODYNAMICS AND ECOMORPHOLOGY OF FLEXIBLE FEATHERS AND MORPHING BIRD WINGS*. .
65. LIETZ, Carina, SCHABER, Clemens F., GORB, Stanislav N. ir RAJABI, Hamed. *The damping and structural properties of dragonfly and damselfly wings during dynamic movement*. *Communications Biology*. gruodžio 2021. Vol. 4, no. 1, p. 737. DOI 10.1038/s42003-021-02263-2.
66. CHEN, Jen-San, CHEN, Jeng-Yu ir CHOU, Yuan-Fang. *On the natural frequencies and mode shapes of dragonfly wings*. *Journal of Sound and Vibration*. birželio 2008. Vol. 313, no. 3–5, p. 643–654. DOI 10.1016/j.jsv.2007.11.056.

1 Priedas

t(s)	1	F2	1	2	F5	F6	F7	3	F9	F10	F11	F12	4	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
0	10.96	0.85	9.68	1.36	11.30	7.73	1.44	3.06	7.65	3.24	16.38	5.10	11.38	10.10	3.14	5.10	1.08	2.94	6.87	3.73
0.3	7.31	2.55	9.94	2.12	7.48	9.60	2.38	6.20	9.03	0.98	15.79	10.01	16.97	12.36	0.49	10.89	3.43	5.79	9.32	5.30
0.6	0.68	4.84	10.79	3.57	1.87	0.68	7.82	3.65	5.10	8.83	10.50	11.28	13.34	13.73	0.78	11.87	4.41	6.57	6.97	2.45
1	1.10	3.74	12.66	6.12	1.44	1.27	14.70	6.20	6.38	11.09	9.84	13.73	3.34	19.82	3.83	12.95	4.22	8.44	8.93	4.41
1.3	6.97	4.84	10.79	7.31	1.87	4.76	7.82	6.71	7.06	16.97	13.44	10.30	1.96	12.36	10.50	11.87	6.28	8.93	7.85	8.53
1.6	1.53	3.74	10.28	8.50	4.93	9.51	9.09	8.50	9.42	11.09	13.83	12.26	1.08	16.78	10.99	10.50	10.30	10.59	8.24	6.67
2	1.10	1.87	12.40	6.71	5.86	15.55	7.73	10.45	11.38	10.20	12.75	8.14	0.49	9.71	11.67	12.85	11.38	8.93	7.06	0.69
2.3	6.88	3.74	9.35	7.31	6.03	9.51	5.52	8.50	9.42	9.32	10.50	6.67	1.08	13.34	13.34	15.30	13.24	7.75	8.04	2.06
2.6	9.18	4.25	10.45	8.41	7.31	17.33	6.80	10.19	7.06	10.20	6.18	5.40	10.50	16.78	12.75	9.22	11.38	10.40	8.44	1.77
3	7.82	4.42	9.35	10.45	8.41	18.35	7.48	10.45	5.69	2.45	7.55	2.84	18.05	13.34	13.34	7.26	13.34	7.75	8.83	2.35
3.3	1.19	4.16	8.92	13.25	11.81	17.33	6.80	10.19	5.79	3.83	9.12	7.65	14.22	16.97	12.46	6.57	13.54	9.32	8.44	9.81
3.6	1.78	3.74	7.65	9.68	11.47	16.06	3.99	7.99	8.83	2.45	4.22	10.20	15.99	16.58	6.47	0.29	12.07	7.85	5.40	11.09
4	5.78	1.44	7.14	12.23	13.17	15.29	3.23	8.92	4.02	0.59	3.83	10.99	14.22	13.34	12.46	4.02	12.56	4.81	5.79	9.81
4.3	6.12	0.59	6.88	15.21	17.08	12.06	2.89	7.82	2.94	2.65	3.53	14.03	11.09	10.30	11.09	14.22	12.07	8.04	8.24	6.77
4.6	6.54	2.80	6.46	11.38	18.61	11.13	2.46	8.92	5.49	4.12	1.77	13.34	15.01	10.69	12.65	5.98	13.24	12.26	9.22	4.02
5	2.12	3.91	6.88	12.23	18.18	8.33	2.89	10.53	3.53	5.20	0.29	14.22	9.91	15.40	23.45	7.46	10.59	13.44	3.92	5.10
5.3	1.02	3.48	8.92	11.55	15.55	2.72	4.76	11.13	5.49	10.30	1.67	14.72	15.01	10.69	12.65	14.22	7.85	12.26	6.18	9.61
5.6	2.55	2.80	9.85	12.74	14.36	0.00	5.95	10.96	6.47	9.52	10.20	12.46	16.09	8.04	13.15	14.62	10.69	10.79	3.92	5.10
6	7.22	1.19	8.92	11.55	13.85	3.06	7.31	0.25	8.04	5.00	3.04	10.89	17.17	3.53	12.26	9.81	4.12	7.95	3.24	6.18
6.3	4.67	3.99	8.58	8.92	13.51	8.33	5.95	5.27	0.98	9.52	6.08	7.75	16.09	5.10	11.97	7.46	6.97	5.00	3.73	4.22
6.6	3.65	1.02	9.09	9.77	12.83	2.04	4.76	12.91	5.40	4.41	9.71	10.89	14.13	7.95	12.36	8.53	7.65	4.71	6.57	1.86
7	4.42	0.76	11.38	10.53	14.70	10.87	4.25	14.44	6.57	9.52	8.53	12.46	16.09	11.48	11.97	10.50	8.53	1.28	9.52	0.88
7.3	6.63	1.02	13.25	11.30	12.83	7.14	0.93	12.91	8.63	4.41	4.22	10.89	13.44	7.95	2.45	14.32	10.20	4.71	5.30	0.39
7.6	8.41	1.53	12.74	11.81	14.19	10.87	4.33	13.93	5.40	8.04	8.53	8.44	12.75	5.20	5.69	15.40	11.97	6.47	8.83	4.91
8	6.63	1.87	10.87	12.23	11.13	14.19	4.84	14.44	7.46	0.49	9.61	8.63	7.75	3.73	7.65	11.87	14.42	8.34	9.52	5.40
8.3	4.42	3.06	10.62	12.49	10.79	4.76	5.61	12.91	9.71	8.83	10.10	14.42	12.75	2.55	14.42	10.50	10.79	10.69	1.86	9.03
8.6	7.82	1.87	8.50	13.42	8.24	3.82	11.30	13.93	10.79	0.98	8.93	9.22	5.79	0.69	16.38	12.46	3.83	12.07	2.65	12.26
9	1.02	0.93	8.16	13.85	7.56	4.76	5.61	14.44	10.40	2.65	8.14	15.40	1.37	0.39	22.66	11.58	8.83	10.99	1.28	9.22