



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AERONAUTIKOS KATEDRA

Simonas Rugys

SPARNO NERVIŪROS TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS

WING RIB ANALYSIS USING NUMERICAL METHODS

Baigiamasis magistro darbas

Aviacijos mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX060

Aviacijos mechanikos inžinerijos specializacija

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aeronautikos inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data

Antrosios pakopos studijų **Aviacijos mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Sparno nerviūros tyrimas skaitliniais metodais**

Autorius **Simonas Rugys**

Vadovas **Vytautas Rimša**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šiame baigiamajame magistro darbe nagrinėjama lengvojo lėktuvo sparno nerviūra. Baigtinių elementų metodu tiriamas inovatyvus anglies pluošto medžiagos pritaikymas nerviūros konstrukcijai. Išnagrinėta mokslinė literatūra, aprašyti pagrindiniai skaitiniai metodai, aviacijoje naudojami nerviūrų tipai ir medžiagos. Atlikta pasirinkto lengvojo lėktuvo apžvalga ir baigtinių elementų metodo tinkamumo tyrimas kietojo kūno analizei. Atliktas sparno nerviūrą veikiančių apkrovų tyrimas, naudojant programą XFOIL ir remiantis CS-VLA reglamentu. Pagal gautus nerviūros apkrovos rezultatus sudarytas nerviūros skaičiuojamasis modelis. Atliktas lyginamasis tyrimas pritaikant skirtingas medžiagas nerviūros konstrukcijai. Pritaikant kompozitines stiklo ir anglies pluošto medžiagas nerviūros konstrukcijai, atliekama optimizavimo analizė, keičiant nerviūros konstrukcijos strypelio skerspjūvio parametrus. Aptariami gauti rezultatai, pateikiamos išvados.

Darbą sudaro 9 dalys: įvadas, skaitinių metodų apžvalga, nerviūros tipai ir medžiagos, tyrimams pasirinkto lėktuvo apžvalga ir skaitinio modelio tikrinimas, sparno nerviūrą veikiančių jėgų analizė, nerviūros tyrimas ANSYS programa, nerviūros pritaikymas kompozitinėms medžiagoms, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 76 puslapių teksto be priedų, 50 iliustracijos, 11 lentelės, 60 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: sparno nerviūra, anglies pluoštas, skaitiniai metodai, baigtiniai elementai.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis' Aviation Institute
Department of Aeronautical Engineering

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

Master Degree Studies **Aviation Mechanics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	Wing Rib Analysis Using Numerical Methods
-------	---

Author **Simonas Rugys**

Academic supervisor **Vytautas Rimša**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

This master thesis includes research on ultralight aircraft wing rib. Finite element method is used to investigate the application of carbon fiber material for wing rib construction. Thesis is constructed by the analysis of scientific literature, description of the main numerical methods, aircraft wing rib types and materials. It also includes review of selected airplane and finite element method feasibility study for solid body analysis. Wing rib load analysis was performed using XFOIL program in according with CS - VLA regulations. Results were used for a projection of wing rib calculation model. Furthermore, comparative analysis of different materials used for rib construction was performed. For the rib construction bar cross-section optimization analysis, carbon and glass fibers were adapted for rib construction. The conclusions and recommendations are present.

Structure: introduction, numerical methodology analysis, wing ribs types and materials, review of elected aircraft for wing rib analysis and numerical methodology validation, analysis of acting loads of wing rib, analysis of wing rib using ANSYS program, wing rib construction adaptation for composite materials, conclusions and suggestions, references.

The thesis consist of: 76 p. text without appendixes, 50 pictures, 11 tables, 60 bibliographical entries. Appendixes included seperately.

Keywords: Wing rib, carbon fiber, numerical methods, finite element.

TURINYS

TURINYS	7
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	9
ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS.....	12
Darbo aktualumas	12
Darbo tikslas	12
Darbo uždaviniai	13
1. SKAITINIŲ TYRIMO METODŲ APŽVALGA	14
1.1 Skaitiniai metodai	14
1.1.1 Baigtinių skirtumų skaitinis metodas	14
1.1.2 Baigtinių elementų metodas	16
1.1.3 Baigtinių tūrių metodas	17
1.2 Optimizavimo metodų apžvalga	18
1.2.1 Topologijos optimizavimas	19
1.2.2 Topografinis optimizavimas.....	21
1.2.3 Topometrinis optimizavimas.....	22
1.3 Skyriaus apibendrinimas.....	23
2. NERVIŪRŲ TIPAI IR MEDŽIAGOS	24
2.1 Nerviūros tipai	24
2.2 Medžiagos.....	27
2.2.1 Medžiagų klasifikacija	27
2.2.2 Nerviūros medžiagos.....	29
2.3 Skyriaus apibendrinimas.....	30
3. TYRIMAMS PASIRINKTO LĖKTUVO APŽVALGA IR SKAITINIO MODELIO TIKRINIMAS.....	31
3.1 Lėktuvo apžvalga.....	31

3.2	Skaitinio modelio tikrinimas.....	33
3.3	Skyriaus apibendrinimas.....	35
4.	SPARNA VEIKIANČIŲ JĖGŲ ANALIZĖ	36
4.1	Sparno aerodinamika	36
4.2	Manevrinės ir gūsio diagramos skaičiavimas	38
4.3	Sparno profilio apkrovos pasiskirstymas	42
4.4	Nerviūros apkrovos skaičiavimas	44
4.5	Skyriaus apibendrinimas.....	49
5.	NERVIŪROS TYRIMAS „ANSYS“ PROGRAMA.....	50
5.1	Skaičiuojamoji schema	50
5.2	Baigtinių elementų tinklas	51
5.3	Struktūrinis plienas ir aliuminis	51
5.4	Pušis ir fanera.....	53
5.5	Kompozitinės medžiagos: stiklo pluoštas, anglies pluoštas	56
5.6	Tyrimo rezultatų palyginimas	60
5.6.1	Nerviūros masė.....	60
5.6.2	Nerviūros ekvivalentiniai įtempiai.....	60
5.6.3	Deformacija.....	62
5.6.4	Rezultatų apibendrinimas	62
5.7	Skyriaus apibendrinimas.....	64
6.	NERVIŪROS PRITAIKYMAS KOMPOZINĖMS MEDŽIAGOMS	65
6.1	Strypelio skerspjūvio modeliai	65
6.2	Stačiakampio nerviūros strypelio profilio optimizavimas	66
6.3	Skyriaus apibendrinimas.....	69
	IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	70
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	71
	PRIEDAI.....	77

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

BEM – baigtinių elementų metodas;
BE – baigtiniai elementai;
BSM – baigtinių skirtumų metodas;
BS – baigtiniai skirtumai;
BTM – baigtinių tūrių metodas;
BT – baigtiniai tūriai;
EASA – Europos aviacijos saugumo agentūra.

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Skaitinių tyrimų schema	14
1.2 pav. Topologinis optimizavimas	19
1.3 pav. Topologinis optimizavimo modelis	20
1.4 pav. Topometrinis optimizavimo modelis	22
2.5 pav. Formos arba uždaromoji nerviūra	25
2.6 pav. Plieno plokščių nerviūra	25
2.7 pav. Kaltinė–šampuota nerviūra	25
2.8 pav. Frezuota nerviūra	26
2.9 pav. Santvaros nerviūra I	26
2.10 pav. Santvaros nerviūra II	26
2.11 pav. Skersai izotropinė medžiaga	28
2.12 pav. Išilginių gijų gniuždymas	28
2.13 pav. Skersinių gijų gniuždymas	28
3.14 pav. „TsAGI R-3a“ profilis	31
3.15 pav. Lėktuvas „Magija“	31
3.16 pav. Lėktuvo sparnas I	32
3.17 pav. Lėktuvo sparnas II	32
3.18 pav. Nervišios tikrinamasis elementas	33
4.19 pav. Aerodinaminės jėgos sparno profilyje	36
4.20 pav. Profilio generuojamas momentas, keliamosios jėgos kryptis	36
4.21 pav. Teigiamo atakos kampo profilio slėgio vektorių pasiskirstymas	36
4.22 pav. Skrydžio gaubiamoji	37
4.23 pav. Skrydžio gaubiamosios rezultatai	42
4.24 pav. Profilio „TsAGI R-3a“ C taške slėgio pasiskirstymas	43

4.25 pav. Profilio „TsAGI R-3a“ F taške slėgio pasiskirstymas.....	44
4.26 pav. Nerviūrų geometrija sparne	45
4.27 pav. Sparno profilio padalijimas jėgoms skaičiuoti	46
4.28 pav. Nerviūros apkrovos kitimas priklausomai nuo profilio paviršiaus sudalijimų skaičiaus..	46
4.29 pav. Gaubiamosios kreivės taško C – su didžiausia teigiama perkrova apkrovos pasiskirstymas	47
4.30 pav. Gaubiamosios kreivės taško F – su didžiausia neigiama perkrova apkrovos pasiskirstymas	48
5.31 pav. Skaičiuojamoji nerviūros schema kruiziniam greičiui su teigiama perkrova.....	50
5.32 pav. Skaičiuojamoji nerviūros schema kruiziniam greičiui su neigiama perkrova.....	50
5.33 pav. Tinklo tolygumo vertinimas	51
5.34 pav. Struktūrinio plieno ir aliuminio tyrimas	51
5.35 pav. Medienos pluošto išsidėstymas	53
5.36 pav. Pušies ir faneros tyrimas	54
5.37 pav. Nerviūros anglies ir stiklo pluošto orientacija.....	56
5.38 pav. Struktūrinio pluošto ir anglies pluošto tyrimas	57
5.39 pav. Nerviūros tyrimo žemėlapių apibendrinimas	59
5.40 pav. Nerviūros masė.....	60
5.41 pav. Ekvivalentiniai įtempiai	61
5.42 pav. Maksimali deformacija.....	62
5.43 pav. Koeficientai su teigiama perkrova.....	63
5.44 pav. Koeficientai su neigiama perkrova.....	63
6.45 pav. Nerviūros strypelio skerspjuvio modeliai	65
6.46 pav. Nerviūros elemento optimizuojamas parametras	66
6.47 pav. Anglies pluošto optimizavimo rezultatai I	66
6.48 pav. Anglies pluošto optimizavimo rezultatai II	66
6.49 pav. Stiklo pluošto optimizavimo rezultatai I	67
6.50 pav. Stiklo pluošto optimizavimo rezultatai II	67

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Medžiagų charakteristikos.....	29
4.2 lentelė. Skaitinio modelio tikrinimo rezultatai.....	35
4.3 lentelė. Teigiama smukos kreivė.....	39
4.4 lentelė. Neigiama smukos kreivė	40
5.5 lentelė. Struktūrinio plieno ir aliuminio nerviūrų medžiagų palyginimas	52
5.6 lentelė. Struktūrinio plieno ir aliuminio nerviūrų įtempių ir masės santykių palyginimas	53
5.7 lentelė. Pušies ir faneros nerviūrų medžiagų palyginimas	54
5.8 lentelė. Pušies ir faneros nerviūrų įtempių ir masės santykių palyginimas	56
5.9 lentelės. Stiklo pluošto ir anglies pluošto medžiagų nerviūrų palyginimas	57
5.10 lentelė. Anglies pluošto ir stiklo pluošto įtempių ir masės santykių palyginimas	59
6.11 lentelė. Medienos ir kompozito medžiagų nerviūrų palyginimas	68

IVADAS

Besikeičiantys, griežtėjantys reikalavimai aviacijoje, statyboje, sausumos ir vandens transporte verčia ieškoti naujų sprendinių siekiant tobulinti konstrukcijos patikimumą, mažinti iškastinio kuro, energijos sąnaudas, didinti efektyvumą ir saugumą. Didelė aviacijos industrijos plėtra, mokslo pažanga, technologijų gebos augimas leidžia ištirti ir pritaikyti naujas inovatyvias medžiagas lėktuvo konstrukcijoms tobulinti.

Novatoriškų kompozitinių medžiagų pritaikymas lėktuvo konstrukcijose yra svarbus uždavinys šiandienėje aviacijoje ir mokslinių tyrinėjimų sferoje. Kompozito pritaikymas esminiuose konstrukcijos elementuose leistų padidinti skrydžio greitį, konstrukcijos saugumą, sumažinti svorį, lėktuvo degalų sąnaudas.

Mokslinėje literatūroje modelio mechaninėms savybėms apskaičiuoti ir optimizuoti yra pateikiama daug skirtingų skaitinių analizės ir optimizavimo metodų.

Šiame darbe tiriamas kompozitinės medžiagos pritaikomumas lėktuvo sparno konstrukcijoje. Apžvelgiami mokslinėje literatūroje pateikti skaičiavimo ir optimizavimo metodai. Pasirinkus optimalią tyrimo metodiką, atliekamas lyginamasis tyrimas apie kompozito medžiagos pritaikymo galimybes nerviūros modeliui. Tiriant kompozito pritaikymą, lyginamos nerviūros, pagamintos iš skirtingų medžiagų. Pagal gautus rezultatus pateikiami optimalios medžiagos variantai sparno nerviūros konstrukcijai.

Darbo aktualumas

Mediena yra bene dažniausiai taikoma medžiaga nerviūrų konstrukcijoms, lengvojoje aviacijoje. Vis didesnis alternatyvių medžiagų panaudojimas aviacijoje kelia abejonių, ar mediena atlaiko konkurencinę kovą lyginant su kitomis medžiagomis ir išlieka efektyvi, nepasenusi sparno konstrukcijai. Šių dienų technologijos leidžia tirti ir analizuoti įvairių medžiagų savybes bei pranašumus jas pritaikant aviacijoje. Todėl inovatyvių skaičiavimo metodikų (pvz. baigtinių elementų metodas) pritaikymas ir novatoriškų medžiagų (pvz. anglies pluoštas) pritaikymas gali padėti sumažinti nerviūros svorį, sparno patvarumą, padidinti orlaivio efektyvumą ir saugumą.

Darbo tikslas

Atlikti orlaivio nerviūros skaitinį tyrimą, siekiant pritaikyti kompozitinį anglies pluoštą, sparno nerviūros konstrukcijai, nustatyti kompozito medžiagos tinkamumą lengvojo lėktuvo sparno konstrukcijai.

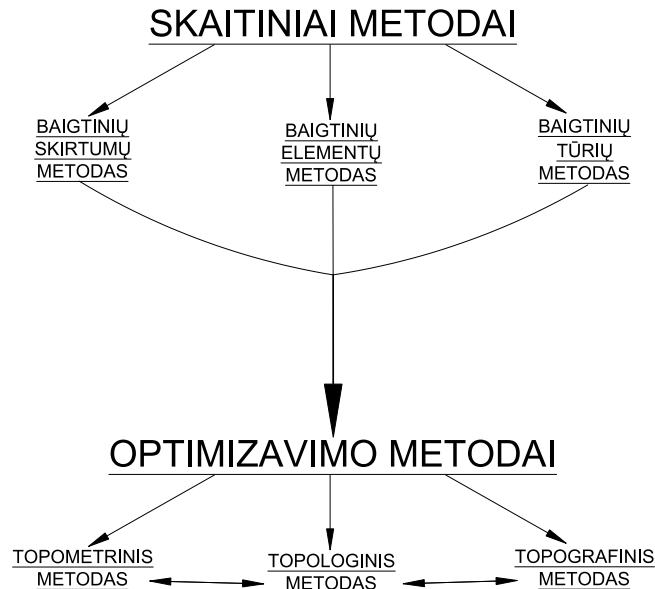
Darbo uždaviniai

Šio darbo tikslui pasiekti yra keliami uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą apie skirtingus skaitinius tyrimo metodus, nerviūrų tipus, jų gamybai taikomas medžiagas.
2. Atlikti baigtinių elementų skaitinio modelio, strypiniams elementams, tyrimą ir įvertinti metodo tinkamumą atlikti kieto kūno analizę.
3. Apskaičiuoti nerviūrą veikiančias jėgas remiantis CS–VLA reglamentu.
4. Atlikti iš skirtingų medžiagų (struktūrinis plienas, aliuminis, fanera, pušis, stiklo pluoštas, anglies pluoštas) suprojektuotų nerviūrų charakteristikų lyginamąją skaitinę analizę.
5. Nerviuos strypelio profilio pritaikymas anglies ir stiklo pluošto medžiagoms, keičiant nerviuos strypelio skerspjūvio parametrus.

1. SKAITINIŲ TYRIMO METODŲ APŽVALGA

Skaitinių metodų taikymas inžinerinių objektų projektavimui yra plačiai paplitęs inžinerinėje ir mokslo sferoje. 1.1 paveiksle schema apibūdina pagrindinius taikomus metodus ir eiliškumą, kuriuo atliekami įvairūs moksliniai tyrimai ir tiriamųjų objektų tobulinimo darbai.



1.1 pav. Skaitinių tyrimų schema

Skaitiniais metodais yra tiriamas pirminis modelis. Struktūrinių tyrimų pagrindinis tikslas yra taikant skaitinius metodus nustatyti deformacijas, įtempius ir kitus svarbiausius parametrus (Katon, Rahman and Manap, 2017). Optimizacijos tikslas – rasti geriausią objekto formą, mažiausią masę nepadarant kritinės žalos detalės atsparumui (Rao, Kiran, Chandra, Kamesh and Padmanabhan, 2008). Optimizacija vyksta skaitinių metodų pagrindu įvairiais optimizacijos būdais keičiant tiriamojo objekto parametrus. Pritaikant skaitinių tyrimų metodiką galima efektyviai ištirti įvairius inžinerinius objektus. Šių metodikų taikymas nerviūros tyrimui yra aktualus, todėl šiame skyriuje bus apžvelgti pagrindiniai skaitiniai analizės ir optimizavimo metodai.

1.1 Skaitiniai metodai

1.1.1 Baigtinių skirtumų skaitinis metodas

Baigtinių skirtumų metodas – vienas seniausių ir paprasčiausių apytikslių diferencialinių lygčių sprendimo būdas. Vienmatėje dimensijoje metodą užrašė L. Euler. Dvimatėje dimensijoje išvedė C. Rung (The finite element method, 2017). Tai yra tinkamas metodas plokščių lenkimo uždaviniams spręsti ir analizei atlikti. Baigtinių skirtumų metodas nereikalauja pagrindinės funkcijos ir yra lengva padengti skaičiuojamuoju tinklu skaičiuojamąjį objektą. Baigtinių skirtumų metodo pritaikymas ypač populiarus skysčių dinamikoje (Kim and Park, 1994). Metodo pagrindu atliekami skaičiavimai – vieni

patikimiausių sprendimo ir vertinimo būdų. BS metodas laikomas paprastu ir sistemos neapkraunančiu lyginant su baigtinių elementų metodu (Roknuzzaman, Ahmed and Hossain, 2017).

Plonos plokštės, apkrautos normalinių jėgų į paviršių, įtempių analizei yra taikomas diferencialinių lygčių metodas. Tiksliai klumpdymo analizei (Timoshenko and Woinouskg–Krieger, 1959) taikomi sudėtingi skaičiavimai, imlūs laikui. Siekiant supaprastinti skaičiavimus, išvengti matematinių sunkumų, susijusių su minėtomis lygtimis, Kirchhoff klasikinė teorija plonomis plokštėms yra taikoma su patikimu tikslumu. Todėl nereikia atlikti pilnos trimatės įtempių analizės. Kirchhoff klasikinė teorija yra išreikšta skersine kryptimi, kurios diferencialinė lygtis yra ketvirtos eilės, reikalaujanti tik dviejų kraštinių sąlygų, kurios būtų išpildytos kiekviename plokštės krašte. Pagrindinė diferencialinė lygtis įlinkių plonomis plokštėms Kirchhoff teorijoje išreikšta (Ugural, 1999) formule:

$$\nabla^4 w(x, y) = \frac{P_z(x, y)}{D}; \quad (1.1)$$

čia: x, y – plokštelės mazgo koordinatė;

W – deformacija kryptimi;

P_z – pridėta vienoda paskirstyta statinė apkrova z ašies kryptimi;

∇^4 – biharmoninio diferencialo operatorius;

D – konstrukcijos ir pagrindo fizinių lygčių pasiduodamumo matricos, priklausančios atitinkamai nuo medžiagos tamprumo modulio E , deformacijų modulio E_0 ir Puasono koeficientų ν ir ν_0 .

Pagal išvestą formulę tiriama keturkampė plieno plokštelė, kurios apkrova yra tolygiai paskirstyta su visais atramos taškais baigtinių skirtumų metodu. Tyrimas grindžiamas poslinkių komponentais skirtinguose taškuose ir lyginami su programos ETABS gautais rezultatais. Palyginus gautus deformacijos rezultatus gautas 7 % skirtumas. Labiausiai apkrautoje vietoje skirtumas siekė 3 % (Roknuzzaman *et al.*, 2017). Palyginus rezultatus galima įvardinti, jog BSM yra tikslus ir patikimas metodas skaičiavimams.

2014 metais mokslininkai Ghods ir Mir pristatė studiją, kurioje vertino keturkampės plonos plokštelės mechanines savybes taikant BSM. Diferencialinės lygtys buvo diskretizuotos, siekiant pritaikyti baigtinių skirtumų metodą, plokštelės įtempių kitimo funkcijas ir gauti linijines algebrines lygtis. Autorius pažymi, kad BSM yra puiki priemonė plonų plokščių uždaviniams spręsti (Ghods and Mir, 2014).

Sucharda ir Kubosek straipsnyje (2013) pristato plokščių tyrimą taikant baigtinių skirtumų metodą. Buvo analizuotos dviejų tipų kvadratinės plokštelės. Autorius išvedė algoritmus sistemų

formulėms skaičiuoti. Tyrimo metu buvo koncentruotasi į deformacijas, specifinius lenkimo ir sukimo momentus. Skaičiavimo algoritmas buvo atliktas taikant programą „Matlab“ (Sucharda and Kubosek, 2013).

Mokslininkas Abodi straipsnyje (2012) pateikia duomenis apie linijinį plonos kūginės plokštelės klūpdyimą, apkrautą slėgio visame plokštelės plote. Autorius taiko baigtinių skirtumų metodą plokštelės stabilumo problemai spręsti, laisviesiems virpesiams ir klūpdymui nustatyti, esant skirtingiems plokštelės storiams. Išvadoje pateikta, kad didėjantis plokštelės kūgiškumas mažina klūpdymo reikšmes (Abodi, 2012).

Baigtinių skirtumų metodas yra vienas pirmųjų metodų, pritaikytų vientiso kūno tyrimams. Straipsniuose buvo paminėta, kad BEM yra daug pranašesnis nei BSM. BEM yra lengvai pritaikomas netaisyklingos formos kūnams apskaičiuoti, tačiau BSM yra efektyvus vienos dimensijos daugelio laisvės laipsnių, erdvės, laiko kintamųjų susietoms dalinėms diferencialinėms lygtimis spręsti (Kim *et al.*, 1994). BSM yra dažniausiai taikomas vientiso kūno plonų plokštelių tyrimams, rečiau šilumos mainų ir skysčių dinamikos tyrimuose.

1.1.2 Baigtinių elementų metodas

BEM yra taikomas inžinerinių sistemų atsako į apkrovas prognozavimui ir analizei. BEM skaičiavimo proceso esmė – tiriamąją struktūrą sudalinti į smulkesnius elementus. Šie elementai vėliau sujungiami per tinklo jungiamuosius mazgus. Konstrukcijai mechaninės savybės yra aprašomos identifikuojant medžiagą ir elementų savybes. Nustatomos aplinkos sąlygos, apkrovos ir kraštinės sąlygos. Rezultatų analizei yra nurodomi įtempimų, slėgio pasiskirstymo, deformacijos parametrai (Katon, *et al.*, 2017). Praktikoje susiduriama, kad analizė reikalinga plačios apimties, skirtingos geometrinės formos ir struktūros kūnams.

Per pastaruosius 50 metų kompiuterių galimybės ir operacijų greitis išaugo keliais šimtais kartų. Šis kompiuterinių technologijų proveržis kartu su patikrintais metodais tokiais kaip BEM leidžia tirti ir projektuoti vis efektyviau. Didelei daliai tinklo mazgų skaičiuoti yra taikomi kompleksiniai matricių metodai. Metodo dėka galima formuluoti ir spręsti struktūrines problemas su kintančiomis jėgomis, įskaitant ir vibracijos jėgas. Atliekant skaičiavimus remiamasi pagrindine formule:

$$\{P_i\} = [K_{ij}]\{u_j\}; \quad (1.2)$$

čia: $[K_{ij}]$ – standumo matrica;

$\{u_j\}$ – poslinkių matrica;

$\{P_i\}$ – apkrovos matrica.

BEM matricių formulė turi įėjties ir išeities duomenis tai priklauso nuo tyrėjo ieškomo dėmens. Matricių formulė gali būti taikoma kaip jėgų vertinimo metodas, nes ieškomas dėmuo yra apkrovos gaunamos iš atitinkamų poslinkių arba standumo matricių (Weisshaar, 2011).

Moksliniuose darbuose baigtinių elementų metodu yra tiriami ir vertinami lėktuvo sparnai. Tiriamas sparno aptekėjimas oro srautu skrydžio metu, renkamas tinkamiausias sparno profilis. Tikrinamos sparno charakteristikos: deformacija, įtempiai (Yuvaraj and Subramanyam, 2015).

Karidkar ir Patankar moksliniame darbe (2017) tyrė aviacines smulkias detales, kurios yra jautrios deformacijoms, dėl savo silpnos konstrukcijos. Tyrimams buvo pasirinktas baigtinių elementų metodas, nes gali būti efektyviai taikomas, apskaičiuojant komponento deformaciją. Baigtinių elementų modelis sukurtas ir simuliacija atlikta ANSYS programoje. Buvo atlikti testai deformuojant detales stende realiomis sąlygomis. Palyginus programos ir testo rezultatus, gauti skirtumai iki 13 % (Karidkar and Patankar, 2017). Gauti rezultatai patvirtina metodo validumą. Tačiau dalis rezultatų priklauso nuo tyrėjo patyrimo ir kompetencijos.

Animhons ir kiti moksliniame darbe (2016) tyrė lėktuvo sparno konstrukciją, ieškota lokacijų, kuriose yra didžiausia galimybė atsirasti konstrukcijos įtrūkimui. Pasak autoriau – didžiausia galimybė atsirasti įtrūkimams yra tempimo įtempių koncentracijos vietose. Straipsnio autorius pažymi, jog gauti įtempių rezultatai gali būti taikomi kaip aproksimavimo funkcija optimizuojant sparno parametrus (Animhons, Maheswaran, Prabhu and Sankaran, 2016).

Salu ir kiti autoriai savo moksliniame darbe (2018) bandė nustatanti maksimalius įtempius, natūralias vibracijas ir deformacijas sparnui, pagamintam iš skirtingą medžiagų. Buvo siekiama pasiekti geresnį standumo ir masės rezultatą. Sparno modeliavimas atliktas programa „Catia“, o BEM skaičiavimai „ANSYS“ skaičiavimo programa (Kumar and Sandipan, 2018).

Apžvelgus mokslinius darbus, BEM metodas yra pateikiamas kaip ypač patogus praktiniam naudojimui. Metodas yra pritaikytas daugelyje skirtingų programų, todėl vartotojui yra gerai pritaikytas naudoti. Šis metodo panaudojimo galimybės yra plačios, įgalinančios spręsti sudėtingus inžinerinius uždavinius. Turintis aukštą patikimumo lygį. Nors dalis rezultato priklauso nuo inžinieriaus kompetencijos naudotis skaičiavimo programomis ir metodo supratimo. Pastebėta, kad metodo paklaida nuo realių bandymų yra apie 10 %.

1.1.3 Baigtinių tūrių metodas

Baigtiniai tūrių metodas yra laikomas labiau skysčių dinamikos, šilumos mainų tyrimui pritaikytas metodas. Bet atsižvelgiant į didžiules galimybes baigtinių tūrių metodas yra tinkamas ir kietųjų kūnų analizei. BTM yra išvestas iš baigtinių elementų metodo, bet priešingai nei baigtinių skirtumų metodas, kuris sprendžia diferencialines lygtis tinklėlyje. Lyginant BEM ir BTM – erdvė yra sudalinta į elementus, kurie nepersidengia, bet užpildo erdvę visiškai pilnai. Įžvelgiamas skirtumas tarp metodų yra dalinamojo elemento formoje. BTM elementas yra daugiaaaukštis, apribotas daugiakampiais paviršiais, o BEM diskretizavimas elementais yra tiesiogiai koreguojamas pagal elemento formos funkciją ir mazgus (Sabbagh–Yazdi and Bayatlou, 2015).

BTM pagrindinė matematinio modelio kontinuumo mechanikos formulė:

$$\rho \ddot{u} = S^T \sigma + b \quad (1.3)$$

čia: ρ – medžiagos tankis;

$\ddot{u}$ – pagreitis;

S^T – operatoriaus matrica;

σ – įtempių tenzorius;

b – jėga.

Literatūroje pažymima, kad metodas turi gerą skaitmeninio sprendimo konvergenciją ir stabilumą (Filippini, Maliska and Vaz Jr, 2010). Moksliniai tiriamieji darbai (2018) parodė, kad BTM derinant su BEM, keičiant tinklų metodiką yra gaunami tikslūs rezultatai. Gauti vidinių jėgų vertinimo rezultatai BEM ir BTM metodais yra identiški. Asimiliuotas BT metodas su kitais skaitiniais metodais yra tinkamas lenkimo problemoms analizuoti. Be to mokslinių tyrimų pavyzdžiai atskleidė galimybę pritaikyti BTM efektyviam poslinkių ir sluoksnių elastingumo įvertinimui (Onate and Cervera, 2018).

BTM yra populiarus diskretizacijos metodas. Viena iš pagrindinių metodo didėjančio populiarumo priežasčių, kad BTM sujungia BEM geometrinį lankstumą su vietiniu fizinių savybių išsaugojimu. Tačiau plataus pritaikymo moksliniuose darbuose, tiriant vientiso kūno mechaniką nerasta. Straipsniuose daugiausia BTM pritaikymas yra aptariamas, bet metodo taikymo pavyzdžių kietojo kūno analizei, nerasta. BTM yra labai plačiai taikomi skysčių mechanikoje, šilumos ir masės mainų tyrimuose (Limache and Idelsohn, 2007).

Apibendrinant duomenis pastebima, kad kiekvienas apžvelgtas metodas turi akivaizdžias tiriamąsias sferas, kuriose pritaikymas yra paprastas, efektyvus ir greitas. BSM yra patikimas metodas, plonų plokščių skaičiavimo uždaviniuose. Šis metodas neturi platesnio pritaikymo ir programinės įrangos, kuri veiktų šiuo metodo principu. BTM yra taikytinas skysčių mechanikai ir šilumos mainams. Paplitusio, platesnio pritaikymo kietojo kūno analizei, darbų nerasta. BEM yra tinkamiausias kietojo kūno analizei dėl gausiai pritaikomos programinės įrangos, skaičiavimo greičio, tikslumo ir paprastumo.

Skaitiniai metodai yra siejami su vientiso kūno optimizavimo būdais. Kitame skyriuje apžvelgiami optimizavimo metodai, kurių neatsiejama sudedamoji dalis yra skaitiniai metodai.

1.2 Optimizavimo metodų apžvalga

Projektuojant atskirus konstrukcijos elementus, kurių savybės yra svarbios formuojant objekto visumą, optimizavimas yra būtinas procesas. Siekiant patobulinti parametrus, sutaupyti išteklius, išsaugoti reikiamą funkciją ir saugumo lygį yra optimizuojamas svoris, pakeičiama objekto forma, struktūrų tankis.

Diferencialinių ar integralinių lygčių sprendimas leidžia gauti tikslius rezultatus, tačiau dažniausiai rezultatai yra gaunami didžiulio skaičiavimui skirto laiko sąskaita. Didžiulės laiko sąnaudos ir verčia rinktis skaitinius metodus – dažniausiai baigtinių elementų metodą.

Remiantis BEM įvardijamos trys pagrindinės struktūrų optimizavimo priemonės:

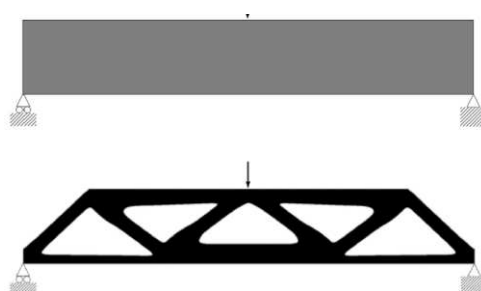
1. Formos optimizavimas.
2. Matmenų optimizavimas.
3. Medžiagos charakteristikų optimizavimas.

Remiantis trimis pagrindinėmis optimizavimo priemonėmis, pritaikant baigtinių elementų metodą, yra išvestos pagrindinės metodikos, ir optimizavimo priemonės (Mačiūnas, 2013).

1.2.1 Topologijos optimizavimas

Paskutinį dešimtmetį topologinis metodas tapo viena pagrindinių optimizavimo priemonių aviacijoje dėl galimybių sugeneruoti mažo svorio, techniškai progresyvių detalių modelius. Vienas žymiausių atliktų darbų yra lėktuvo AIRBUS A380 projektavimas, taikant topologinį optimizavimą, tokiu būdu sumažinta lėktuvo masė 1000 kg. Remiantis ta pačia metodika buvo atliktas lėktuvo BOEING 787 DREAMLINER nerviūrų optimizavimas, kuris leido suprojektuoti nerviūras iki 45 % lengvesnes nei lėktuvo BOEING 777 (Grihon, Krog, Tucker and Hertel, 2004), (Wang, Lu and Zhou, 2011), (James, Kennedy and Martins, 2014).

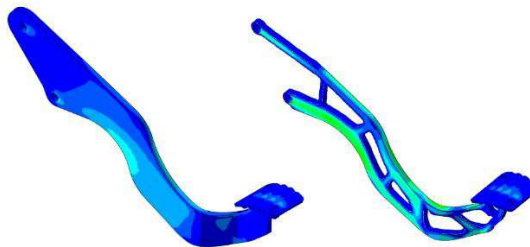
1.2 paveiksle pateikta topologinio optimizavimo schema. Šio optimizavimo tikslas – rasti optimalią kūno struktūros konfigūraciją su konkrečiais objekto srities apribojimais, apkrovomis ir kraštinėmis sąlygomis. Pagrindinis iššūkis yra išspręsti didelės apimties skaičiavimo problemą, kai didelės skaičiavimo sąnaudos paprastai neleidžia naudoti laisvųjų algoritmų (Zhu, Zhang and Xia 2015).



1.2 pav. Topologinis optimizavimas (Zhu *et al.*, 2015)

Metodas siejamas su formos optimizavimu ir laikomas kaip struktūrinio optimizavimo atšaka. Topologinio optimizavimo tikslas yra gauti skirtingą struktūros formą. Tai specializuotas medžiagos optimizavimo modelis, kai diskrečiojo modelio kiekvienas elementas savo charakteristikomis projektuojamas atskirai. Kiekvienas elementas turi būti sudarytas iš vientisos medžiagos. Moksliniuose darbuose pažymima, kad topologinio optimizavimo metu baigtinių elementų metodu remiamasi atvejais, kai norima sužinoti objekto kiekvieno diskretizuoto baigtinio elemento

egzistavimo reikalingumą konstrukcijoje. 1.3 paveiksle parodoma, kad optimizavimo metu dalis baigtinių elementų yra panaikinama, dalis pridama priklausomai nuo nustatytų sąlygų: maksimalių įtempių, kūno masės. Nustatoma sąlyga, jog kiekvienas vertinamas elementas tiriamajame objekte turi turėti reikalingą tankį.



1.3 pav. Topologinis optimizavimo modelis (old.digitaleng news, 2012)

Mokslininkas Bendsoe ir kt. (2003) pasiūlė kitą tankio principu pagrįstą metodą. Metodas pritaikomas sumažinant eksponentiškai izotropinę medžiagą pagal elemento tankio kintamuosius su jėgos veikimo schema.

Galimas tankis apskaičiuojamas (Zhu *et al.*, 2015) pagal formulę:

$$P(\eta_i) = \eta_i^P; \quad (1.4)$$

čia: $P(\eta_i)$ – tamprumo modulis;

η_i – tankis;

P – tankio mažinimo koeficientas.

Taikant P reikšmę, didesnę nei 1, užkertamas kelias tarpiniams tankiams ir padeda užtikrinti sprendimus, kai dauguma elementų turi tankį 0 arba 1 (Eves, Toropov, Thompson, Gaskell, Doherty and Harris, 2009). Tokiu atveju dalis baigtinių elementų naikinama arba pridama. Topologiniam optimizavimui dažniausiai naudojami didelės apimties kūnai. Dažniausiai po optimizavimo kūnas turi visiškai skirtingą geometriją nei pradinis. Topologinis optimizavimas yra koreliuojamas su topometrinio optimizavimu (Kong, *et al.*, 2016), (Mačiūnas, 2013), (Katrak and Juračka, 2017).

Topologinio optimizavimo ritaikymas yra labai aktualus. Mokslininkai Rinku ir Ananthasuresh (2015) pažymėjo, kad lėktuvo sparnai reikalauja plačių tyrimų. Kai yra mažinama jų masė, esant vietiniam lenkimui–klūpdymui, reikia užtikrinti adekvatų sparnų standumą, stiprumą ir stabilumą. Optimaliam rezultatui pasiekti yra pasitelkiamas topologinis ir dydžio optimizavimas, o optimizavimo procesas išskirstomas į du etapus: Topologinis optimizavimas nerviūroms, atsižvelgiant į apribojimus; dydžio optimizavimas, siekiant sumažinti masę, atsižvelgiant į įtempius ir klūpdymo apribojimus. Metodo gautas rezultatas yra 30 % lengvesnė nerviūra (Rinku and Ananthasuresh, 2015)

Straipsnyje mokslininkai Haibo ir Qun (2013) pateikia kompozito struktūros optimizavimą, siekiant sumažinti sparno struktūros svorį. Efektyviausiu laikomas sparno apsiuvos stiprumo didinimas, tokiu būdu leidžiant sumažinti sparno konstrukcijos svorį. Optimizavimas atliekamas trimis etapais:

1 etapo tikslas – optimizuoti sparno apsiuvos struktūrą, atsižvelgiant į deformaciją, sparno plazdėjimą, siekiant gauti optimalius laminato storius sparno apsiuvai.

2 etape atliekamas kompozitinės panelės skaičiavimas. Paviršiaus laminato spaudimas turi būti artimas maksimaliai atlaikomai pluošto jėgai.

3 etape taikant topologinį optimizavimą gaunamas naujas modelis. Šis optimizavimo eiliškumas davė pridėtinę naudą. Pažymėtina, kad šią optimizavimo strategiją galima taikyti ir sprendžiant kitus inžinerinius uždavinius (Haibo and Qun, 2013).

Pasinaudojant kiekvieno baigtinio elemento tyrimu, šis progresyvus ir efektyvus optimizavimo metodas leidžia sumažinti konstrukcijos masę, išsaugoti svarbias stiprumo savybes. Todėl aviacijoje topologinis optimizavimas yra vienas populiariausių ir plačiausiai taikomų metodų. Topologinis yra vienas iš optimizavimo variantų, jis nėra galutinis. Geriausias objekto formos ir konstrukcijos savybių rezultatas pasiekiamas pritaikant giminingus optimizavimo metodus kartu su topologiniu optimizavimu.

1.2.2 Topografinis optimizavimas

Topografinis yra kūno formos optimizavimo metodas. Apibrėžtame tam tikros projektuojamos detalės plote, sukuriama sustiprintos briaunos suteikiančios standumo. Topografinis optimizavimas yra skirtingas nuo topologinio optimizavimo. Topografinis metodas naudoja kūno formos kintamuosius, skirtingai nuo tankio kintamųjų topologiniame optimizavime. Projektuojamo objekto plotas yra padalintas į didelį skaičių atskirų dydžio kintamųjų, kuriais skaičiuojama įtaka struktūrai. Taigi, projektuojamas regionas yra optimizuotas per keletą iteracijų. Tyrimai atliekami baigtinių elementų metodu (Kong, Abudullah, Omar and Haris, 2015), (Mačiūnas, 2013).

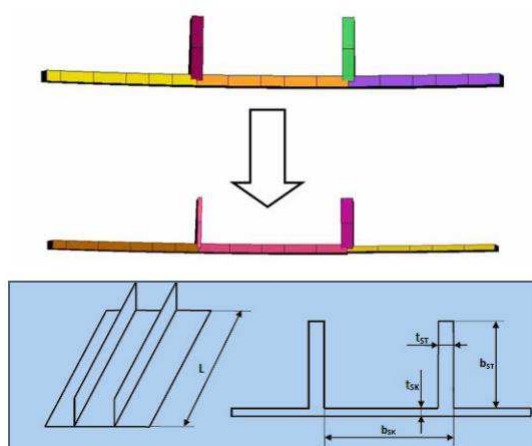
Literatūroje pateikiama, kad spyruoklės plokštelės tyrime, topografinio optimizavimo pagalba pavyko sumažinti įtempius 18 %, lyginant su topologinio optimizavimo rezultatu. Šlyties deformacija taip pat sumažinta, masė padidėjo nežymiai. Skirtingai nei topologinis optimizavimas, kurio metu yra mažinamas medžiagos kiekis, topografinis metododas atsakingas už struktūros standumą, objekto masė gali net padidėti. Todėl dažnai optimizavimo metu yra taikomi topografiniai ir topologiniai metodai vienas po kito (Kong *et al.*, 2015). Topografiniu optimizavimu gali būti laikomas standumo briaunų projektavimas tam reikiamose vietose projektuojame kūne (Leary and Shidid, 2013).

Šis optimizavimo metodas efektyviai pritaikomas, kuomet lakšto išlankstymas sukuria papildomas vidines standumo jėgas. Topografinis optimizavimo metodas yra patikrintas formos

optimizavimo metodas, galintis patobulinti konstrukciją, keičiant konstrukcijos matmenų dydžio kintamuosius ir keisdamas konstrukcijos formą, sukurdamas papildomą konstrukcijos standumą.

1.2.3 Topometrinis optimizavimas

Topometrinis optimizavimas yra taikomas kaip storio funkcijos kintamasis, siekiant, kad kintant projektuojamo kūno formai, būtų išlaikomos tenkančios apkrovos (Mozumder, 2010). Labai dažnai storio funkcija yra susieta su baigtinių elementų tinklu, kadangi siejamas kiekvieno baigtinio elemento dydis. Tai specializuotas matmenų optimizavimo modelis, kai kiekvieno elemento matmenys projektuojami atskirai. Straipsniuose šis metodas vertinamas kaip tinkamas formuoti standumo briaunoms, kai kintamasis yra vienintelis – elementų storis. 1.4 paveiksle pateiktas optimizuotas topometrinio būdu sparno panelės elementas pagal užduotas kraštines sąlygas.



1.4 pav. Topometrinis optimizavimo modelis (Katrnak *et al.*, 2017)

Stringerių ir apsiuvos storis pakeistas, sumažinant maksimalų medžiagos kiekį. Tinkamas optimalus dizainas įvardinamas tas, kuris pasiekia minimalią tikslinę funkciją ir atitinka visus iškeltus reikalavimus (Katrnak *et al.*, 2017). Todėl topometrinis metodas yra patikima priemonė mažiems, preciziniams projektuojamiems kūnams optimizuoti. Topometrinis optimizavimas turi tikslingą užduotį, pritaikyti konstrukcijos storio parametrus, kad tiksliai atitiktų iškeltas ribines konstrukcijos charakteristikas.

1.3 Skyriaus apibendrinimas

1. Apžvelgti skaitiniai metodai yra skirtingi. Kiekvienas metodas turi skirtingą stipriąją taikymo sferą, kurioje metodo taikymas greitas, efektyvus ir tikslus.
2. BEM tinkamiausias skaitinis analizės metodas, kietojo kūno analizei. Apžvelgti straipsniai patvirtina metodo patikimumą, taikymo patogumą ir pritaikymą optimizavimo užduotims spręsti.
3. Apžvelgti skirtingi optimizavimo metodai, kurie išsiskiria optimizavimo tikslinėmis funkcijomis, kad pasiekti apibrėžtus objekto optimizavimo uždavinius. Skirtingų optimizavimo metodų panaudojimas gali duoti inovatyvius projektuojamo objekto rezultatus.
4. Aviacijoje skaitinių ir optimizavimų metodų derinys yra ypač plačiai taikomas. Šiais skaičiavimo metodais remiasi tiek didžiulių lėktuvų pramonės inžinieriai, tiek paprastesnes užduotis sprendžiantys inžinieriai ir mokslininkai.

2. NERVIŪRŲ TIPAI IR MEDŽIAGOS

2.1 Nerviūros tipai

Nerviūros yra sparno struktūros formavimo elementai. Nerviūros tvirtinamos prie lonžeronų ir yra išdėliojamos atitinkamais intervalais visame sparno ilgyje. Dažniausiai nerviūros atspindi sparno profilio formą ir pagal šią formą formuojamas sparnas. Dėl aerodinaminių priežasčių profilio forma sparno kontūre turi būti išlaikyta be ryškių nukrypimų. Jeigu sparno apsiuva yra gana plona, privalu tarp nerviūros ir apsiuvos suprojektuoti stringerius dėl apsiuvos standumo.

Nerviūros taip pat turi kitą labai svarbią paskirtį: jėgos paskirstymo ir perdavimo. Visos aerodinaminės ir komponentų sukeltos apkrovos veikia į sparno atramos taškus. Taigi šios sparnui tenkančios apkrovos turi pereiti per apsiuvą, stringerius, nerviūras, lonžeronus ir galutinai atsiremiami į pagrindinius sparno atramos taškus. Aerodinaminėms apkrovoms perduoti yra reikalingos paprastos nerviūros. Tačiau esant apkrovoms, kurios atsiranda manevravimo, kilimo ir leidimosi metu, dėl smūgių į važiuoklę ir variklių svorio, gali reikėti žymiai tvirtesnių ir sudėtingesnių savo konstrukcija nerviūrų (Kannan and Veeranjanyulu, 2015).

Nerviūra privalo atlaikyti sparno sukuriamas aerodinamines sukimo jėgas, kurios sukelia pavojingą nerviūros klupdymo faktorių (Harakare and Heblkar, 2013). Sparno aerodinaminė apkrova kinta per visą sparno ilgį. Didžiausi apkrovimai tenka sparno pradžioje. Per sparno ilgį apkrova mažėja, todėl pagal buvimo vietą nerviūros skirstomos:

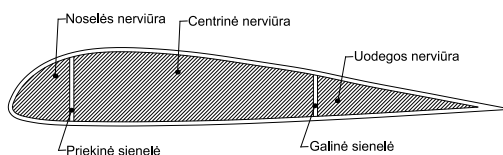
1. Šaknines. Šaknine vadinama sparno dalies nerviūra, esanti arčiausiai sparno simetrijos ašies.
2. Jėginės. Nerviūros veikiamos didesniais krūviais nei dauguma kitų, vadinamos jėginėmis. Šio tipo nerviūros, be tų pačių funkcijų, kurias atlieka ir visos kitos, skirtos priimti koncentruotus krūvius, kylančius iš kitų agregatų (variklių, važiuoklė).
3. Eilinės. Nerviūros, kurios sparne skrydžio metu nepatiria išskirtinai didelių perkrovimų.
4. Galinės. Toliausiai nuo sparno simetrijos ašies nutolusi sparno dalies nerviūra vadinama galine.

Nerviūros tipas priklauso nuo padėties ir reikalingo konstrukcijos stiprumo sparne (Merkys, 2012).

Aptartas skirstymo metodas yra vertinamas pagal tenkančias apkrovas sparno ilgyje. Vis gi pagal vietą nerviūros dažniau vertinamos pagal lėktuvo tipą. Pačios nerviūros yra skirstomos skirtingai ir pagrinde nerviūros tipą lemia gamybos procesas, medžiagos ir atlaikomos apkrovos:

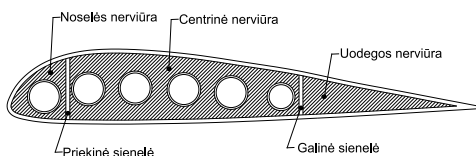
1. Formos nerviūros (angl. *Form type*) arba uždaromosios nerviūros (angl. *Closed type*) yra gaminama iš metalo lakšto, sulankstoma į reikiamą formą. Tai profilis, kuris sumontuojamas į sparno apsiuvą. 2.5 paveiksle pateikta nerviūra, kuri pritaikyta ir yra tinkama formuoti kuro bakų tūriams. Taip pat savo savybėmis yra tinkama atlaikyti didžiausius krūvius leidžiantis

lėktuvui. Šio tipo nerviūra dažniausiai yra gaminama iš plieno ir aliuminio, rečiau iš medienos. Iš plieno ir aliuminio lydinių pagamintos nerviūros montuojamos komerciniuose orlaiviuose.



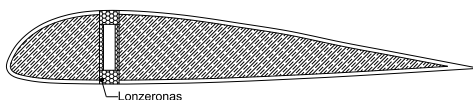
2.5 pav. Formos arba uždarojoji nerviūra

2. Plokščių tipo nerviūros (angl. *plate type*) gaminama iš metalo lakšto. 2.6 paveiksle pavaizduota nerviūra, kurios kraštai yra išlenkti ir sudaro standumo briaunas. Šios konstrukcijos viduryje yra kiaurymės su įgaubtomis briaunomis svorio mažinimui ir sparno mechanizmų valdymo trosams praveisti. Nerviūra surinkta iš atskirų dalių: noselės, centrinės, uodegos. Šių nerviūrų tipas sparne dažniausiai būna šakninės arba jėginės, nes turi atlaikyti didžiausias sparno apkrovas. Ir daugiausia taikomos komerciniuose, dideliuose orlaiviuose.



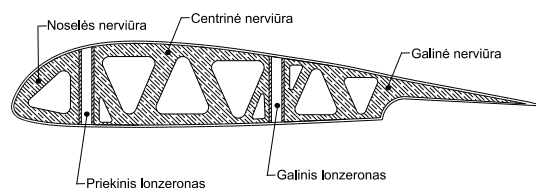
2.6 pav. Plieno plokščių nerviūra

3. Kaltinė–šampuota nerviūra (angl. *forged type*) gaminama taikant galingas presavimo mašinas. Gaminio rezultatas yra netolygus ir šiukštus. Tikslesniam ir labiau rafinuotam gaminiui pagaminti reikalingi didelio galingumo presai, kurie yra labai brangūs. Paprastai pirmojo preso gamybos etapo nerviūros turi būti atskirai apdirbamos dėl netvarkingų, nelygių kraštų ir kiaurymių. 2.7 paveiksle pavaizduota nerviūra dažniausiai yra montuojama sparno pradžioje visiškai šalia važiuoklės, kur sparnas yra daugiausiai apkraunamas.



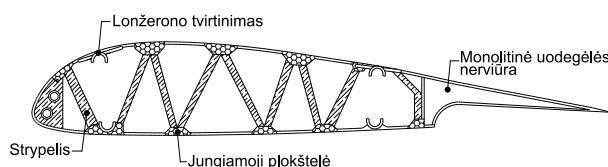
2.7 pav. Kaltinė–šampuota nerviūra

4. Frezuota nerviūra (angl. *milled type*) yra vientiso metalo konstrukcijos. Jie gaminami pašalinant perteklinę medžiagą iš kieto metalo bloko (paprastai naudojant kompiuteriu valdomos frezavimo stakles). 2.8 paveiksle vaizduojamų nerviūrų forma visada yra tiksliai apibrėžta. Tokios nerviūros naudojamos panašiomis sąlygomis, kaip ir šampuojamos nerviūros. Šio tipo nerviūros taip pat gali būti gaminamos iš medienos panaudojant fanerą. Nerviūros taikomos lengvojoje ir komercinėje aviacijoje.

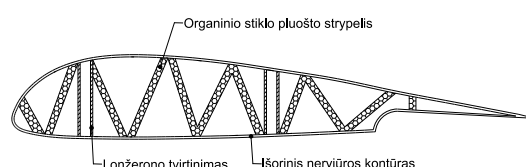


2.8 pav. Frezuota nerviūra

5. Santvaros nerviūros (angl. *truss type*) yra gaminamos iš atskirų profilių, strypelių. Šiems profiliams gaminti ir sujungti reikia daug kruopštumo ir dėmesio. Nerviūros gali būti pagamintos sunkios ir labai lengvos priklausomai nuo apkrovos dydžio ir pasiskirstymo.



2.9 pav. Santvaros nerviūra I



2.10 pav. Santvaros nerviūra II

2.9 paveiksle santvaros nerviūros konstravimas atliekamas panaudojant atskiras medienos listeles–strypelius. Santvaros tipo nerviūra galima apsiūti, padengti danga. Tokiu būdu didinamas nerviūros stiprumas. Santvaros nerviūros 2.10 paveiksle strypeliai yra pinami iš stiklo audinio – taip sumažinant masę ir išsaugant reikiamą nerviūros standumą. Reikalinga didelė koncentracija ir preciziškumas, nes sudėtinga išgauti reikiamas profilio formas ir tikslumą. Santvaros nerviūros plačiai naudojamos lengvojoje aviacijoje.

Nerviūros tipo pasirinkimas yra sudėtingas procesas. Reikalinga įvertinti tenkančių apkrovų dydžius, lėktuvo tipą ir medžiagas. Nuo nerviūros tipo ir tenkančių apkrovų priklausys pasirenkamos medžiagos. Akivaizdu, kad anglies pluoštas, kuris pasižymi išskirtinėmis savybėmis negali būti pritaikytas kiekvieno tipo nerviūroje. Anglies pluošto pritaikymo naudingumas priklauso, nuo to ar medžiagą bus galima pilnai išnaudoti nerviūros konstrukcijoje. Pavyzdžiui, iš metalo lakšto lydinų gaminamos nerviūros yra sukurtos atlaikyti didžiulius krūvius ir jų gaminimo technologija yra sudėtinga o svoris didelis, tad šios medžiagos netiks lengvosios aviacijos lėktuvams. Nerviūros lengvajai aviacijai yra paprastesnės, todėl gamybos technologijos ir medžiagų pasirinkimo variacija yra platesnė. Jų gamybai galima rinktis tarp skirtingų medienos rūšių ar kompozitinių stiklo pluoštų medžiagų. Taikoma medžiaga ir jos savybės nerviūrai lemia konstrukcijos tvirtumą ir efektyvumą, todėl kitame skyrelyje apžvelgiamos medžiagos, iš kurių gaminamos nerviūros.

2.2 Medžiagos

2.2.1 Medžiagų klasifikacija

Medžiagų klasifikavimo esmė yra grindžiama medžiagos elgesiu esant tam tikrai apkrovos būsenai. Medžiagos skirstomos:

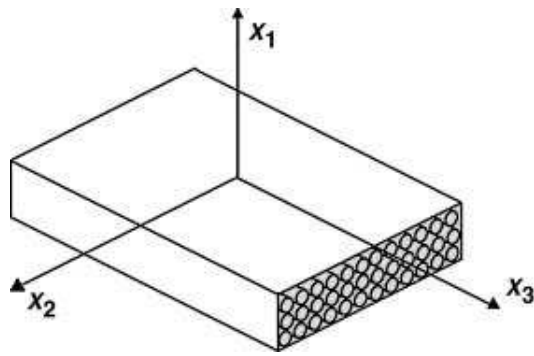
- Izotropinės medžiagos savo mechaninėmis savybėmis visomis kryptimis (ašinėmis) vienodos. Medžiagos savybės yra tiesiogiai nepriklausomos.

Izotropinė medžiaga gali turėti homogenizuotą arba nehomogenizuotą mikrostruktūrą. Pavyzdžiui, plienas demonstruoja izotropines savybes, tačiau plieno mikroskopinė struktūra yra ne homogenizuota, t. y. netvarkinga.

Tempimo normaliniai įtempiai bet kuria kryptimi izotropiniai medžiagai sukelia tikrai pailgėjimą kryptimi pridėtais įtempiais ir sumažėjimą dvejom skersinėmis kryptimis. Tai niekada nesukels šlyties deformacijų jokioje šios medžiagos formoje. Vienos krypties gijos, kurios sulygintos išilgine kryptimi, turi didžiulį stiprumą ir mažą stiprumą kitomis kryptimis. Jei struktūra priima kompleksines apkrovas, tokiu atveju izotropinės medžiagos yra tinkamos.

- Anizotropinės medžiagos. Daugelis medžiagų turi anizotropinių požymių, kai mechaninės savybės skiriasi priklausomai nuo struktūros krypties medžiagoje. Pavyzdžiui, tamprumo modulis priklauso nuo apkrovos krypties. Kai kurios medžiagos, pvz., medienos ar pluošto kompozitai, turi anizotropinių medžiagų požymių. Anizotropinės medžiagos daug atsparesnės jėgai, veikiančiai išilgine pluošto kryptimi nei per ją arba atvirkščiai. Anizotropinėse medžiagose tempimo ir šlyties deformacijų samplaika yra nulemta normalinių įtempių, veikiančių visomis kryptimis. Tai reiškiny, sukeliantis ištempimą ir šlytį. Apkrovimas normaliniais ir šlyties įtempiais yra pavadintas pailgėjimo–šlyties bendra deformacija ir šio faktoriaus nėra izotropinėse medžiagose. Didžioji dalis medienos ir kompozitinio pluošto yra pagal savo savybes anizotropinės medžiagos (Wood in small aircraft construction, 2019), (Velmurugan, 2019).

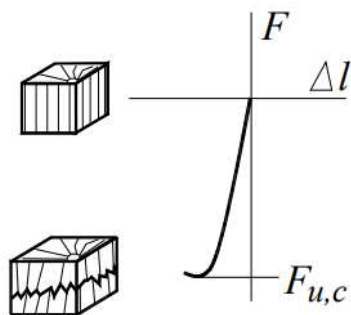
- Skersai izotropinė medžiaga. Šiomis savybėmis pasižymi tokios medžiagos, kaip vienkryptis anglies pluoštas ar mediena, kitos vienkrypčio pluošto medžiagos. 2.11 paveiksle skersai izotropinė medžiaga pasižymi vienoda simetrija X_3 išilginėje ašyje. Medžiaga susideda iš daug skirtingų sluoksnių.



2.11 pav. Skersai izotropinė medžiaga (Skaičiuojamoji Mechanika, 2009)

Vienkryptis stiklo ar anglies pluoštas yra geriausias šios medžiagos pavyzdys. Dažnai skersai izotropinės tipo medžiagos taip pat vadinamos anizotropinėmis dėl savo skirtingų savybių priklausomai nuo krypties.

- Anizotropinės medžiagos yra tos, kurių savybės visomis kryptimis yra skirtingos. 2.12 paveiksle spaudžiant gijų kryptimi diagramos forma panaši į plastinių medžiagų gniuždymo diagramos formą. Bandinys suyra, nes suklumpa plaušai, gijos. Bandinio dalys sušliejamos viena kitos atžvilgiu skersai sluoksnių, gniuždomi sluoksniai yra suspaudžiami ir nustatoma sąlyginė stiprumo riba. 2.13 paveiksle skersai gijų spaudžiamas objektas yra ne toks tvirtas, pasireiškia greičiau prasidedanti plastinė deformacija (Skaičiuojamoji Mechanika (paskaitų konspektas), 2009).



2.12 pav. Išilginių gijų gniuždymas (Skaičiuojamoji Mechanika, 2009)



2.13 pav. Skersinių gijų gniuždymas (Skaičiuojamoji Mechanika, 2009)

Medžiagų moksle yra svarbios izotropinių ir anizotropinių medžiagų sąvokos, apibūdinant medžiagas ir jų panaudojimą projektuojant. Medžiagų kristalinė orientacija yra labai svarbi, nulemianti jų fizines ir mechanines savybes. Esminis skirtumas taip izotropinių ir anizotropinių medžiagų yra tas, kad izotropinės medžiagos yra vienodos visomis kryptimis, o anizotropinių savybės priklauso nuo medžiagos krypties. Taisyklingos formos anizotropinių medžiagų pritaikymas tampa ypač aktualus (Difference between isotropic and anizotropic, 2017). Tinkamas pritaikymas kompozitinio, vienos krypties anglies pluošto, nulems nerviūros konstrukcijos charakteristikas.

2.2.2 Nerviūros medžiagos

Remiantis literatūros duomenimis lėktuvo konstrukcijose naudojamas plienas, aliuminis, fanera, pušies mediena, stiklo ar anglies pluoštai (Sharma and Garg, 2014), (Williams and Starke, 2003) (Aircraft Wood and Structure Repair, 2017), (Campbell, 2006).

Siekiant palyginti medžiagas 2.1 lentelėje pateikiami pagrindiniai stiprumo parametrai medžiagų, kurias numatoma naudoti tyrimo metu. Informacija parinkta iš programos ANSYS medžiagų bibliotekos.

2.1 lentelė. Medžiagų charakteristikos (matweb.com/help/ansys intro, 2019).

Medžiagos pavadinimas	Tankis, kg/m ³	Tempimo stiprumo riba, MPa	Gniuždymo stiprumo riba, MPa	Lenkimo stiprumo riba, MPa	Sluoksnio storis, mm
Struktūrinis plienas	7850	460	460	–	10
Aliuminis	2770	449	449	–	10
Fanera	748	56,1	52	60	2
Pušis	487	66,3	57	70	10
Anglies pluoštas (Vienos krypties pluoštas)	1397,1	$\sigma_X = 1979$; $\sigma_Y = 26$; $\sigma_Z = 26$.	$\sigma_X = 1700$; $\sigma_Y = 139$; $\sigma_Z = 139$.	1800	0,1
Stiklo pluoštas (Vienos krypties pluoštas)	1814,4	$\sigma_X = 1700$; $\sigma_Y = 35$; $\sigma_Z = 35$.	$\sigma_X = 1000$; $\sigma_Y = 120$; $\sigma_Z = 120$.	1200	0,1

Metalai, naudojami lėktuvų gamyboje, yra aliuminis, titanas ir jų lydiniai. Aliuminio lydiniai yra charakterizuojami turintys mažo tankio reikšmės lyginant su plieno lydiniais ir turi geras antikoroazines savybes, jų gamyba yra paprasta. Struktūrinis plienas ir aliuminis yra izotropinės medžiagos, kurių deformavimo savybės visomis kryptimis vienodos. Bet, žinoma, šios dvi izotropinės medžiagos dėl savojo didelio tankio yra pačios sunkiausios ir yra naudojamos ribotai, tik svarbiausiuose lėktuvo elementuose (Aircraft Basic Construction, 2000), (Rogers, 2018).

Mediena yra medžiaga, kurios mechaninės ir fizinės savybės atitinka santykinai aukštą stiprumo ir svorio santykį. Yra naudojami keli pagrindiniai medienos tipai. Vienas iš jų – vientisa mediena: pušis, eglė, laminuota mediena kelių sluoksnių; fanera; didelio tankio medienos medžiagos,

apdirbtos chemiškai, temperatūriškai. Fanera yra dažnai naudojama medžiaga konstrukcijose. Savo savybėmis medžiaga artima izotropinėms medžiagoms ir pasižymi geromis formos išsaugojimo savybėmis (Stalnaker and Harris 1997). Priešingai pušies medienai, kuri yra anizotropinė ir turi skirtingas savybes skirtingomis kryptimis, fanera yra izotropinė medžiaga dėl savo vienodų savybių visomis kryptimis (Aircraft Wood and Structure Repair, 2017).

Kompozitas modernioje medžiagų inžinerijoje gali būti susietas su iš pluošto sudarytomis daugiasluoksnėmis matricomis. Kompozitinės medžiagos tampa vis dažnesne alternatyva plienui, aliuminiui, titanui ir medienai. Didesnį kompozitinį medžiagų pritaikymą paskatino paskutinių dienų technologijos, skaičiavimo ir gamybos metodai bei ypač aukštas stiprumo ir svorio santykis. Didelė dalis atsakingų konstrukcijų gaminamos iš kompozito. Konstrukciniai kompozitai yra labai tvirti ir lengvi. Naudojami ilgi stiklo, kevlaro ir anglies pluoštai panardinti į matricines epoksidines dervas sudarydami tvirtus konstrukcinius vienetus (Kannan et al., 2015).

Vienkryptis stiklo pluoštas ir anglies pluoštas yra anizotropinės arba skersai izotropinės medžiagos, kurių savybės yra labai stiprios viena ašimi. Vienos ašies stiprumas tampa akivaizdus palyginus 2.1 lentelės tempimo arba gniuždymo mechanines savybes tarp σ_X , σ_Y ir σ_Z ašių. Akivaizdžiai išsiskiria X ašies stiprumas. Anizotropinių medžiagų, tokių kaip pušies, stiklo ir anglies pluošto pritaikymas stipriausiomis pluošto kryptimis gali duoti apčiuopiamų objekto optimizavimo rezultatų.

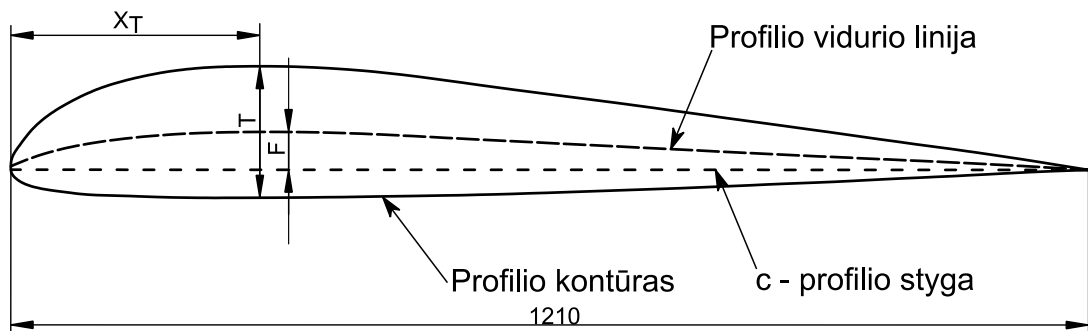
2.3 Skyriaus apibendrinimas

1. Apžvelgus galimus nerviūrų tipus akivaizdu, kad nerviūros tipas yra parenkama pagal lėktuvo klasę, tenkančias apkrovas ir padėtį sparne.
2. Medžiagos pritaikymas yra sudėtingas klausimas įvertinant mechanines savybes, anizotropiškumą, pritaikymo galimybes, medžiagos išnaudojimo galimybes nerviūros konstrukcijai.
3. Plienas, aliuminis, titanas ir mediena yra daug metų naudojamos medžiagos, akivaizdžiai, didėjančios technologijų galimybės, leidžia efektyviai pritaikyti išskirtinėmis savybėmis pasižymintį kompozitinį anglies pluoštą ir ištirti medžiagos sukuriamus privalumus.

3. TYRIMAMS PASIRINKTO LĖKTUVO APŽVALGA IR SKAITINIO MODELIO TIKRINIMAS

3.1 Lėktuvo apžvalga

Lyginamiesiems nerviūros tyrimams atlikti yra pasirinktas savadarbis lėktuvas „Magija“. Lėktuvo autorius yra Rolandas Kalinauskas. Ultralengvojo lėktuvo „Magija“ sparno profilis „TsAGI R-3a“ labai populiarus, plačiai naudotas po Antrojo pasaulinio karo. Profilis 3.14 paveiksle pasižymi geromis aerodinaminėmis savybėmis esant vidutiniams atakos kampams (Airfoiltools.com, 2019).



3.14 pav. „TsAGI R-3a“ profilis

Pagrindiniai profilio duomenys (airfoiltools.com, 2019):

- C – profilio styga, $C = 1210$ mm;
- T – storčiausia profilio vieta, $T = 147,1$ mm;
- F – didžiausias nuotolis tarp stygos ir profilio ašinės linijos, $F = 42,37$ mm;
- X_T – atstumas nuo profilio pradžios iki storčiausios vietos, $X_T = 279,51$ mm.

Šio profilio formą ir duomenis labai svarbu išlaikyti visame sparno ilgyje. Profilio parametrai bus naudojami tyrime ir skaičiuojant apkrovas nerviūros ilgyje.



3.15 pav. Lėktuvas „Magija“ (wings.lt, 2019)

3.15 paveiksle pavaizduoto lėktuvo „Magija“ sparnai pagaminti iš medienos su užsparniais, liemuo virintas iš plieno vamzdelių, uodegos dalis yra aliumininė, kniedyta. Sparnas dengtas klijuote–audiniu.

Lėktuvo sparnas yra stačiakampis. Kaip pavaizduota 3.16 ir 3.17 paveiksluose sparno nerviūra pagaminta iš vientisos medinės konstrukcijos. Sparno priešsparniuose yra sumontuoti lėktuvo bakai. Nerviūros yra santvaros nerviūros tipo ir visame sparne jų skaičius yra 32.



3.16 pav. Lėktuvo sparnas I (wings.lt, 2019)



3.17 pav. Lėktuvo sparnas II (wings.lt, 2019)

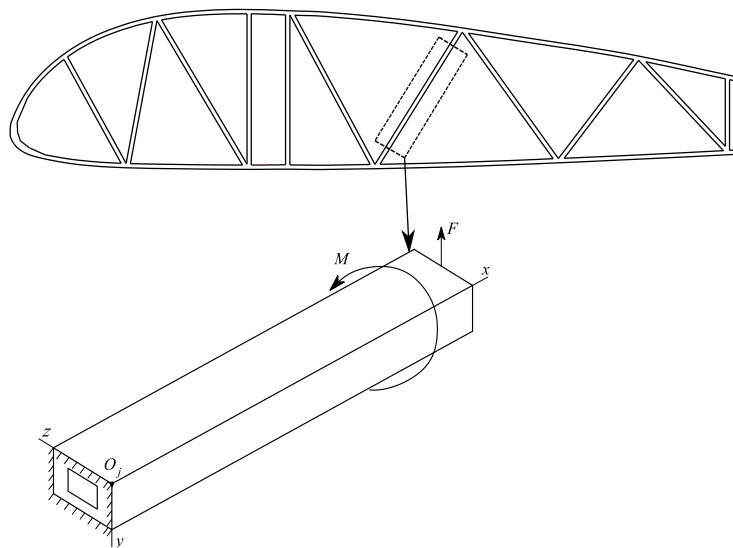
Orlaivio eksploataciniai duomenys:

- kilimo greitis – 18 m/s;
- maksimalus lėktuvo kilimo svoris – 450 kg;
- tuščio orlaivio svoris – 265 kg;
- kreiserinis greitis – 120–160 km/h;
- smukos greitis – 62 km/h;
- sparno mojis – 9 m;
- sparno plotas – 10,89 m².

Lėktuvo duomenys bus naudojami tiriamojoje dalyje skaičiuojant tenkančias apkrovas sparno nerviūrai. Iširtos apkrovos naudojamos programoje ANSYS, kur bus sudarytas skaičiuojamasis modelis su atitinkama – kaip lėktuvo sparne nerviūros geometrija. Siekiant įsitikinti ANSYS skaičiavimo programos tikslumu ir atlikti tikslų sparno nerviūros tyrimą, kitame skyriuje atliekami skaitinio modelio tikrinimo darbai.

3.2 Skaitinio modelio tikrinimas

Baigtinių elementų modelio tikrinimui, 3.18 paveiksle, pasitelkiamas vienas iš pasirinkto lėktuvo nerviūros konstrukcijos strypelių. Atliekami sukimo, tempimo, lenkimo bandymai.



3.18 pav. Nerviūros tikrinamasis elementas

Kietojo kūno skaičiuojamojo modelio patikrinimas vykdomas lyginant baigtinių elementų programiniu paketu ANSYS suskaičiuotą rezultatą su medžiagų mechanikos formulėmis gautais rezultatais.

Moksliniuose ir inžineriniuose skaičiavimuose vientiso kūno uždaviniams spręsti programa ANSYS ir baigtinių elementų metodas yra plačiai taikomi.

Peruru ir Abbisetti (2017) moksliniame darbe tyrinėja vientiso kūno sparno struktūrą (lonžeronai, nerviūros, apsiuva), taikant ANSYS baigtinių elementų metodiką, atliekant įtempių analizę, nustatant saugumo faktorių, galimus įtrūkius labiausiai tempiamose – gniuždomuose vietose (Peruru ir Abbisetti, 2017).

Parthasarathy Garre ir kitų mokslininkų buvo tiriamos sparno nerviūros, lonžeronai sukimo, lenkimo ir ašinių jėgų apkrovos atvejais. Tyrimai atliekami taikant BE metodą ANSYS programą (Garre and Arjun, 2017).

Mazaini Katon ir kt. (2017) atliko struktūrinę analizę baigtinių elementų metodu sparno segmentui, naudojantis programomis MSC PATRAN (Matzaini, Norhanifah and Norhashidah, 2017).

Julian Rogers (2018) tyrė vientiso kūno atspausdintą aliuminio sparną ir klijuoto anglies pluošto sparnus. BEM metodu gautas sparno įtempių pasiskirstymas, saugos faktorius, klupdymo ir pagrindinės deformacijos (Rogers, 2018).

Yu Wang ir kiti mokslininkai (2017) naudojantis BE metodu ištyrė uodegos kylio struktūras esant skirtingiems skrydžio režimams. BE metodu surasta optimali struktūra kosminio orlaivio

uodegai (Wang, Lui, Xing and Yang, 2017). Platus ir dažnas BE metodo taikymas įrodo, kad baigtiniai elementai yra patikimas ir efektyvus skaičiavimo metodas, ypač sėkmingai pritaikytas skaičiavimo programoms.

Svarbiausias medžiagų mechanikos uždavinys yra įtempių pasiskirstymo skerspjūvyje išvedimas arba įtempių išvedimas per įrašas. Metodika pagrįsta integralinių geometrinių deformavimo ir fizinių lygčių sudarymu. Pirmiausia, geometriškai nagrinėjant deformuotą konstrukciją gaunamos geometrinės deformavimo ar deformavimo darnos lygtys. Kūno geometrinės lygtys dar vadinamos Koši vardu (Augustin Cauchy, 1789–1887). Matricine forma užrašomos Koši lygtys (Deformuojamo kūno mechanika, 2010):

$$\nabla^T \cdot \{u\} = \{\varepsilon\} \quad (3.5)$$

čia:

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T$ – deformacijų vektorius;

$\{u\} = \{u, v, w\}^T$ – poslinkių vektorius;

∇^T – diferencialinis operatorius.

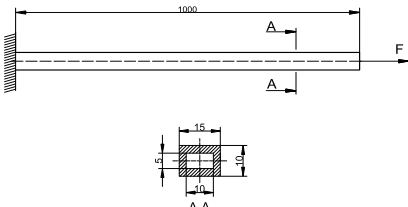
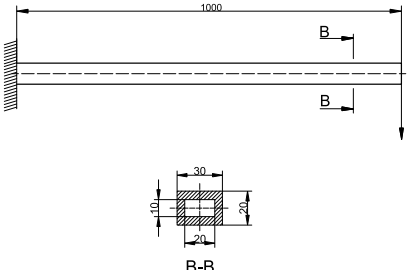
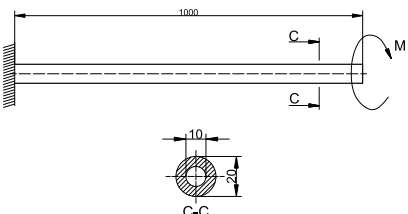
Gautos įtempių išraiškos įrašomos į atitinkamas statikos integralines lygtis, kurios išsprendžiamos įtempių atžvilgiu. Išsprendus lygčių sistemą įtempių atžvilgiu gaunama įtempių pasiskirstymo skerspjūvio formulė.

Strypo skerspjūvyje gali atsirasti šios įrašos: (N, Q_x, Q_y, M_x, M_y, T). Dažnai tik viena iš jų būna nelygi nuliui. Skiriami skirtingi deformavimo tipai: tempimas – gniuždymas, kirpimas, sukimas, lenkimas (Deformuojamo kūno mechanika, 2010)

Skaičiavimo metodika taikoma vientiso kūno uždaviniams spręsti. Baigtinių elementų ANSYS programos skaičiavimo modeliui tikrinti ir tikslumui nustatyti skaičiavimams naudojamos supaprastintos, išvestos medžiagų mechanikos strypų skaičiavimo formulės. Modeliui tikrinti yra tikrinami atvejai, kuomet strypas yra tempiamas, sukamas ir lenkiamas. Žinoma, jog modelių skaičiavimo rezultatams didžiulę įtaką turi kraštinės sąlygos. Visų skaičiavimo atvejų kraštinės sąlygos yra pavaizduotos 4.2 lentelėje. Visais strypų skaičiavimo atvejais naudotos vienodos medžiagos: struktūrinis plienas, kurio savybės aprašytos 1.2. lentelėje

4.2 lentelėje pateikiami skaičiavimo rezultatai atlikto skaitinio modelio tikrinimo sulyginant tyrėjo atliktų skaičiavimus ir ANSYS programos rezultatus.

4.2 lentelė. Skaitinio modelio tikrinimo rezultatai

Skaičiuojamoji schema	Kraštinės sąlygos	Skaičiavimo formulė	Rezultatas, MPa	ANSYS rezultatas, MPa	Skirtumas, %
Tempimas 	$l = 1000 \text{ mm}$ $F = 3000 \text{ N}$	$\sigma = \frac{F}{A}$	30	30	0
Lenkimas 	$l = 1000 \text{ mm}$ $F = 3000 \text{ N}$	$\sigma = \frac{F \cdot l}{\frac{B \cdot H^2 - b \cdot h^2}{6}}$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,72 \cdot 10^3$	4,44
Sukimas 	$l = 1000 \text{ mm}$ $M = 3000 \text{ Nm}$	$\sigma_T = \frac{M}{\frac{\pi}{16} \cdot (D^3 - d^3)}$	$2,18 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	3,67

Atlikus metodo BEM metodo ir ANSYS lyginamuosius skaičiavimus nustatyta: tempimo rezultatai sutapo. Lenkiamo modelio rezultatai skiriasi 4,44 %. Sukamo modelio nustatytas 3,67 % skirtumas.

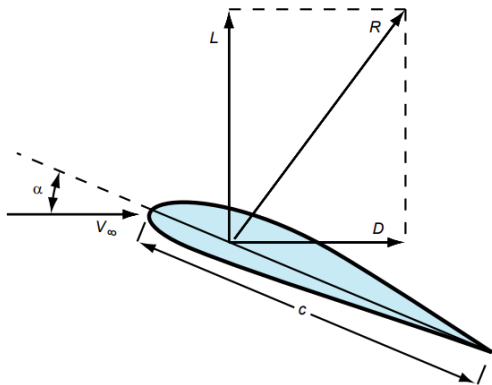
3.3 Skyriaus apibendrinimas

1. Platus BE metodo taikymas su programine įranga moksliniuose darbuose patvirtina metodo patikimumą ir efektyvumą.
2. Gauti rezultatų skirtumai 4.1 lentelėje nėra didesni nei 5 %. Iki 5 % siekianti paklaida yra priimtinas rezultatas ir galima daryti išvadą, kad ANSYS skaičiavimo programa ir baigtinių elementų metodas yra patikima priemonė kietojo kūno tyrimams.

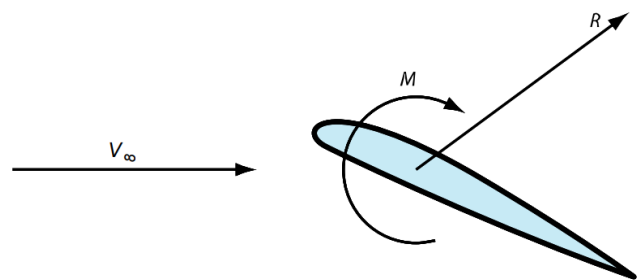
4. SPARNĄ VEIKIANČIŲ JĖGŲ ANALIZĖ

4.1 Sparno aerodinamika

Sparno veikiančios jėgos ir momentai susidaro dėl sparno paviršiuje veikiančių slėgio jėgų P ir trinties jėgų D . 4.19 paveiksle keliamoji jėga L ir pasipriešinimas D sudaro bendrą atstojamąjį aerodinaminį vektorių – R . Dydis V_∞ yra reliatyvus srautas, apibrėžiamas kaip srauto greitis toli prieš aptekamą kūną. C – profilio styga. α – sparno profilio atakos kampas. 4.20 paveiksle bendras jėgų poveikis generuoja ir aerodinaminį sukimo momentą M (Lasauskas, 2008).

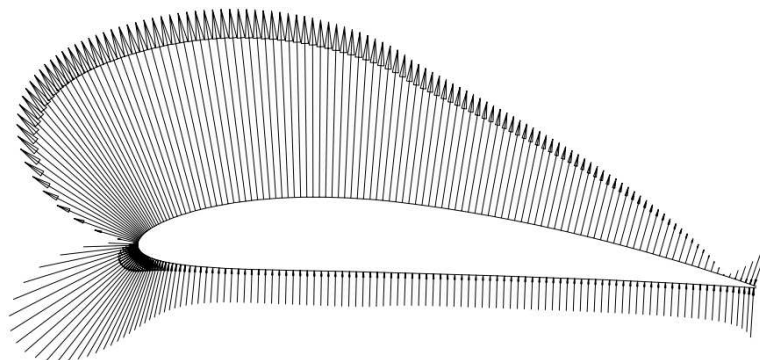


4.19 pav. Aerodinaminės jėgos sparno profilyje (Lasauskas, 2008)



4.20 pav. Profilio generuojamas momentas, keliamosios jėgos kryptis (Lasauskas, 2008)

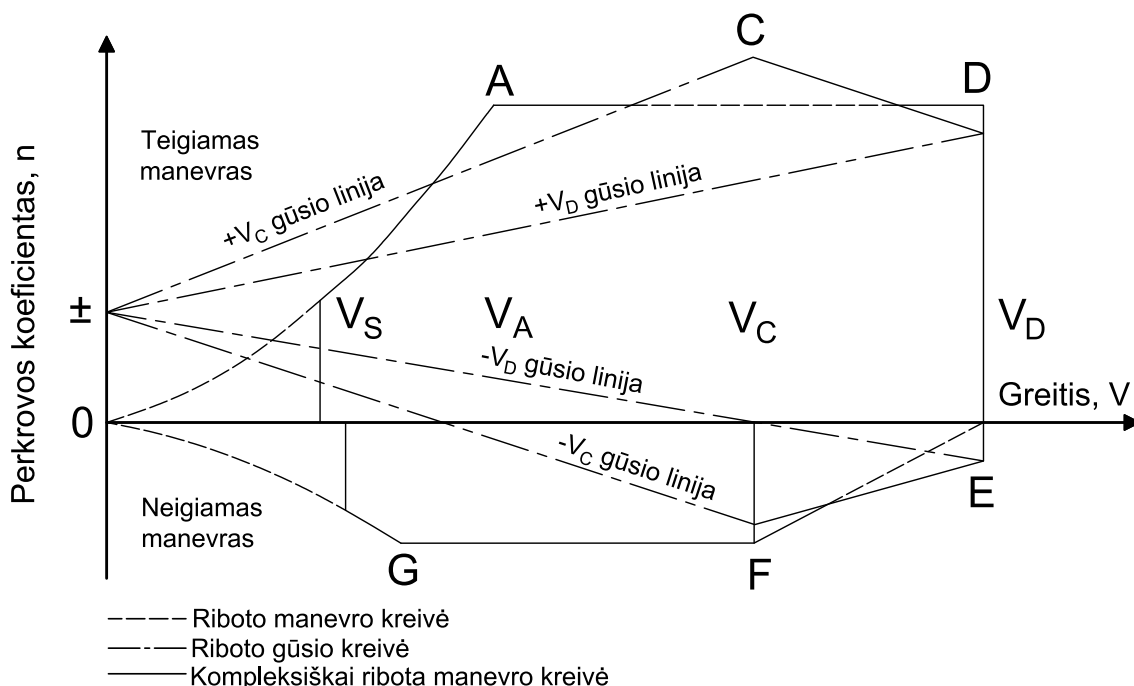
Sukuriama keliamoji jėga pasiskirsto visame profilio ilgyje. 4.21 paveiksle, esant teigiamam profilio atakos kampui, slėgis pasiskirsto nevienodai. Viršutinėje profilio dalyje yra slėgio išretėjimas. Slėgis yra mažesnis už atmosferinį ir vyksta siurbimas, todėl visi vektoriai yra nukreipti nuo profilio. Atvirkštinis procesas vyksta apatinėje ir didžiojoje noselės dalyje. Dėl teigiamo sparno atakos kampo yra sukuriamas didesnis slėgis nei atmosferinis slėgis. Dalyje priekinės noselės yra oro srauto stagnacijos taškas (Lasauskas, 2008).



4.21 pav. Teigiamo atakos kampo profilio slėgio vektorių pasiskirstymas (Lasauskas, 2008)

Sparno didžiausios apkrovos yra nustatomos remiantis EASA (angl. *European Aviation Safety Agency*) nustatytu reglamentu CS-VLA, skirtu ultralengviesiems lėktuvams projektuoti.

Poskyryje CS-VLA 333 „Skrydžio gaubiamoji“ (*Flight envelope*). (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008). Reikalavimai sparno stiprumui, kokias apkrovas turi atlaikyti sparnas projektuojant lėktuvą. Reglamento grafinis „Skrydžio gaubiamosios“ diagramos vaizdas pavaizduotas 4.22 paveiksle.



4.22 pav. Skrydžio gaubiamoji (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008)

Diagrama braižoma horizontalioje ašyje atidedant greitį, o vertikalioje ašyje atidedant perkrovos koeficientą. Lėktuvo sparno apkrova tiesiogiai priklauso nuo sparną aptekancio oro srauto greičio ir atliekamo manevro. Lėktuvo manevras yra teigiamas arba neigiamas. Teigiamas manevras yra įvardijamas, kada skridimo aukštis didėja. Neigiamas manevras, kada lėktuvo nosis nukreipta žemyn ir lėktuvo skridimo aukštis mažėja. Posūkis taip pat gali būti tiek teigiamas, tiek neigiamas priklausomai nuo skrydžio aukščio mažėjimo ar didėjimo (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008), (Lasauskas, 2008).

V_S – smukos greitis. Smuka yra pavojingas reiškinys, kurio metu oro srautas nuo sparno paviršiaus atitrūksta ir keliamoji sparno jėga sumažėja. Todėl ypač svarbu palaikyti didesnę skrydžio greitį nei smukos greitis.

V_A – projektinis manevrinis greitis. Maksimalus greitis, kuriuo skrendant galima visapusiškai išnaudoti lėktuvo manevrines galimybes. Viršijus manevrinį greitį dėl per didelių perkrovos koeficientų gali atsirasti konstrukcijų struktūrinių pasikeitimų.

V_C – projektinis kreiserinis greitis. Projektinis greitis skirtas optimalioms skrydžio charakteristikoms palaikyti su minimaliomis sąnaudomis ir dalinai apribotomis manevravimo galimybėmis.

V_D – projektinis pikiravimo greitis. Pikiravimas yra lėktuvo smigimas žemyn didėjant lėktuvo greičiui. Pikiravimo greitį draudžiama viršyti dėl atsirandančių struktūros pakitimų ar galimo suirimo. Pikiravimo greitis visada turi būti didesnis nei kreiserinis greitis, dėl pakankamos konstrukcijos suirimo atsargos (Lasauskas, 2008), (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008) (Federal Aviation Administration, 2016).

Jeigu lėktuvas įskrenda į vertikalų oro gūšį, sparno atakos kampas staigiai padidėja, keliamoji jėga viršija lėktuvo svorį, susidaro perkrovos koeficientas n . Lėktuvo stiprumas turi būti pakankamas skristi greičiu V_D , kai vertikalųjų gūšių greitis yra 7,62 m/s. Taip pat skristi greičiu V_C , kai vertikalųjų gūšių greitis yra 15,24 m/s. Gūšių kreivės yra pavaizduotos 4.22 paveiksle.

Lėktuvui skrendant esant turbulencijos sąlygomis, iškyla du pavojai: lėktuvo stiprumo atsarga turi būti pakankama, kad patekęs į vertikalų oro gūšį jis išlaikytų padidėjusias apkrovas; skrydžio greitis turi būti pakankamas, kad, patekęs į vertikalų oro gūšį, nebūtų viršytas kritinis atakos kampas (Lasauskas, 2008).

4.2 Manevrinės ir gūσιο diagramos skaičiavimas

Pagal EASA (angl. *European Aviation Safety Agency*) lengviesiems lėktuvams skirtą reglamentą skaičiuojama skrydžio gaubiamoji. Smukos greitis yra apskaičiuojamas pagal formulę teigiamai 1G perkrovai (P.F.A. Engineering, 2005), (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008):

$$V_{S1G} = \sqrt{\frac{nMg}{\frac{1}{2}\rho SC_{Lmax}}}; \quad (4.6)$$

čia: n – perkrovos koeficientas, $n = 1$;

M – lėktuvo masė, $M = 450$ kg;

g – laisvojo kritimo pagreitis, $g = 9,81$ m/s² (walter.bislins.ch, 2019);

ρ – oro tankis, $\rho = 1,225$ kg/m³ (walter.bislins.ch, 2019);

S – sparno plotas, $S = 10,89$ m²;

C_{Lmax} – maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, $C_{Lmax} = 1,72$.

$$V_{S1G} = \sqrt{\frac{1 \cdot 450 \cdot 9,81}{0,5 \cdot 1,225 \cdot 10,89 \cdot 1,72}} = 19,73 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 71,03 \text{ km/h}$$

Iš gauto smukos greičio galima apskaičiuoti ribinį manevrinį greitį:

$$V_A = V_{S1G} \sqrt{n}; \quad (4.7)$$

čia: n – eksplotacinis perkrovos koeficientas, pagal reglamentą eksploatacinė perkrova yra diapazone $n = (\text{nuo} - 1,5 \text{ iki } 3,8)$. Priimame, kad $n = 4$.

$$V_A = 19,73\sqrt{4} = 39,46 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 142,06 \text{ km/h};$$

Suskaičiuojame visą teigiamo manevro smukos kreivę, kintančią nuo perkrovos koeficiento, pasinaudodami 4.7 formule.

4.3 lentelė. Teigiama smukos kreivė

Perkrovos koeficientas, n	Smukos greitis, km/h
0	0
0,5	50,224
1	71,03
1,5	86,99
2	100,45
2,5	112,305
3	123,024
3,5	132,88
4	142,06

Apskaičiuojama smuka neigiamai $-1G$ perkrovai:

$$V_{S-1G} = \sqrt{\frac{nMg}{\frac{1}{2}\rho S C_{Lmax}}}; \quad (4.8)$$

čia: n – perkrovos koeficientas, $n = -1$;

M – lėktuvo masė, $M = 450 \text{ kg}$;

g – laisvojo kritimo pagreitis, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (walter.bislins.ch, 2019);

ρ – oro tankis, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (walter.bislins.ch, 2019);

S – sparno plotas, $S = 10,89 \text{ m}^2$;

C_{Lmax} – maksimalus keliamosios jėgos koeficientas, $C_{Lmax} = -1,35$.

$$V_{S-1G} = \sqrt{\frac{-1 \cdot 450 \cdot 9,81}{0,5 \cdot 1,225 \cdot 10,89 \cdot (-1,35)}} = 22,15 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 79,74 \text{ km/h}$$

Skaiciuojamas manevrinis greitis su neigiama $-1G$ perkrova:

$$V_G = V_{S-1G}\sqrt{-n}; \quad (4.9)$$

čia: n – eksplotacinis perkrovos koeficientas, pagal reglamentą eksploatacinė perkrova yra diapazone $n = (-1,5 \text{ iki } 3,8)$. Priimame, kad $n = -2$.

$$V_G = 22,15\sqrt{-(-2)} = 31,32 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 112,75 \text{ km/h};$$

Apskaičiuojame visą neigiamo manevro smukos kreivę, kintančią nuo perkrovos koeficiento, pasinaudodami 4.9 formule.

4.4 lentelė. Neigiama smukos kreivė

Perkrovos koeficientas, n	Smukos greitis, km/h
0	0
-0,5	56,38
-1	79,74
-1,5	97,66
-2	112,75

Skaičiuojamas projektinis kreiserinis greitis:

$$V_C = 2,4 \sqrt{\frac{Mg}{S}}; \quad (4.10)$$

$$V_C = 2,4 \sqrt{\frac{450 \cdot 9,81}{10,89}} = 48,32 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 173,95 \text{ km/h};$$

Skaičiuojamas projektinis pikiravimo greitis:

$$V_D = 1,4V_C; \quad (4.11)$$

$$V_D = 1,4 \cdot 48,32 = 67,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 243,58 \text{ km/h};$$

Lėktuvo sparno gūσιο poveikio gaubiamųjų skaičiavimai:

Apskaičiuojamas sparno ilgio kvadrato ir sparno ploto santykis:

$$A = \frac{b^2}{S}; \quad (4.12)$$

čia: b – sparno ilgis, $b = 9 \text{ m}$;

S – sparno plotas, $S = 10,89 \text{ m}^2$.

$$A = \frac{9^2}{10,89} = 7,44;$$

Skaičiuojamas geometrinis profilio stygos ilgis:

$$\bar{C} = \frac{S}{b}; \quad (4.13)$$

$$\bar{C} = \frac{10,89}{9} = 1,21;$$

Keliamosios jėgos kreivės koeficiento skaičiavimas. Koeficientas įvertina, kaip sparnas generuoja keliamąją jėgą keičiantis lėktuvo sparno atakos kampui (Russell, 1996):

$$a = \frac{a_1^0 A}{2 + \sqrt{4 + A^2}}; \quad (4.14)$$

čia: a_1^0 – vidutinis keliamosios jėgos koeficiento kitimas, $a_1^0 = \frac{C_{Lmax}}{\Delta\alpha} = \frac{1,72}{17} = 0,101$

$$a = \frac{0,101 \cdot 7,44}{2 + \sqrt{4 + 7,44^2}} = 0,08;$$

$$0,08 \cdot \frac{180}{\pi} = 4,41 \text{ per 1 laispnį}$$

Lėktuvo masės santykio skaičiavimas:

$$\mu_g = \frac{\frac{2M}{S}}{\rho C a}; \quad (4.15)$$

$$\mu_g = \frac{\frac{2 \cdot 450}{10,89}}{1,225 \cdot 1,21 \cdot 4,41} = 12,64;$$

Gūsio faktoriaus skaičiavimas:

$$K_g = \frac{0,88\mu_g}{5,3 + \mu_g}; \quad (4.16)$$

$$K_g = \frac{0,88 \cdot 12,64}{5,3 + 12,64} = 0,62;$$

Gūsio sukelti maksimalūs perkrovos koeficientai apskaičiuojami skirtingiems taškams:

$$n = 1 + \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot a \cdot K_g \cdot U_{de}}{\frac{Mg}{S}}; \quad (4.17)$$

čia: V – oro srauto greitis, $V_{Cmin} = 48,32$ m/s; $V_D = 67,66$ m/s;

U_{de} – gūsio greitis. Taškui C: $U_{de}(V_{Cmin}) = 15,24$ m/s; taškui F: $U_{de}(V_{Cmin}) = -15,24$ m/s; taškui D $U_{de}(V_D) = 7,62$ m/s; taškui E $U_{de}(V_D) = -7,62$ m/s.

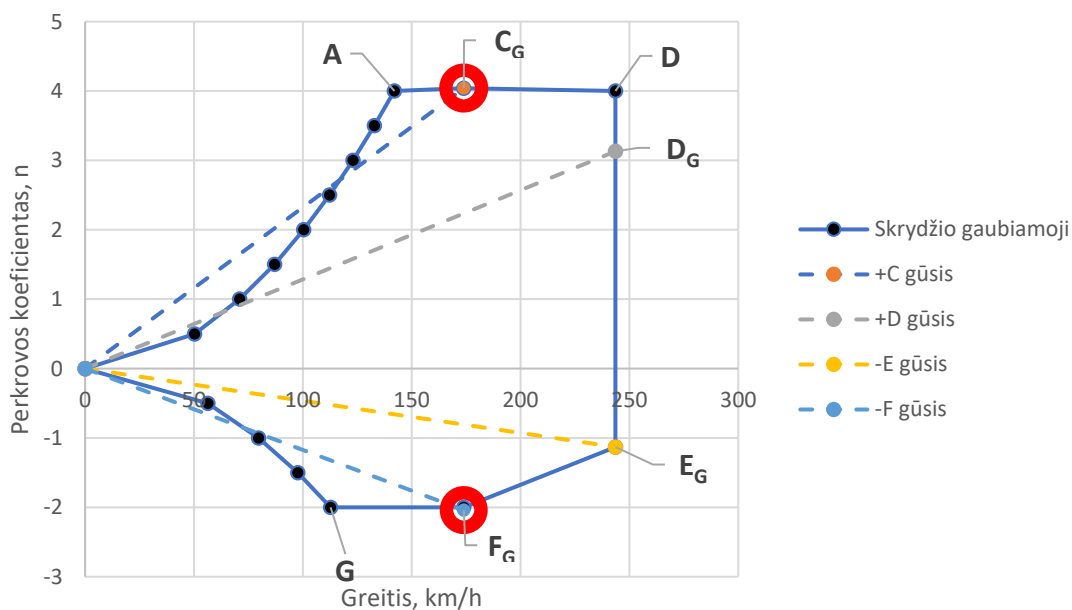
$$n(C) = 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 48,32 \cdot 4,41 \cdot 0,62 \cdot 15,24}{\frac{450 \cdot 9,81}{10,89}} = 4,04;$$

$$n(F) = 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 48,32 \cdot 4,41 \cdot 0,62 \cdot -15,24}{\frac{450 \cdot 9,81}{10,89}} = -2,04;$$

$$n(D) = 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 67,66 \cdot 4,41 \cdot 0,62 \cdot 7,62}{\frac{450 \cdot 9,81}{10,89}} = 3,13;$$

$$n(E) = 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 67,66 \cdot 4,41 \cdot 0,62 \cdot -7,62}{\frac{450 \cdot 9,81}{10,89}} = -1,13;$$

Braižomos skrydžio ir gūsio gaubiamosios kreivės pagal gautus rezultatus (4.23 pav.).



4.23 pav. Skrydžio gaubiamosios rezultatai

Gautos skrydžio ir gūsių gaubiamosios kreivės. Taškas A ($n = 4$) yra manevravimo greitis, kuriam esant lėktuvas gali atlikti manevrus visame diapazone. Greičiui didėjant manevravimo galimybės mažėja, bet didesnis greitis esant mažesniems sparno atakos kampams sukuria didesnę keliamąją jėgą.

Taškai C_G ($n = 4,04$) ir F_G ($n = -2,04$) yra kreiserinio greičio taškai, paveikti vertikalios gūsių, galinčio padidinti tiek neigiamas, ir teigiamas perkrovas. Skrendant kreiseriniu greičiu dėl gūsių gali staigiai padidėti arba sumažėti sparno atakos kampas. Dėl gūsių gali būti pasiekta maksimali sparno apkrova, kai yra kritinis atakos kampas. Gūsių poveikis gali taip pat sukelti smukos efektą, kada viršijamas kritinis atakos kampas.

Taškas D ($n = 4$) yra pikiravimo greitis. Didžiausias konstrukcinis greitis, kurio viršijimas gali sukelti konstrukcinius pažeidimus.

Sparno nerviūros tyrimams „Xfoil“ programa pasirinkti du taškai: C_G ($n = 4,04$) – didžiausia sparno apkrova esant teigiamai perkrovai su gūsiu; F_G ($n = -2,0$) – didžiausia sparno apkrova esant neigiamai perkrovai su gūsiu. C_G taškai bus vertinami esant didžiausiam kritiniam teigiamam atakos kampui. F_G taškas dėl neigiamos perkrovos bus vertinamas esant didžiausiam kritiniam neigiamam atakos kampui. Žinant kritinius greičius, perkrovos koeficientus ir skaičiavimo sąlygas, būtina sužinoti tenkančias apkrovas išilgai sparno profilio. Kitame skyrelyje bus apskaičiuota pilnutinė nerviūros apkrova pagal tenkantį sparno plotą vienai nerviūrai.

4.3 Sparno profilio apkrovos pasiskirstymas

„Xfoil“ yra interaktyvi programa, skirta ikigarsinių izoliuotų sparno profilių projektavimui ir analizei. Su šia programa galima sužinoti sparno profilio slėgio pasiskirstymą, keliamosios jėgos bei pasipriešinimo charakteristikas prie reikalingų skridimo greičių ir sparno atakos kampų. Norint

apskaičiuoti šias charakteristikas, į programą reikia įvesti sparno profilio kontūro koordinates, Reinoldso bei Macho skaičius.

Reinoldso skaičiaus apskaičiavimas:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}; \quad (4.18)$$

čia:

ρ – oro tankis, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;

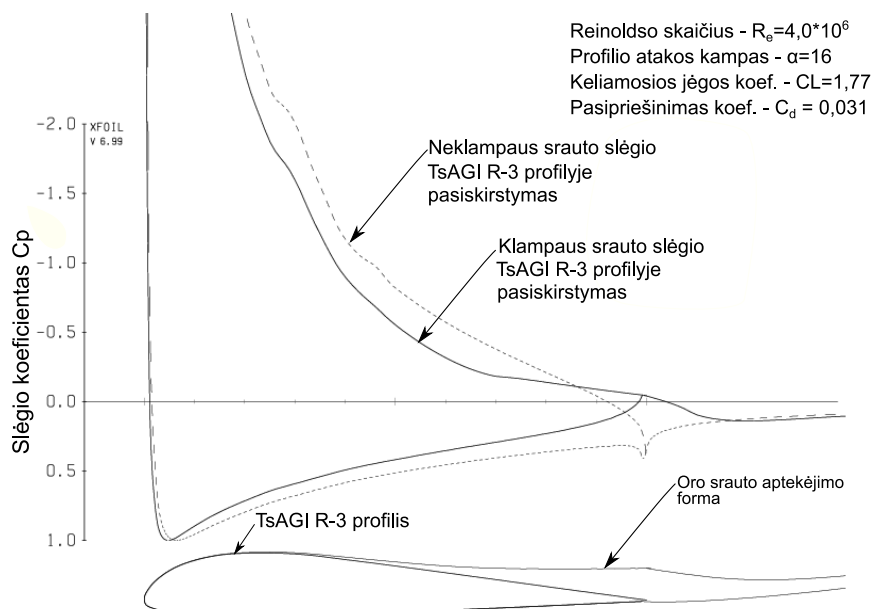
v – oro srauto greitis, $V(c) = V(f) = 48,32 \text{ m/s}$;

l – profilio stygos ilgis, $l = 1,210 \text{ m}$;

μ – kinematinė klampa, $\mu = 1,789 \cdot 10^{-5}$. (Airfoil.com, 2019).

$$Re(c) = Re(f) = \frac{1,225 \cdot 48,32 \cdot 1,210}{1,789 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^6.$$

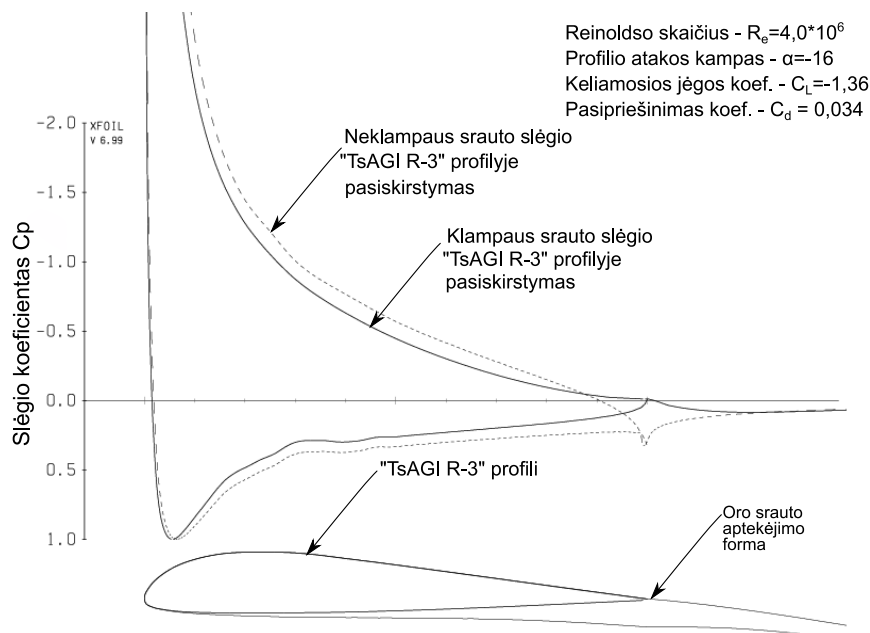
Pagal gautus Reinoldso skaičius kiekvienam tiriamam taškui nustatyti ribiniai atakos kampai, kuriems esant sukuriama didžiausi neigiami ir teigiami keliamosios jėgos koeficientai priklausomai nuo manevro tipo. Taškui C didžiausias keliamosios jėgos koeficientas pasiekiamas, kai yra 16 laipsnių profilio atakos kampas. Keliamosios jėgos koeficientai C taško $C_{Lmax} = 1,77$. Taškui F dėl neigiamo manevro profilio atakos kampas turi būti vertinamas kaip didžiausias neigiamas keliamosios jėgos koeficientas, kuris yra -16 laipsnių. F taško $C_{Lmin} = -1,36$. Toliau atliekamas kiekvieno taško esant ribiniams atakos kampams slėgio pasiskirstymas visame profilio ilgyje. „Xfoil“ programinio paketo slėgio pasiskirstymo rezultatai patekti 4.24–4.25 paveiksle:



4.24 pav. Profilio „TsAGI R-3a“ C taške slėgio pasiskirstymas

4.24 paveiksle ištirtas profilis C taške su teigiama perkrova aptekamas oro srauto greičiu esant 48,32 m/s. Oro srautas, aptekantis 16 laipsnių kampą pasuktą profilį, yra laminarinis. Profilis

viršutinėje dalyje yra slėgis, žemesnis nei atmosferos slėgis, ir paviršiuje vyksta siurbimo efektas. Profilio apačioje yra slėgis, didesnis nei atmosferos slėgis, ir profilio paviršius yra spaudžiamas.



4.25 pav. Profilio „TsAGI R-3a“ F taške slėgio pasiskirstymas

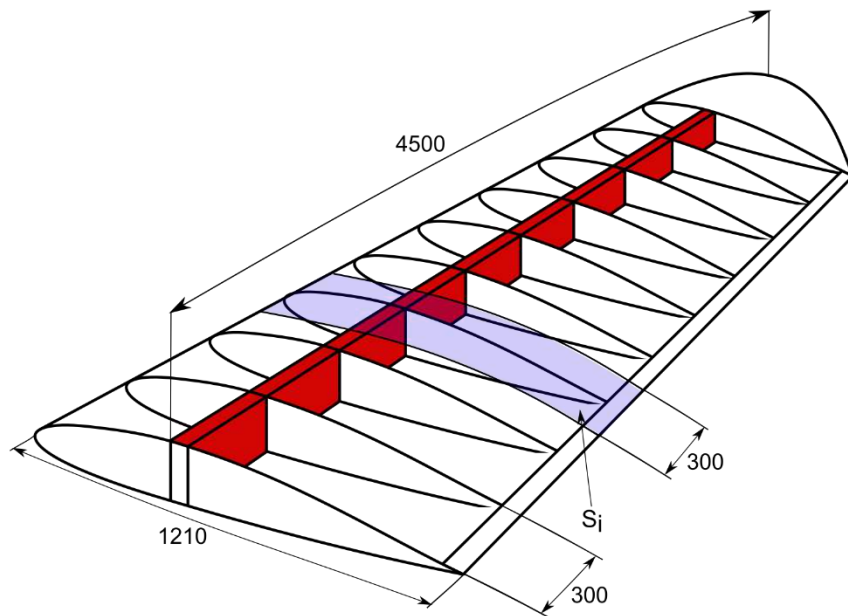
4.25 paveiksle ištirtas F taške su neigiama perkrova, kai profilį apteka 48,32 m/s greičio oro srautas esant -16 laipsnių atakos kampui. Profilio viršutinėje dalyje yra slėgis didesnis nei atmosferinis ir paviršius yra spaudžiamas. Apatinėje profilio dalyje slėgis yra mažesnis nei atmosferinis ir paviršius yra siurbiamas. Aptekantis srautas yra laminarinis.

Profilio viršutinėje dalyje slėgis yra mažesnis nei atmosferinis ir paviršius yra siurbiamas. Apatinėje profilio dalyje slėgis yra didesnis nei atmosferinis ir paviršius yra spaudžiamas.

Poskyryje pagal gaubiamosios diagramos duomenis pasirinktiems taškams buvo nustatyti Reinoldso skaičiai. Atlikti tyrimai nustatant ribinius atakos kampus ir slėgio pasiskirstymą visame profilio ilgyje. Kitame skyrelyje bus siekiama apskaičiuoti nerviūrai tenkančias apkrovas panaudojant gautą slėgio pasiskirstymą profilyje ir tenkantį sparno plotą.

4.4 Nerviūros apkrovos skaičiavimas

Ištirtas „TsAGI R-3a“ profilio slėgio pasiskirstymas yra išilgai profilio vienoje plokštumoje. Lėktuvo sparnas yra sudarytas iš nerviūrų. Kiekvienai nerviūrai tenka atitinkamas sparno plotas, kurio aerodinaminės apkrovos turi atlaikyti ir perduoti lonžeronui. Pasirinktą prototipo lėktuvo sparną sudaro 32 nerviūros. Sparno tipas yra stačiakampis. Todėl aerodinaminės apkrovos išilgai sparno pasiskirsto tolygiai. Kaip pavaizduota 4.26 paveiksle tarpas tarp nerviūrų yra 300 mm. Priimama, kad kiekviena nerviūra apkraunama vienodu sparno plotu iš viršaus ir apačios.



4.26 pav. Nerviūrų geometrija sparne

Skaičiuojamas vienos nerviūros sparno apkrovos plotas:

$$S_i = 0,3 \cdot 1,210 \cdot 2 = 0,726 \text{ m}^2;$$

Sužinomas sparno plotas vienai nerviūrai. Slėgio pasiskirstymas profilio paviršiuje C_p koeficientu perskaičiuojamas į veikiančią jėgą nerviūrai plote S_i pagal formulę:

$$F = C_p \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot S_i; \quad (4.19)$$

čia:

C_p – slėgio koeficientas;

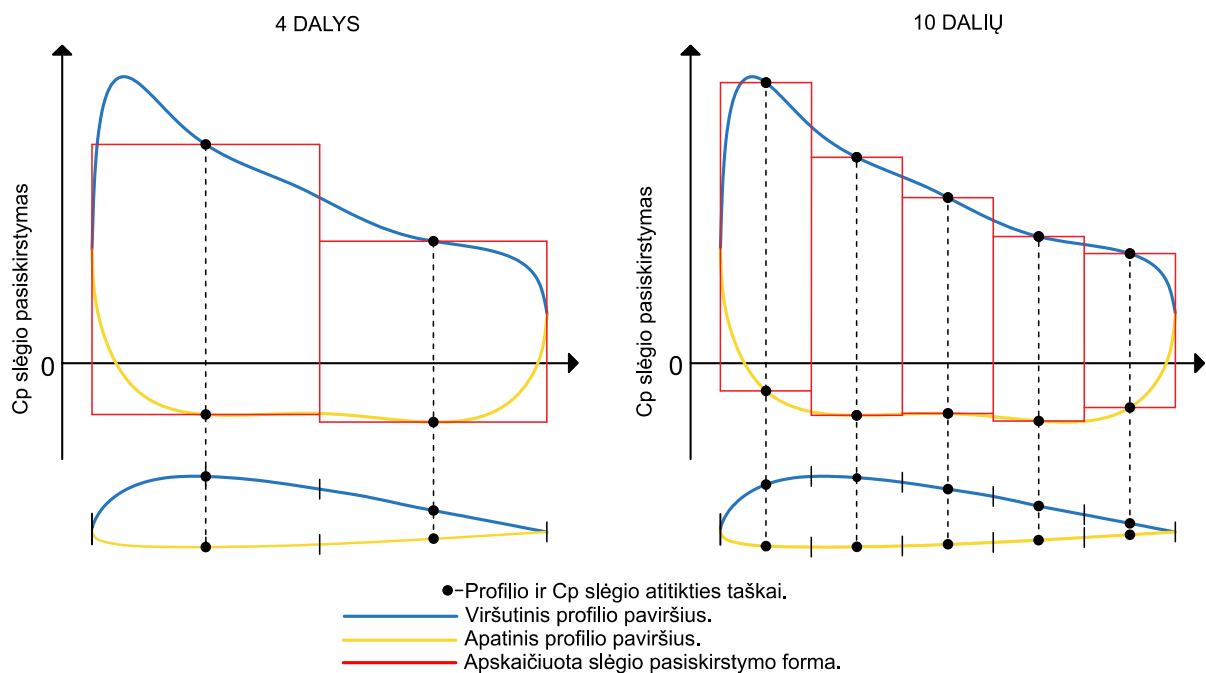
ρ – oro tankis, kg/m^3 , $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, (walter.bislins.ch, 2019);

v – oro srauto greitis, m/s , $v(c) = v(f) = 48,32 \text{ m/s}$; $v(d) = 67,66 \text{ m/s}$;

S_i – sparno plotas, m^2 ;

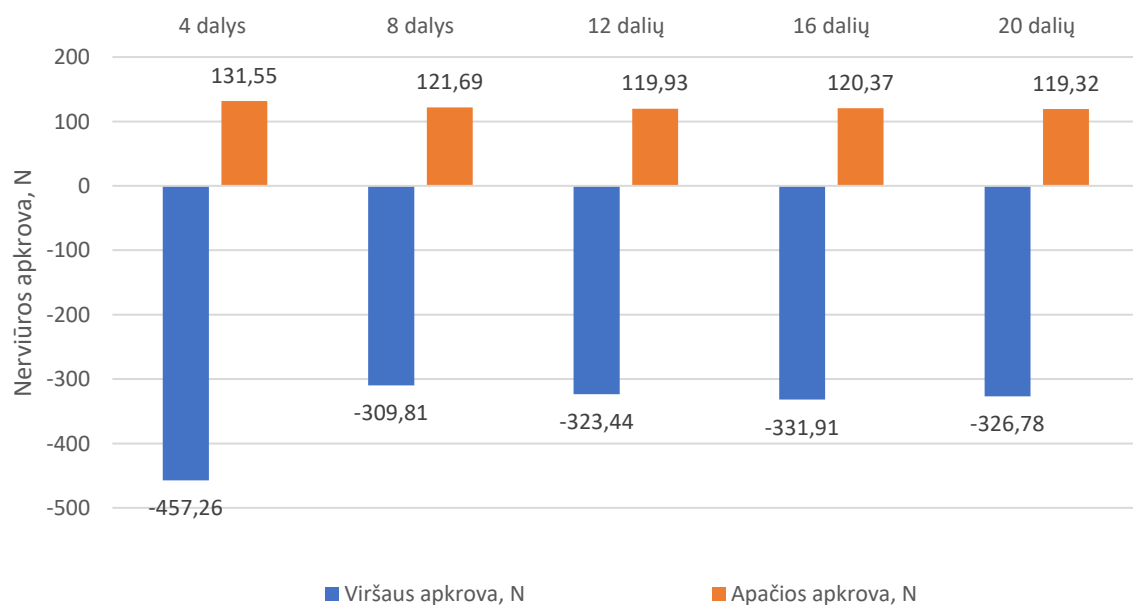
4.24, 4.25 paveiksluose pavaizduotos slėgio pasiskirstymo kreivės, visame profilio paviršiuje. Norint su tinkamu tikslumu perskaičiuoti programos „Xfoil“ profilio slėgio pasiskirstymo kreivės duomenis į sparno nerviūros apkrovą, reikalinga nustatyti profilio paviršiaus sudalinių skaičių.

Kaip pavaizduota 4.27 paveiksle, vienu atveju nerviūros profilio forma yra sudalinta į 4 vienodo ilgio atkarpas, kitu atveju į 10 atkarpų. Skirtingas profilio paviršiaus sudalinių skaičius reikalauja ir daugiau profilio paviršiaus slėgio koeficiento reikšmių C_p . Didesnis C_p koeficientų kiekis leidžia tiksliau perskaičiuoti turimą slėgio kreivę į nerviūros apkrovą. Šią išvalgą geometriškai patvirtina 27 paveiksle nubraižyta schema. Kai profilio paviršius padalintas į 4 ir 10 dalių, raudonai apibrėžti nerviūros apkrovos plotai yra skirtingi. Į 10 dalių padalintas profilio paviršius taisyklingsiau atkartoja C_p slėgio kreivės plotą ir turi mažesnę paklaidą nei 4 dalių atvejis.



4.27 pav. Sparno profilio padalijimas jėgoms skaičiuoti

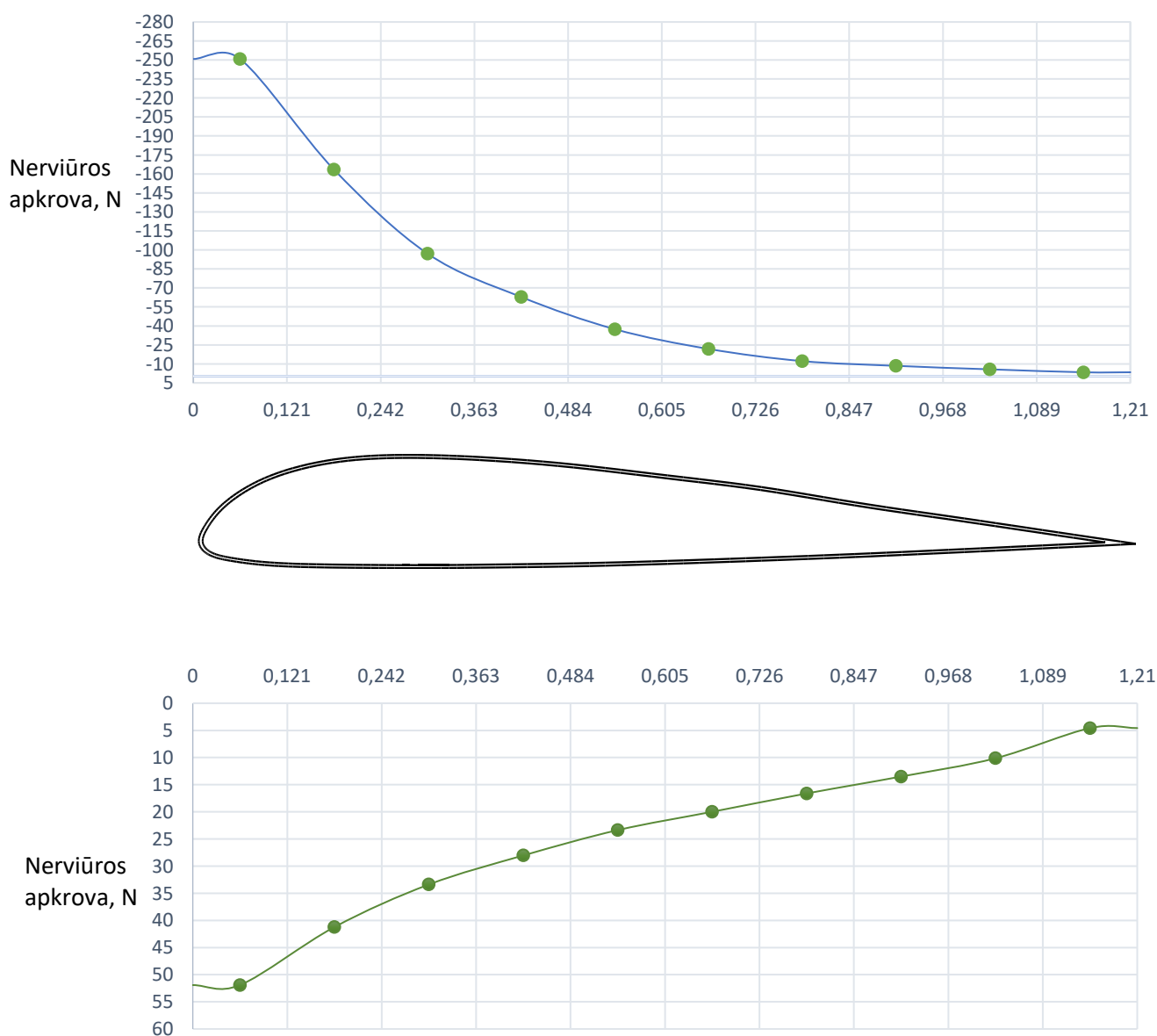
Pritaikant vis didesnį profilio paviršiaus padalinimų skaičių, gaunama vis tikslesnė visos nerviūros apkrova. Tokiu būdu norima sužinoti koks profilio paviršiaus padalinimų skaičius neturės įtakos skaičiuojant pilnutinę nerviūros apkrovą. Paviršiaus sudalinimų skaičiaus didinimas nebeteks prasmės kai pilnutinės apkrovos rezultatas pakis mažiau nei 2 % nuo paskutinio atlikto skaičiavimo. Sudalijimų skaičiaus didinimo rezultatai parodyti 4.28 paveiksle. Diagramoje pavaizduota viršutinė ir apatinė nerviūros apkrova niutonais.



4.28 pav. Nerviūros apkrovos kitimas priklausomai nuo profilio paviršiaus sudalijimų skaičiaus

Pirminis sudalijimas į 4 ir 8 dalis turėjo didelį pokytį. Apatinė nerviūros apkrova kito 7,5 %, o viršutinė net 26,27 %. Augantis profilio sudalijimų skaičius dėsningai mažino pilnutinės profilio apkrovos kitimo procentus. Palyginus 8 ir 12 dalių viršutinio paviršiaus nerviūros apkrova kito 1,44%, apatiniame profilio paviršiuje 4,4 %. Palyginus 12 ir 16 sudalijimo skaičius, apatiniame paviršiuje gautas 2,6 % o viršutiniame paviršiuje 0,36 % kitimas. Sudalinus profilį į 20 dalių, apkrova kito minimaliai (iki 2 %). Galima teigti, kad gaunamos pilnutinės nerviūros apkrovos reikšmės yra tikslios. Sudalinus paviršių į 20 dalių taškinis profilio slėgis gali būti patikimai perskaičiuotas į veikiančias apkrovas sparno nerviūrai.

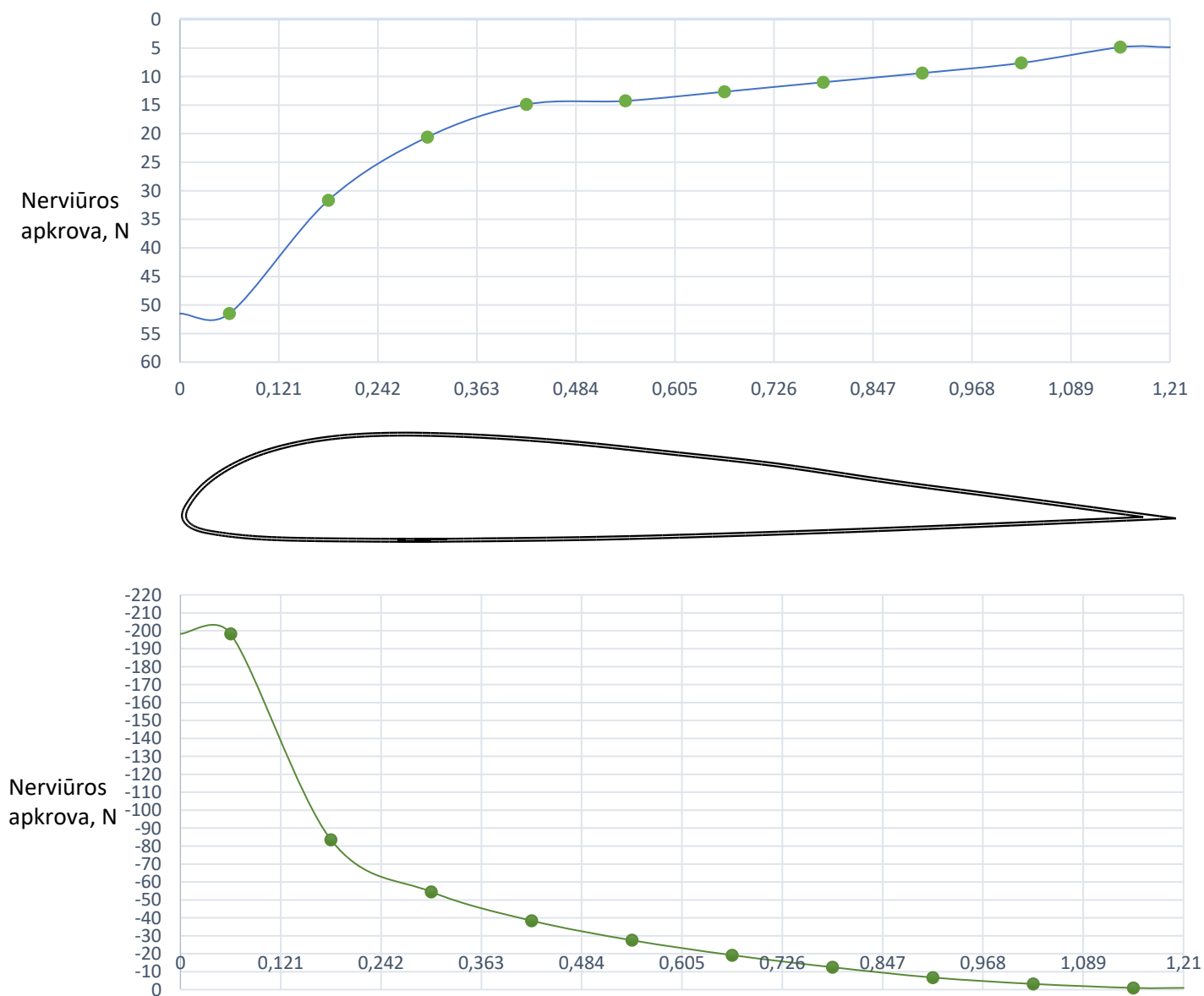
4.29 paveiksle pavaizduoti taško C (su didžiausia teigiama perkrova) apkrovos pasiskirstymo sparno nerviūroje rezultatai. Tarp apatinės ir viršutinės apkrovos yra pavaizduotas tiriamas sparno profilis.



4.29 pav. Gaubiamosios kreivės taško C – su didžiausia teigiama perkrova apkrovos pasiskirstymas

Gauti rezultatai atskleidžia veikiančios jėgos pasiskirstymą visame profilyje. Viršuje turi neigiamą apkrovą ir vyksta siurbimo procesas. Nerviuose apačioje yra teigiama apkrovą ir vyksta spaudimo procesas. Nerviuose padalinti į 20 atkarpų tenka $0,363 \text{ m}^2$ sparno ploto. Pilnutinė nerviuose apkrova gauta: 859,2 N.

4.30 paveiksle pavaizduoti taško F (su didžiausia neigiama perkrova) apkrovos pasiskirstymo sparno nerviuose rezultatai.



4.30 pav. Gaubiamosios kreivės taško F – su didžiausia neigiama perkrova apkrovos pasiskirstymas

Taško F jėgų pasiskirstymas priešingas taškui C (4.29 pav.) su didžiausia teigiama perkrova dėl priešingų jėgų pasiskirstymo. Todėl nerviuose apačioje patiriama neigiama apkrova ir vyksta siurbimo procesas. Sparno nerviuose viršuje teigiama apkrova ir vyksta spaudimo procesas. Pilnutinė nerviuose su neigiama perkrova: 590,7 N.

Suskaičiuoti atskirų taškų (C ir F) jėgos pasiskirstymo rezultatai. Skyrelyje ištirta, į kiek skirtingų dalių reikia sudalinti nerviuose paviršių, kad gauti tikslius nerviuose apkrovos rezultatus.

Pagal gautus apkrovos rezultatus, tolimesniame skyriuje bus sudaromas nerviūros skaičiuojamasis modelis, atliekamas tyrimas, pritaikant nerviūros modeliui skirtingas medžiagas.

4.5 Skyriaus apibendrinimas

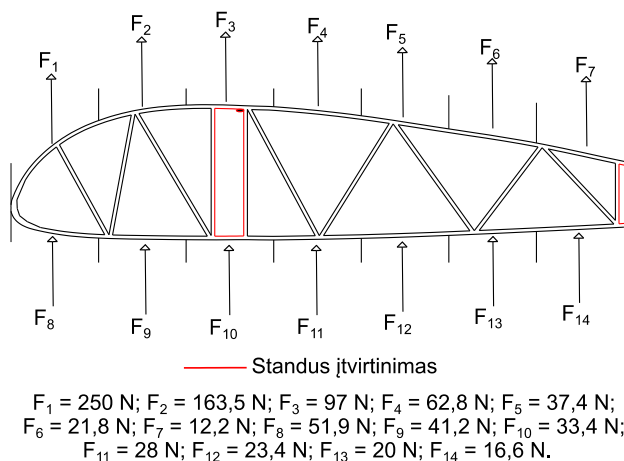
1. Apžvelgta sparno aerodinamika ir apskaičiuota skrydžio gaubiamoji, sužinoti ribiniai manevriniai greičiai bei perkrovos. Apskaičiuotos lėktuvo perkrovos esant vertikalaus gūsio poveikiui.
2. XFOIL programa ištirti sparno profilio slėgio pasiskirstymai, skrendant kruiziniu greičiu, esant skirtingiems perkrovų koeficientams.
3. Ištirta tinkama metodika perskaičiuoti slėgio taškinį koeficientą C_p į veikiančią apkrovą nerviūrai atitinkamame sparno plote.

5. NERVIŪROS TYRIMAS „ANSYS“ PROGRAMA

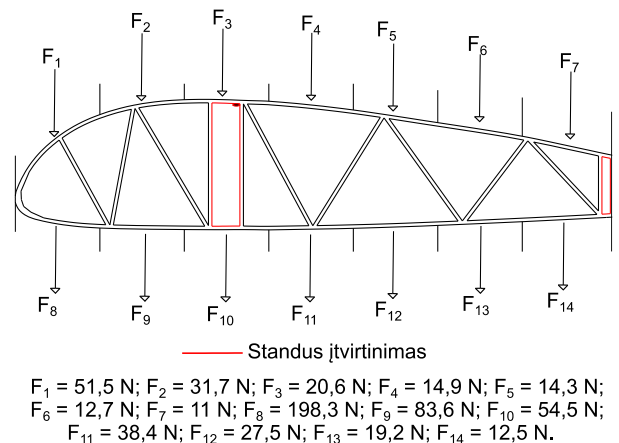
Pasirinkta ištirti nerviūros elgseną apkraunant dviem skirtingais skrydžio dengiamosios taškuose apskaičiuotais apkrovos variantais: taško C – kruizinis greitis su teigiama perkrova; taško F – kruizinis greitis su neigiama perkrova. Kiekvienas apkrovos variantas bandomas su skirtingomis medžiagomis: struktūriniu plieniu, aliuminiu, fanera, pušimi, stiklo pluoštu, anglies pluoštu. Medžiagų duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

5.1 Skaičiuojamoji schema

Skaičiavimuose yra vertinama tik centrinė nerviūros dalis. Sparno užsparnio nerviūra yra atskiras elementas nuo pagrindinės centrinės nerviūros. Apskaičiuota nerviūros apkrova paskirstyta į 14 atskirų veikiančių jėgų. 5.31 ir 5.32 paveiksle sudaroma skaičiuojamoji schema, skirta atskiriems atvejams iš 23 paveikslo skrydžio gaubiamosios kreivės taškų C ir F. Raudonai yra pažymėtos lonžerono tvirtinimo vietos. Atliekant skaičiavimus lonžerono tvirtinimo vietos traktuojamos kaip standus įtvirtinimas. Nerviūros konstrukcijos elementų skerspjūvio forma yra stačiakampė, kurios kraštinės yra 10 mm ir 5 mm.



5.31 pav. Skaičiuojamoji nerviūros schema
kruiziniam greičiui su teigiama perkrova



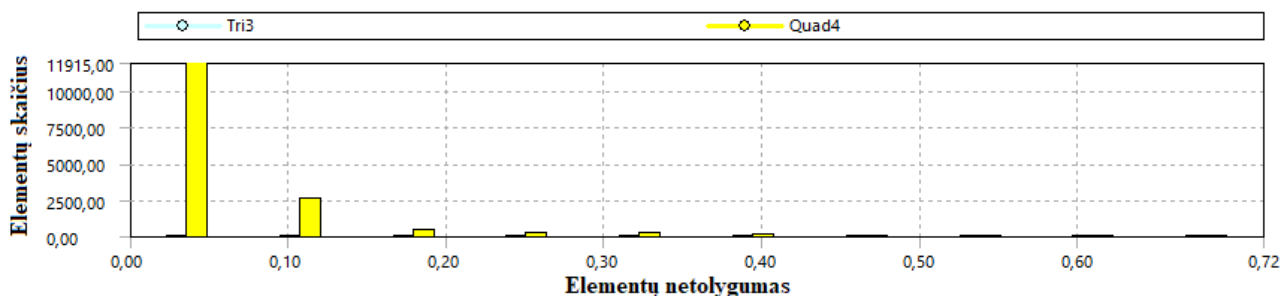
5.32 pav. Skaičiuojamoji nerviūros schema
kruiziniam greičiui su neigiama perkrova

5.31 paveiksle skaičiuojamojoje schemoje su teigiama perkrova nerviūros viršutinė konstrukcijos dalis yra siurbiamą jėgomis: $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$. Apatinėje dalyje konstrukcija yra apkraunama spaudimo $F_8, F_9, F_{10}, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}$ jėgomis.

5.32 paveiksle skaičiuojamojoje schemoje nerviūros viršutinė konstrukcijos dalis yra spaudžiama jėgomis: $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$. Apatinėje dalyje konstrukcija yra apkraunama siurbimo $F_8, F_9, F_{10}, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}$ jėgomis.

5.2 Baigtinių elementų tinklas

Baigtinių elementų tinklas tiksliais skaičiavimas yra labai svarbus. Nuo tinklo kokybės priklauso rezultato tikslumas. Sudaromas nerviūros baigtinių elementų tinklas, kurio elemento kraštinės dydis ne didesnis nei 1,5 mm. Tinklą sudaro 15 653 elementai ir 18 197 mazgai.

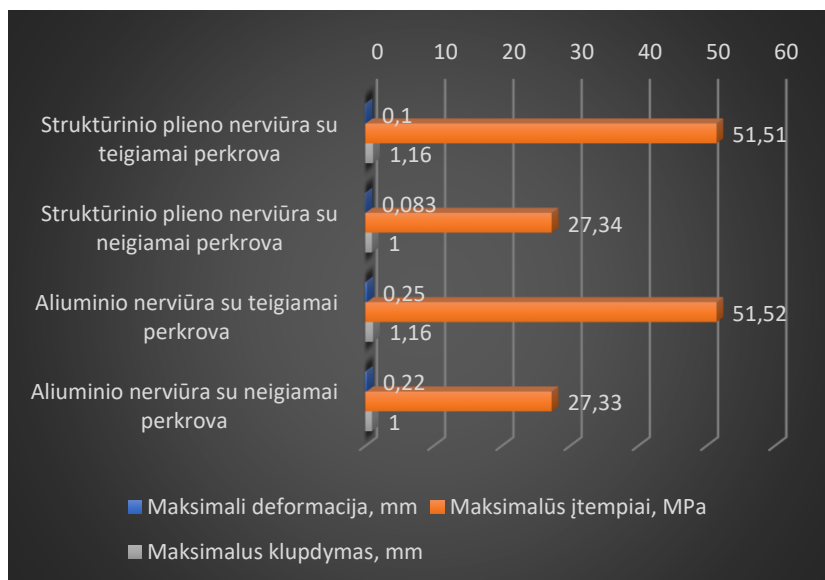


5.33 pav. Tinklo tolygumo vertinimas (ANSYS, 2018)

5.33 paveiksle pateiktas baigtinių elementų kokybės vertinimas pagal tinklelio tolygumą arba (*Skewness*) kriterijų. Tinklelis laikomas kokybišku, kai didžiosios daugumos tinklo elementų tolygumo reikšmė yra artima nuliui.

5.3 Struktūrinis plienas ir aliuminis

Struktūrinio plieno ir aliuminio medžiagos tiriamos dviem skirtingais apkrovos variantais. Rezultatai yra pateikti 5.34 paveiksle. Struktūrinio plieno nerviūros masė – 1,47 kg. Aliuminio nerviūros masė – 0,52 kg.



5.34 pav. Struktūrinio plieno ir aliuminio tyrimas

Iš specialaus aviacinio aliuminio pagaminta nerviūra yra 282 % lengvesnė nei paprasto struktūrinio plieno nerviūra. Lyginant patiriamas deformacijas tarp aliuminio ir struktūrinio plieno, pažymėtina, kad aliumininės nerviūros deformacija vidutiniškai padidėjo 2,5 karto. Ekvivalentiniai įtempiai pakito minimaliai.

5.5 lentelėje vizualiai pavaizduota deformacijos, ekvivalentinių įtempių ir klumpdymo deformacijų pasiskirstymo žemėlapiai su teigiamomis ir neigiamomis perkrovomis.

5.5 lentelė. Struktūrinio plieno ir aliuminio nerviūrų medžiagų palyginimas

Perkrovos tipas	Struktūrinio plieno nerviūra	Aliuminio nerviūra
Teigiamas 	Deformacija 	Deformacija
Neigiamas 	Deformacija 	Deformacija
Teigiamas 	Klumpdymo deformacija 	Klumpdymo deformacija
Neigiamas 	Klumpdymo deformacija 	Klumpdymo deformacija
Teigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai
Neigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai

Deformacija išsidėstė vienodai abiejose medžiagose, vienodais apkrovos atvejais, tačiau skyrėsi deformacijos dydis. Klumpdymo deformacija aliuminyje ir struktūriniame pliene išliko vienodo dydžio. Tačiau klumpdymo maksimumo dislokacijos yra skirtingos priklausomai nuo perkrovos atvejo. Aliuminio ir struktūrinio plieno ekvivalentiniai įtempiai pasiskirstė identišškai ir turi vienodas įtempių maksimumo reikšmės.

Pagal gautus rezultatus galima pripažinti, kad plienas yra sunkiai pritaikoma medžiaga lengvojoje aviacijoje dėl savo didesnės masės, kuris žymiai didesnė nei aliuminio medžiagos. Aliuminis turi didesnes deformacijas, bet skirtumas tarp aliuminio ir struktūrinio plieno yra

minimalus. Svarbus faktorius, kurį privalu įvertinti projektuojant neviūros konstrukciją yra klupdymo deformacija. Klupimo reakcija yra skirtinga priklausomai nuo perkrovos tipo.

Palyginami įtempių masės santykio parametrai atskleidžiantys, kuri medžiaga efektyviau išnaudojama:

$$\frac{\sigma_E}{m}; \quad (5.20)$$

čia:

σ_E – maksimalūs ekvivalentiniai įtempiai;

m – nerviūros masė.

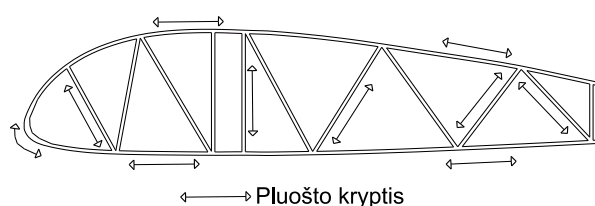
5.6 lentelė. Struktūrinio plieno ir aliuminio nerviūrų įtempių ir masės santykių palyginimas

Nerviūros medžiaga ir perkrovos tipas	Įtempių ir masės santykis, MPa/kg
Struktūrinio plieno nerviūra su teigiama perkrova	35,04
Struktūrinio plieno nerviūra su neigiama perkrova	18,6
Aliuminio nerviūra su teigiama perkrova	99,08
Aliuminio nerviūra su neigiama perkrova	52,56

5.6 lentelėje įtempių masės santykis parodo, jog aliuminis yra daug efektyvesnė medžiaga visais skaičiavimo atvejais. Mažesnė aliuminio nerviūros masė yra efektyviau išnaudojama, neviršijant tempimo stiprumo ribos įtempių (449 MPa).

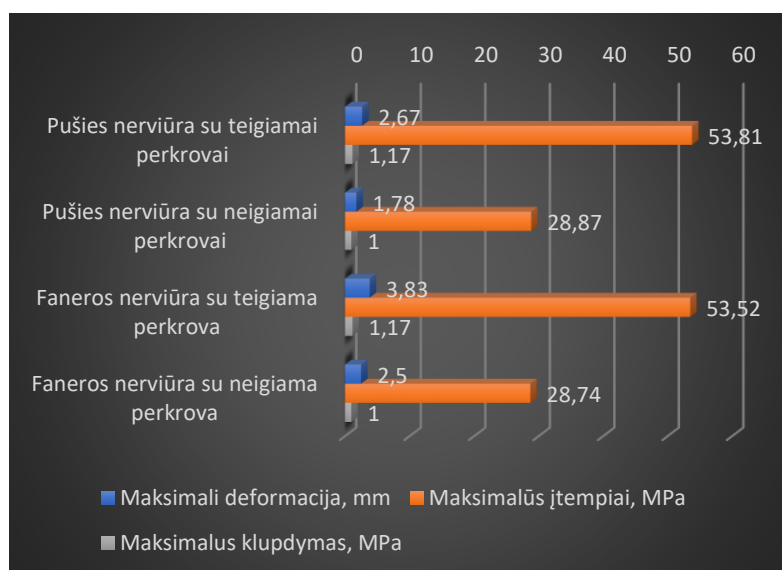
5.4 Pušis ir fanera

Su mediena atlikti tyrimai, kuriais palyginta pušies mediena su klijuotos faneros medžiaga, dvejomis skirtingomis apkrovos sąlygomis. 5.35 paveiksle pateikta pušies medienos pluošto kryptis, kad turėtų didžiausią atsparumą apkrovoms. Visoje nerviūroje medienos sluoksniai yra orientuoti išilgine kryptimi nerviūros konstrukcijos elementų.



5.35 pav. Medienos pluošto išsidėstymas

Pušies nerviūros masė yra 0,09 kg. Faneros nerviūros masė yra 0,14 kg. Faneros nerviūra yra 36 % sunkesnė. 5.36 paveiksle pateikiami rezultatai nerviūrų suprojektuotų iš pušies ir faneros.



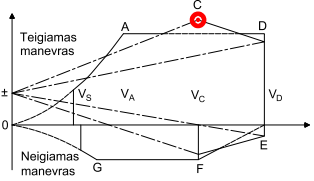
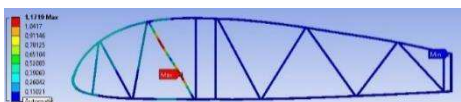
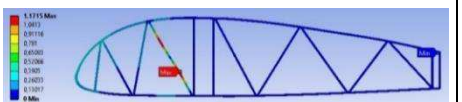
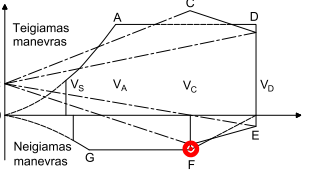
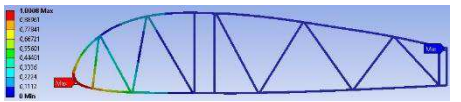
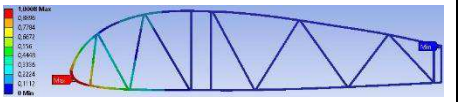
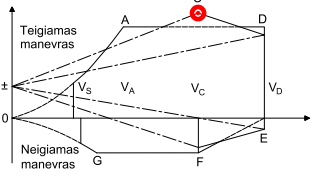
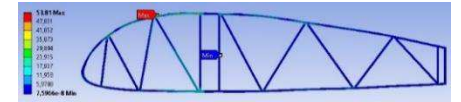
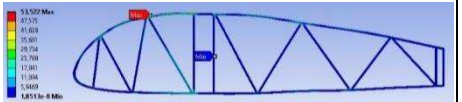
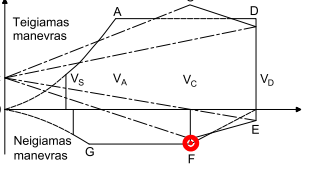
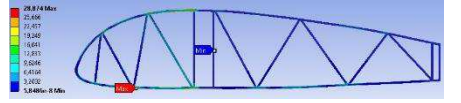
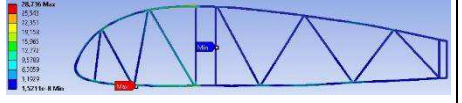
5.36 pav. Pušies ir faneros tyrimas

Palyginus rezultatus fanera su teigiama perkrova ir neigiama perkrova turi didesnes deformacijas nei pušies mediena. Įtempių dydžiai vienodais apkrovos atvejais, keičiant tik nerviūros medžiagą, pakito minimaliai. Klumpdymo deformacija išliko nepakitusi, kas leidžia patvirtinti, kad pušies ir faneros nerviūros konstrukcijos yra atsparios klumpimo faktoriui.

5.7 lentelėje pateikti pušies ir faneros ekvivalentinių įtempių, deformacijų, klumpimo deformacijų žemėlapiai priklausomai nuo perkrovos tipo.

5.7 lentelė. Pušies ir faneros nerviūrų medžiagų palyginimas

Perkrovos tipas	Pušies nerviūra	Faneros nerviūra
Teigiamas 	Deformacija 	Deformacija
Neigiamas 	Deformacija 	Deformacija

Perkrovos tipas	Pušies nerviūra	Faneros nerviūra
Teigiamas 	Klūpdyo deformacija 	Klūpdyo deformacija 
Neigiamas 	Klūpdyo deformacija 	Klūpdyo deformacija 
Teigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai 
Neigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai 

Lyginant pušies ir faneros deformacijas, maksimumo ir minimumo dislokacijos nepakito, bet skiriasi deformacijos dydžiai. Didesnės deformacijos rezultatai yra gaunamos, pritaikant faneros medžiagą. Deformacijos lyginant skirtingus apkrovos atvejus išsiskyrė ir deformacijos maksimumo dislokacijos skirtingos. Palyginus su minėtomis aliuminio ir struktūrinio plieno nerviūros deformacijomis, 5.5 lentelėje maksimumai išsidėstė skirtingai. Medienos deformacijos yra didesnės ir išsidėsčiusios pavojaingesnėse vietose, nei struktūrinio plieno ar aliuminio medžiagose.

Klūpdyo deformacijos židiniai nepakito keičiant medžiagas. Panašūs klūpdyo žemėlapiai – rezultatai, gauti aliuminio ir struktūrinio plieno atvejais (5.5 lentelė). Skirtingais apkrovos atvejais, nerviūros klūpimas yra nevienodas, dėl priešinga kryptimi veikiančių jėgų. Ekvivalentinių įtempių pasiskirstymas identiškas lyginant pušį ir fanerą. Panašūs įtempių žemėlapiai gauti aliuminio ir struktūrinio plieno atvejais (5.5 lentelė).

Skačiuojami pušies ir faneros medžiagų įtempių masės santykiai naudojantis 5.20 formule. 5.8 lentelėje pateikti skaičiavimo rezultatai.

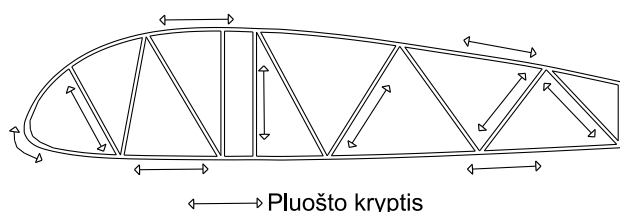
5.8 lentelė. Pušies ir faneros nerviūrų įtempių ir masės santykių palyginimas

Nerviūros medžiaga ir perkrovos tipas	Įtempių ir masės santykis, MPa/kg
Pušies nerviūra su teigiama perkrova	597,89
Pušies nerviūra su neigiama perkrova	320,78
Faneros nerviūra su teigiama perkrova	382,29
Faneros nerviūra su neigiama perkrova	205,29

5.8 lentelėje įtempių masės santykio gauti rezultatai patvirtina, kad pušies nerviūra yra tinkamesnė medžiaga sparno nerviūros konstrukcijai nei fanera. Pušies pranašumus patvirtina mažesnė masė, ekvivalenčių įtempių neviršijama pušies medžiagos stiprumo tempimo riba (66,3 MPa) ir didesnis įtempių masės rezultatas nei faneros.

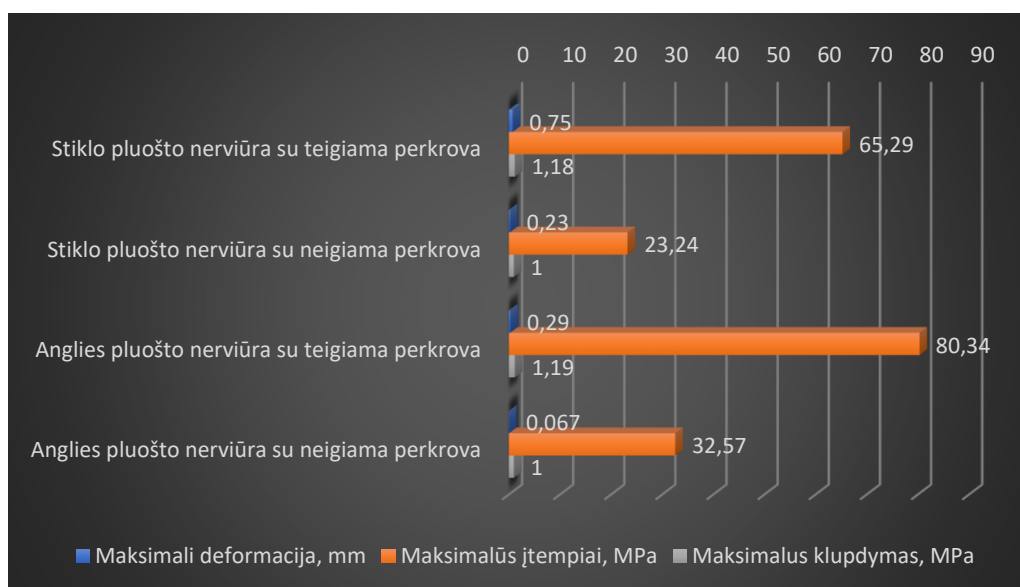
5.5 Kompozitinės medžiagos: stiklo pluoštas, anglies pluoštas

5.37 paveiksle anglies ir stiklo pluošto išsidėstymo kryptis yra labai svarbus faktorius. Tyrinėti skirtingi pluošto išsidėstymo nerviūroje kampai. Pateiktas pluošto išsidėstymas anglies ir stiklo pluoštui yra atspariausias veikiančioms apkrovoms.

**5.37 pav. Nerviūros anglies ir stiklo pluošto orientacija**

Visoje nerviūroje kompozitinis pluoštas yra orientuotas išilgine kryptimi nerviūros konstrukcijos elementų.

5.38 paveiksle pateikti kompozitinių nerviūrų tyrimo rezultatai. Stiklo pluošto nerviūros masė yra 0,38 kg. Anglies pluošto nerviūros masė yra 0,29 kg. Svorio skirtumas yra 0,09 kg arba 31 %.



5.38 pav. Struktūrinio pluošto ir anglies pluošto tyrimas

5.38 paveikslo rezultatai atskleidė, kad stiklo pluoštas turi 3 kartus didesnes deformacijas nei anglies pluoštas. Anglies pluošto nerviūra turi vidutiniškai 24 % didesnius ekvivalenčių įtempius nei stiklo pluoštas. Klupimo deformacijos su neigiamomis perkrovomis nepakito o su teigiamomis perkrovomis anglies pluošto deformacija yra minimaliai didesnė. Aptarti duomenys patvirtina, kad kompozitinės medžiagos yra patikima konstrukcinė medžiaga projektuoti nerviūrą. Dėl nedidelės masės ir labai mažų deformacijos rodiklių.

5.9 lentelėje pateikti anglies ir stiklo pluošto deformacijų, klupimo deformacijų ir ekvivalenčių įtempių kitimo žemėlapiai.

5.9 lentelės. Stiklo pluošto ir anglies pluošto medžiagų nerviūrų palyginimas

Perkrovos tipas	Stiklo pluošto nerviūra	Anglies pluošto nerviūra
Teigiamas 	Deformacija 	Deformacija
Neigiamas 	Deformacija 	Deformacija

Perkrovos tipas	Stiklo pluošto nerviūra	Anglies pluošto nerviūra
Teigiamas 	Klūpdymo deformacija 	Klūpdymo deformacija
Neigiamas 	Klūpdymo deformacija 	Klūpdymo deformacija
Teigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai
Neigiamas 	Ekvivalentiniai įtempiai 	Ekvivalentiniai įtempiai

Deformacijų žemėlapiai atskleidė, kad maksimalūs deformacijos židiniai yra nerviūros priekinėje dalyje, teigiamos perkrovos atveju ir nerviūros viduryje, apatinėje dalyje nerviūros neigiamos perkrovos atveju. Deformacijos žemėlapis nepakinta keičiantis taikomoms medžiagoms. Kas reiškia, jog medžiagos turi vienodas mechanines anizotropines savybes. Klūpdyimo deformacija anglies pluošto nerviūroje yra matomi du deformacijos maksimumai. Tuo tarpu stiklo pluoštas turi tik vieną deformacijos maksimumą. Klūpdyimo deformacijos yra panašios į atitinkamais atvejais tirtus pritaikant: aliuminio, struktūrinio plieno, pušies, faneros medžiagas. 5.9 lentelėje nerviūrų įtempių pasiskirstymas yra identiškas, tačiau anglies pluošto nerviūros ekvivalentinių įtempių reikšmės yra didesnės. Identiški ekvivalentinių įtempių pasiskirstymo modeliai gauti ir kitų medžiagų pritaikymo atvejais.

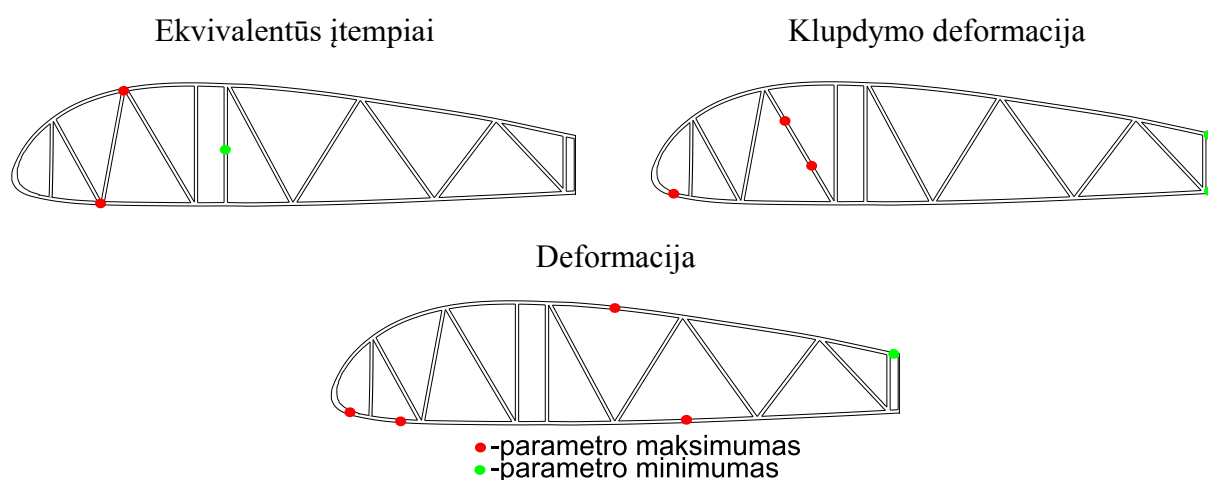
Lyginami stiklo ir anglies pluoštų nerviūrų įtempių ir masės santykiai gauti 5.20 formule. Rezultatai pateikti 5.10 lentelėje.

5.10 lentelė. Anglies pluošto ir stiklo pluošto įtempių ir masės santykių palyginimas

Nerviūros medžiaga ir perkrovos tipas	Įtempių ir masės santykis, MPa/kg
Anglies pluošto nerviūra su teigiama perkrova	227,03
Anglies pluošto nerviūra su neigiama perkrova	112,31
Stiklo pluošto nerviūra su teigiama perkrova	171,82
Stiklo pluošto nerviūra su neigiama perkrova	61,16

Anglies pluoštas įvertinus įtempių masės koeficientą yra pranašesnis nei stiklo pluoštas. Gautus rezultatus patvirtina mažesnė masė, deformacija, didesni ekvivalentūs įtempiai, kurie neviršija tempimo stiprumo ribos 1979 MPa.

Apžvelgtos skirtingos medžiagos pritaikytos nerviūros konstrukcijai parodė, kad izotropinės medžiagos aliuminis, struktūrinis plienas turi skirtingą deformacijų pasiskirstymą nei anizotropinės medžiagos. Ekvivalenčių įtempių pasiskirstymas visose medžiagose buvo panašus. Klupimo deformacija visose medžiagose svyravo apie 1 mm, todėl visas taikomas medžiagas nerviūros konstrukcijai galima laikyti atsparias klupimui. 5.39 paveiksle pateikiami nerviūros deformacijos, klupimo deformacijos, ekvivalenčių įtempių maksimumų ir minimumo vietos nerviūros modelyje. Maksimumo vietos yra svarbios atkreipti dėmesį projektuojant nerviūrą, nes gauti rezultatai atitinka didžiausias galimas nerviūros apkrovas skrydžio metu.



5.39 pav. Nerviūros tyrimo žemėlapių apibendrinimas

Ekvivalenčių įtempių pasiskirstymas visais atvejais buvo panašus. Didžiausi įtempiai gauti išorinio nerviūros kontūro ir vidinių konstrukcijos strypelių jungties vietose. Klupimo deformacija

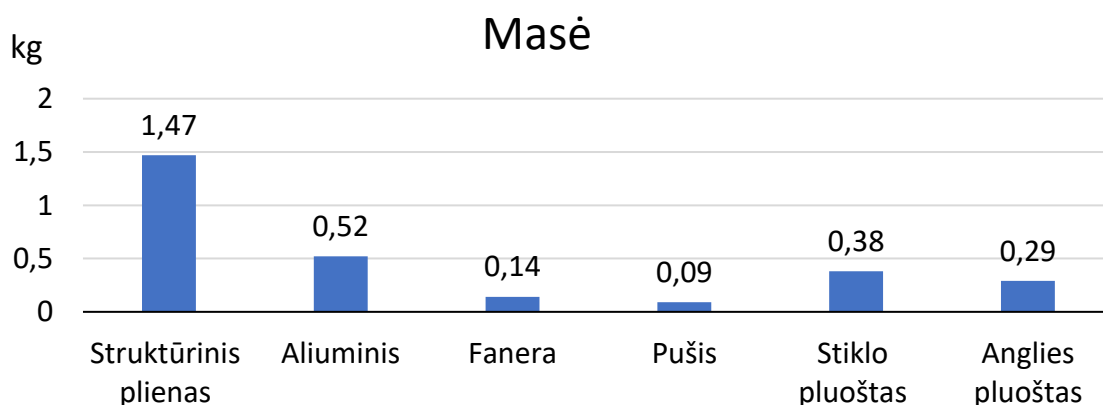
teigiamos perkrovos atveju visada turėjo didžiausią įtaką vidinio strypelių klupimui. Neigiamos perkrovos atveju, visada didžiausia klupimą nepriklausomai nuo medžiagos rodė nerviūros noselės apatinė dalis. Deformacijos izotropinio aliuminio, struktūrinio plieno medžiagų atveju yra nerviūros viduryje. Pušies ir faneros deformacijos yra didžiausios nerviūros noselėje, kurios deformacijos yra pavojingesnės sparno aerodinaminiai kokybei išsaugoti. Kompozitinės rūšies medžiagos daugiausia deformuojasi nerviūros noselėje. Su neigiama perkrova anglies pluoštas daugiausia deformuojasi viduryje, apačioje.

Iširtos medžiagos nerviūros konstrukcijai atskleidė, kurios nerviūros vietos yra pačios silpniausios, koks yra įtempių išsidėstymas ir kurios nerviūros konstrukcijos vietos yra jautriausios klupimo deformacijai. Norint sužinoti geriausiai pritaikomą medžiagą šiam nerviūros modeliui. Kitame poskyriuje atliekamas bendras visų medžiagų nerviūros konstrukcijos parametrų palyginimas.

5.6 Tyrimo rezultatų palyginimas

5.6.1 Nerviūros masė

Lėktuvo konstrukcijos komponentų masė yra vienas svarbiausių kriterijų vertinant tinkamumą lėktuvui. 5.40 paveiksle pavaizduoti nerviūrų masės rezultatai.



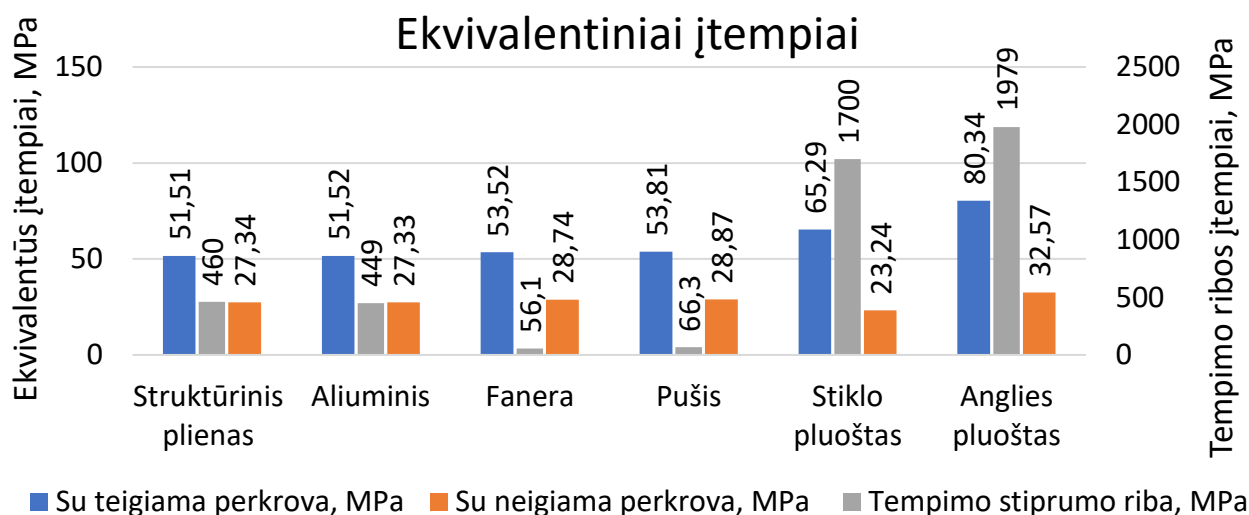
5.40 pav. Nerviūros masė

Struktūrinis plienas išsiskiria didžiausia mase iš visų medžiagų ir yra mažiausiai konkurencinga medžiaga. Lengviausia medžiaga yra pušis, kurios masė yra 16,3 karto mažesnė nei struktūrinio plieno. Savo savybėmis nuo pušies neatsilieka ir fanera. Kompozitinės medžiagos neišsiskiria ypač geromis masės savybėmis, tad nėra ypač konkurencingos lyginant su pušimi. Masės rezultatai atsako, kodėl mediena yra vienas populiariausių pasirinkimų lengvojoje aviacijoje, projektuojant nerviūras.

5.6.2 Nerviūros ekvivalentiniai įtempiai

5.41 paveiksle pateikti medžiagų ekvivalentūs įtempiai įvertinantys nerviūros normalinius ir tangentinius įtempius viename dėmenyje. Ekvivalentiniai įtempiai taip pat vadinami „von mises“ įtempiais yra dažnai naudojami projektavimo darbuose, nes leidžia įvertinti trijų dimensijų įtempių būklę, kaip vieną teigiamą įtempių reikšmę. Ekvivalentiniai įtempiai lyginami su medžiagos tempimo

stiprumo riba, nes konstrukcijos tempimas yra pavojingiausias ir greičiausiai konstrukciją suardantis reiškinys.



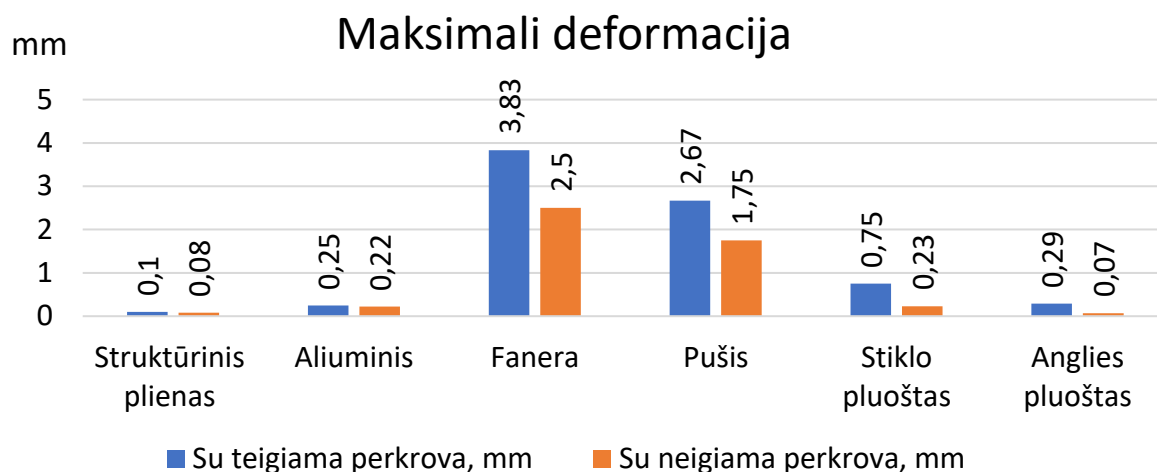
5.41 pav. Ekvivalentiniai įtempiai

Ekvivalentiniai įtempiai pasiskirstė dėsningai medžiagų grupėms. Struktūrinio plieno ir aliuminio medžiagos turi identiškus ekvivalentinius įtempius ir stiprumo ribos reikšmės neviršytos su didžiule atsarga. Kompozitinis stiklo ir anglies pluoštas išsiskyrė aukščiausiais įtempiais iš visų medžiagų, bet ekvivalentiniai įtempiai yra gerokai mažesni nei tempimo stiprumo riba. Faneros ir pušies nerviūrų įtempiai parodė labai artimus tempimo stiprumo ribos ekvivalentinius įtempius todėl galima teigti, jog šis nerviūros modelis pilnavertiškai išnaudoja medienos savybes.

Apibendrinant nerviūrų iš skirtingų medžiagų įtempius, pušis ir fanera pilnavertiškai išnaudojama nerviūros konstrukcijoje. Nerviūros apkrova yra artima ribiniams stiprumo įtempiams, bet neviršija jų. Likusios medžiagos pasižymimi ypač geromis mechaninėmis savybėmis, tačiau pagal tenkančias apkrovas nerviūrai savo medžiagos galimybių neišnaudoja ir nėra efektyvios bei konkurencingos dėl didesnio svorio nei mediena.

5.6.3 Deformacija

Deformacija yra svarbus konstrukcijos parametras. Nuo nerviūros deformacijos priklauso ir viso sparno forma. 5.42 paveiksle pateikiamas deformacijų kitimas priklausomai nuo medžiagos ir skirtingais apkrovos atvejais.



5.42 pav. Maksimali deformacija

Pušies ir faneros nerviūra yra pati nepatvariausia ir patiria didžiausias deformacijas. Nerviūra patvariausia yra pagaminta iš plieno. Šios medžiagos nerviūra patiria mažiausias deformacijas. Stiklo ir anglies pluoštai pasižymi vidutinėmis deformacinėmis savybėmis. Anglies pluoštą galima lyginti su aliuminiu, kurių deformacijos yra artimos. Didžiausios pušies ir faneros medžiagų deformacijos, nors ir didžiausios, bet nėra kritinės. Kompozitinėms medžiagoms didelę įtaką turi pluošto kryptis. Teisingai išdėsčius pluoštą anglies ir stiklo pluošto nerviūros turi nedideles deformacijas. Aliuminį ir anglies, stiklo pluoštus galima įvardinti kaip konkurencingas medžiagas pušies medienai dėl ypač mažų deformacijų.

5.6.4 Rezultatų apibendrinimas

Apžvelgus nerviūrų gautus rezultatus yra nesudėtinga nustatyti medžiagų privalumus ir trūkumus. Pavyzdžiui medienos pušis ir fanera turi ypač mažas nerviūros mases, ekvivalentūs įtempiai yra arti tempimo stiprumo ribos, bet deformacijos yra didžiausios iš visų tirtų medžiagų. Kompozitinės medžiagos bei aliuminis ir struktūrinis plienas patiria minimalias deformacijas ir turi didžiulius skirtumus tarp ekvivalenčių įtempių ir tempimo stiprumo ribos. Siekiant tikslo efektyviai išreikšti medžiagų gautus rezultatus, atskleisti medžiagos tinkamumą nerviūros konstrukcijai ir nepanaudotus medžiagos resursus nerviūros konstrukcijoje, pasitelkiami apibendrinamieji skaičiuojamieji koeficientai:

Įtempių ir masės santykio koeficientas:

$$\frac{\sigma_E}{m} \cdot 10^{-3}; \quad (5.21)$$

čia: σ_E – maksimalūs ekvivalentinis nerviūros įtempis, MPa;

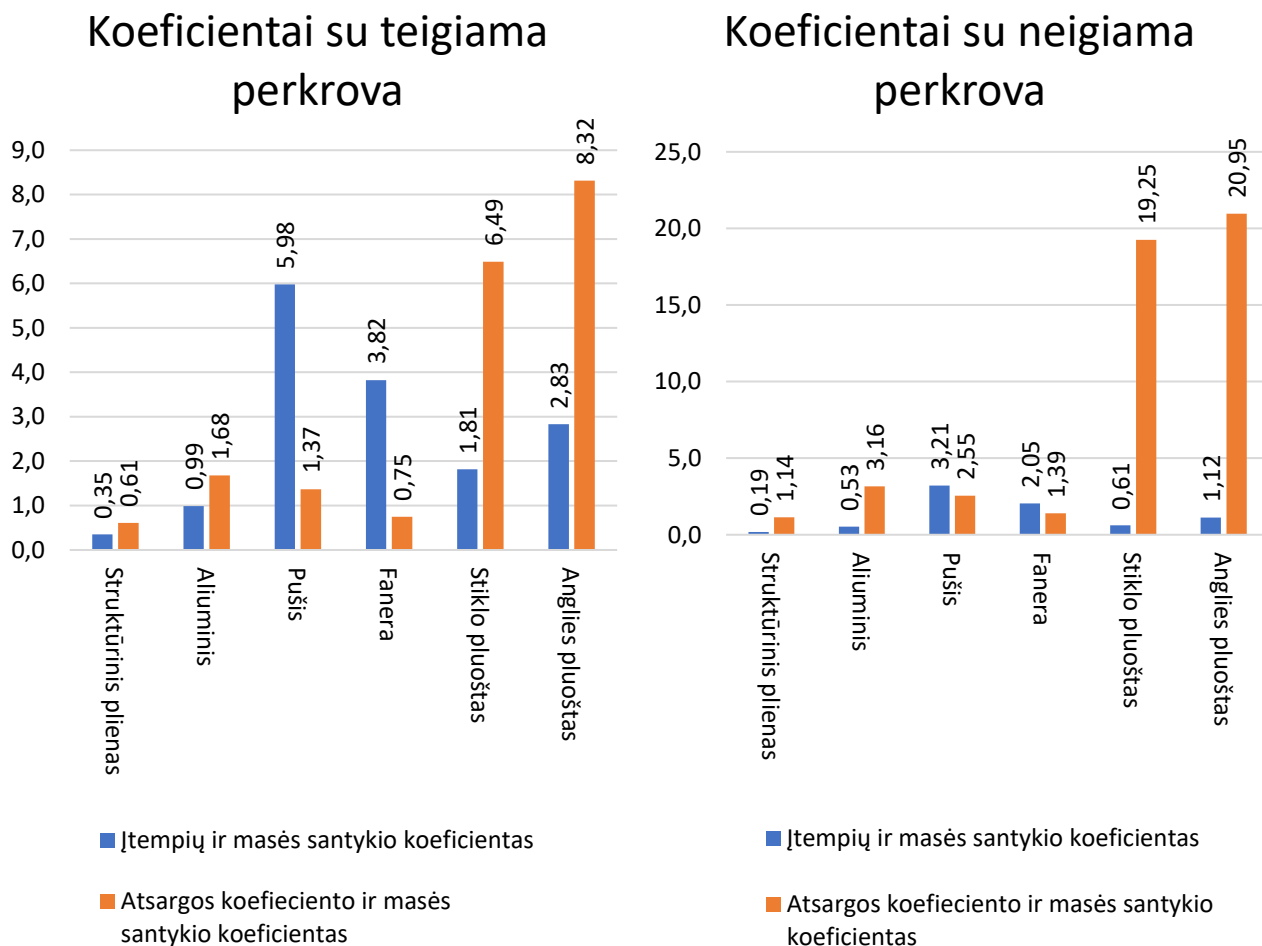
m – nerviūros masė, kg.

Atsargos koeficiento ir masės santykio koeficientas:

$$\frac{\sigma_T}{\frac{\sigma_E}{m}} \cdot 10^{-2}; \quad (5.22)$$

čia: σ_T – medžiagos tempimo stiprumo riba, MPa.

Taikant koeficiento formules apskaičiuotos nerviūros iš skirtingų medžiagų su teigiamomis ir neigiamomis perkrovomis. Rezultatai pateikti 5.43–5.44 paveikse.



5.43 pav. Koeficientai su teigiama perkrova

5.44 pav. Koeficientai su neigiama perkrova

5.43–5.44 paveiksluose pateikti koeficientų rezultatai galutinai atskleidė, kad pušis yra produktyviausiai išnaudojama šiame nerviūros konstrukcijos modelyje. Abiem skaičiavimo atvejais pušis turėjo didžiausią įtempių ir masės santykio koeficientą. Didžiausias pušies įtempių masės

koeficientas įrodo, jog šios konstrukcijos nerviūra yra geriausiai pritaikoma pušies medienai. Atsargos koeficiento ir masės santykio koeficientas, įrodė, kad pušis yra pilnavertiškai išnaudota šioje nerviūros konstrukcijoje.

Aliuminio ir struktūrinio plieno medžiagos nėra konkurencingos pritaikant nerviūros konstrukcijai, nes turi mažiausius įtempių ir masės santykio bei mažus atsargos koeficiento masės santykio rodiklius. Rodikliai patvirtina, kad aliuminis ir struktūrinis plienas dėl didelės masės ir žemos stiprumo ribos negali pasiekti rezultatų prilygstančių pušies ar faneros rezultatams.

Anglies bei stiklo pluoštai neišnaudoja medžiagos turimo potencialo, šios konstrukcijos nerviūros modelyje. Šią išvadą įrodo ypač didelis atsargos ir masės santykio koeficientas ir mažas įtempių masės santykio koeficientas. Koeficiento reikšmės patvirtina, kad kompozitinės medžiagos turi didelį atsargos koeficientą ir santykinai nedidelę masę. Didelis nerviūros atsargos koeficientas ir nedidelė masė leidžia optimizuoti nerviūros konstrukcijos parametrus ir pritaikyti nerviūrą konstrukciją kompozitinėms medžiagoms. Nerviūros optimizavimas, leistų pasiekti anglies ir stiklo pluoštų nerviūrų geriausias savybes ir jas palyginti su medienos rezultatais. Todėl kitame skyriuje bus siekiama optimizuoti nerviūros elementų profilį siekiant pilnavertiškai išnaudoti anglies ir stiklo pluošto savybes.

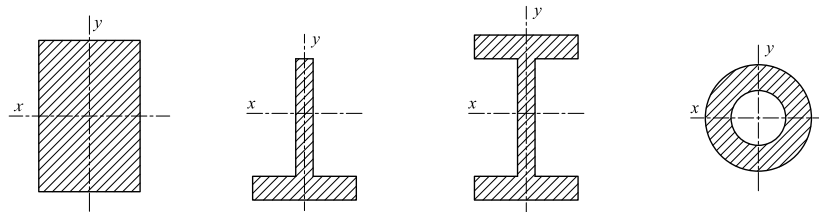
5.7 Skyriaus apibendrinimas

1. Aptarti ANSYS programos gauti rezultatai, deformacijų, įtempių ir klupdymo deformacijos maksimumo dislokacijos keičiant nerviūros medžiagas.
2. Pušies medienos nerviūra pasižymėjo turinti mažiausią masę. Šio modelio nerviūroje pušis turi aukščiausią įtempių ir masės santykio koeficientą, kas patvirtina medžiagos nenuginčijamus privalumus prieš kitų medžiagų taikymą, šio modelio nerviūrai.
3. Atsargos koeficiento ir masės santykio koeficientas atskleidė, kad stiklo pluoštas ir anglies pluoštas yra neefektyviai panaudojamas šio modelio nerviūroje.
4. Norint pritaikyti kompozitinį pluoštą ultralengvojo lėktuvo konstrukcijos nerviūrai, reikalingas, nerviūros konstrukcijos elementų skerspjūvio tipo ar parametrų optimizavimas.

6. NERVIŪROS PRITAIKYMAS KOMPOZINĖMS MEDŽIAGOMS

6.1 Strypelio skerspjūvio modeliai

Tyrimams pasirinkta nerviūros konstrukcija yra ypač efektyvi kuomet gaminama iš medienos medžiagų. Stiklo ir anglies pluoštai yra neefektyvūs medinės nerviūros konstrukcijos modelyje. Todėl norit pilnavertiškai panaudoti kompozitinės medžiagos galimybes, nerviūros konstrukcijoje reikalinga nerviūros konstrukcijos strypelio skerspjūvio optimizacija. 6.45 paveiksle pateikta keletas pagrindinių galimų skerspjūvio optimizavimo modelių.



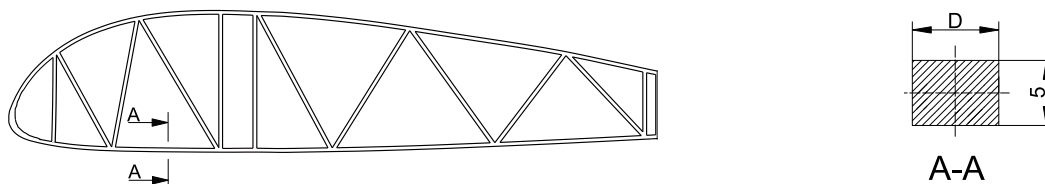
6.45 pav. Nerviūros strypelio skerspjūvio modeliai

Pasirinktas nerviūros konstrukcijos profilis lemia ne tik konstrukcijos savybes, bet ir gamybos sudėtingumą. Vamzdelio profilis pasižymi ypač aukštomis stiprumo ir standumo savybės, turint ypač mažą masę. Didelis atsparumas nuovargiui. Todėl naudojamas gaminant ypač lengvus dviračius, lėktuvų, lenktyninių automobilių struktūrinius komponentus (Johnson, 2019). Tačiau akivaizdu, kad suformuoti nerviūros profilio išorinę formą būtų sudėtinga, dėl vamzdelio didelio išlenkimo ir dirbtinai atsirandančių vidinių vamzdelio įtempių, suformuojant profilio formą. Kitas ne mažiau aktualus klausimas, kaip bus sujungti vidinės konstrukcijos strypeliai su išorinio profilio formos strypeliu. Šie svarbūs gamybiniai klausimai verčia atsisakyti šio skerspjūvio tipo.

Dvitėjinis ir T formos profiliai yra atsparūs apkrovoms x ir y ašies kryptimis. Šie skerspjūvio tipai yra aktualūs norint turėti didelį konstrukcijos tvirtumą, atsparumą klupimui ir šlyties deformacijai. (Dragonplate.com, 2019). Tačiau modeliai sukelia nemažą kiekį probleminių situacijų gamyboje. Kaip išgauti reikalingą strypelio skerspjūvio formą ir skerspjūvį pritaikyti pagal sparno profilį bei sujungti su kitais konstrukcijos strypeliais. Minėti strypelių skerspjūvių tipai yra efektyvūs, tačiau pritaikymas praktikoje yra komplikotas ir reikalauja gilesnių tyrimų bei sprendimų gamybos procese. Iširtas stačiakampis strypelio skerspjūvis yra efektyvus ir paprastas modelis, norint pritaikyti nerviūros konstrukcijai kompozitines medžiagas. Stačiakampio skerspjūvio pritaikymas yra nesudėtingas dėl lengvai keičiamų parametrų pagal reikalingas konstrukcijos savybes. Stačiakampis profilis nesukelia problemų gamybos procese. Be didelių sunkumų galima gaminti visą nerviūros konstrukciją kaip vienalytę detalę be atskirų sujungimų. Vienalytė detalė užtikrina konstrukcijos vientisumą ir patikimumą. Kompozitinių medžiagų pritaikymui, pagal aprašytus pagrindinius taikomus skerspjūvių modelius buvo pasirinktas stačiakampis profilio tipas. Dėl projektavimo paprastumo ir nerviūros gamybos patikimumo.

6.2 Stačiakampio nerviūros strypelio profilio optimizavimas

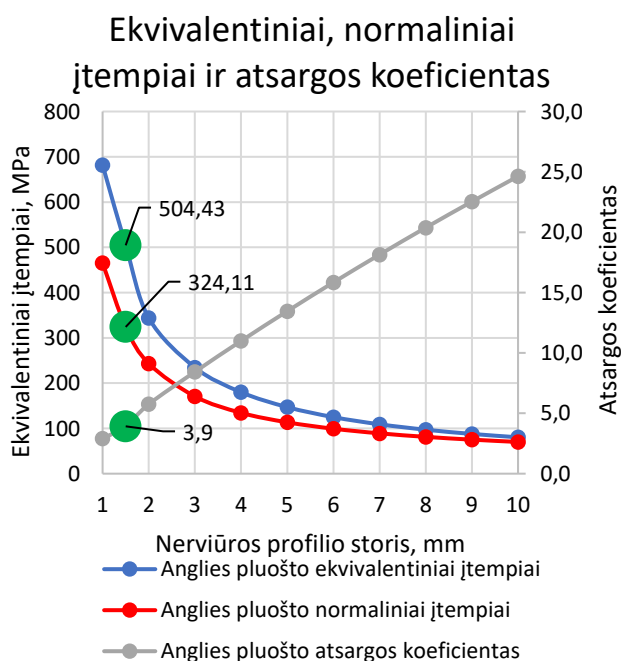
6.46 paveiksle stačiakampio skerspjuvio modelis konstrukcijos charakteristikas gali keisti dviem parametrais: storio ir aukščiu. Nerviūros pjūvyje A–A pateikti nerviūros skerspjuvio parametrai.



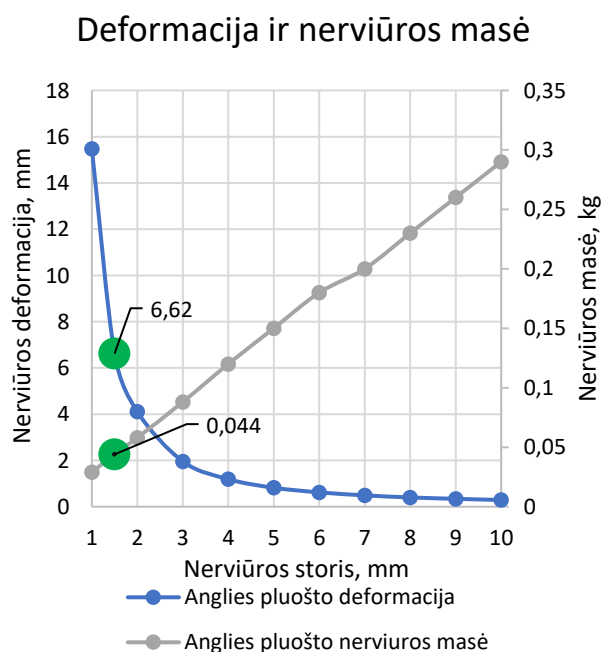
6.46 pav. Nerviūros elemento optimizuojamas parametras

Išsikeltas optimizavimo uždavinys: keičiant nerviūros konstrukcijos stačiakampio profilio storio parametras D (nuo 1 iki 10 mm), rasti mažiausią konstrukcijos masę, išsaugant reikalavimą neviršyti 400 MPa normalinių įtempių ribos, anglies pluošto sparno komponentams ir 250 MPa normalinę įtempių ribos, stiklo pluošto sparno komponentams (Acceptable means of compliance for very light aeroplanes, 2008).

Tyrimai atliekami taikant jau patikrintą ANSYS baigtinių elementų programa. 6.47 paveiksle palyginti anglies pluošto ekvivalentinių, normalinių įtempių ir atsargos koeficiento kitimas, keičiantis nerviūros konstrukcijos elementų skerspjuvio storiui. 6.48 paveiksle, deformacijos ir nerviūros masės pokytis, keičiantis nerviūros konstrukcijos elementų skerspjuvio storiui.



6.47 pav. Anglies pluošto optimizavimo rezultatai I

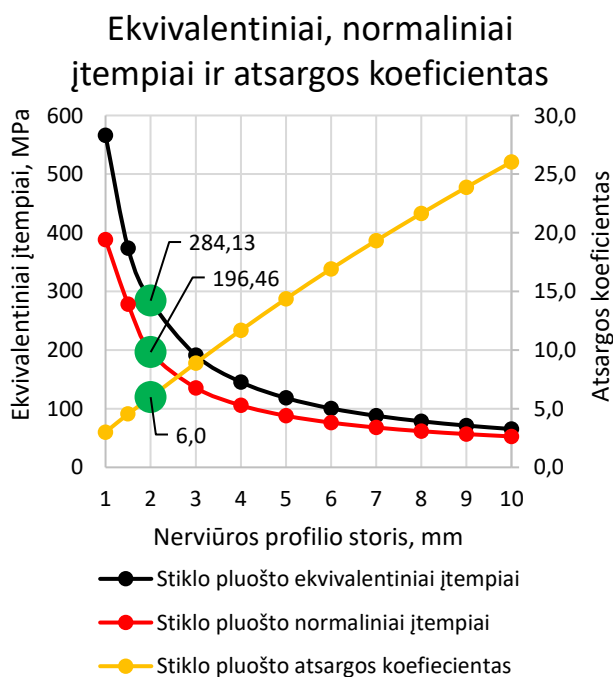


6.48 pav. Anglies pluošto optimizavimo rezultatai II

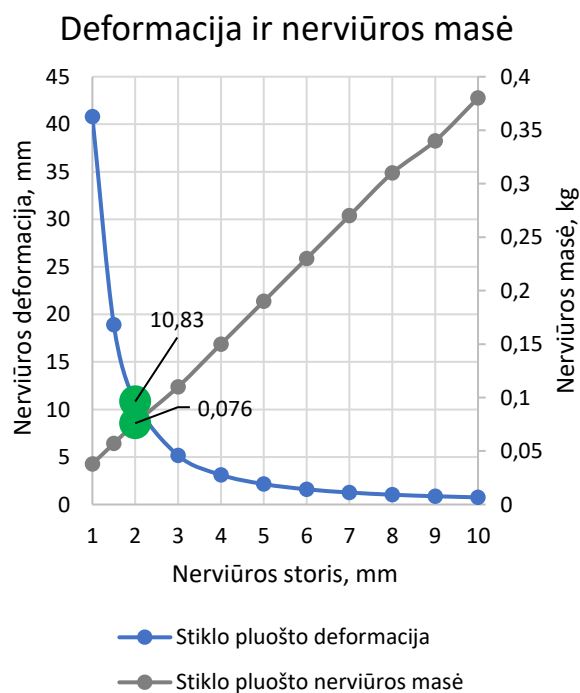
Visos nerviūros konstrukcijos strypelių skerspjuvio storio mažinamas parodė, kad tendencingai mažėjančio storio, dėka, esant 1,5 mm storio ir 5 mm aukščio stačiakampiui konstrukcijos skerspjuvio

profilui, nerviūros masė buvo sumažinta iki minimalios galimos 44 g ribos. Neviršyta 400 MPa normalinių įtempių riba, reikalaujama pagal CS–VLA reglamentą. Konstrukcija turi aukštą 3,9 atsargos koeficientą. Deformacijos siekė 6,62 mm. Klupimo deformacijos maksimumas siekė 1 mm. Pagal nerviūros klupimo rezultatus galima teigti, kad nerviūra nesuklups kritinės apkrovos atveju.

6.49 paveiksle palyginti stiklo pluošto ekvivalentinių, normalinių įtempių ir atsargos koeficiento kitimas, keičiantis nerviūros konstrukcijos elementų skerspjūvio storiui. 6.48 paveiksle, deformacijos ir nerviūros masės pokytis, keičiantis nerviūros konstrukcijos elementų skerspjūvio storiui.



6.49 pav. Stiklo pluošto optimizavimo rezultatai I



6.50 pav. Stiklo pluošto optimizavimo rezultatai II

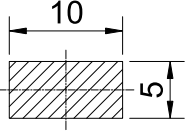
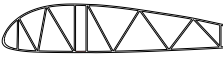
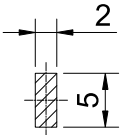
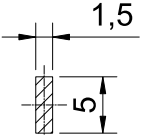
Stiklo pluošto pritaikymas nerviūros konstrukcijai, keičiant konstrukcijos strypelio stačiakampio profilio storį, leido pasiekti minimalią masę 76 g, kai visos nerviūros storis yra 2 mm. Nerviūros konstrukcijos elementų skerspjūvio storiui esant 2 mm, patirta 10,83 mm deformacija. 196,46 MPa normaliniai įtempiai, neviršijo 250 MPa įtempių ribos, nustatytos pagal CS–VLA reglamentą. Stiklo pluošto nerviūra turi aukštą 6 atsargos koeficientą. Klupdymo deformacija neviršijo 1 mm. Todėl galima teigti, kad iš 2 mm storio ir 5 mm aukščio skerspjūvio elementų sudaryta nerviūra yra atspari klupimui.

Optimizavimo uždavinys buvo įvykdytas. Apibendrinant gautus rezultatus, akivaizdu, kad šios medžiagos nerviūros gali būti konkurencingos. Kompozitinės nerviūros turi mažas masės reikšmes, atitinkamos CS–VLA keliamus reikalavimus sparno konstrukcijos elementams. Optimizuotos

konstrukcijos nerviūros turi aukštus atsargos koeficientus. Todėl konstrukcijas galima laikyti patikimomis.

6.11 lentelėje pateikta palyginamoji informacija lyginant pušies ir optimizuotų stiklo ir anglies pluoštų nerviūras.

6.11 lentelė. Medienos ir kompozito medžiagų nerviūrų palyginimas

Medžiaga	Nerviūros konstrukcijos elemento skerspjūvis	Nerviūros modelis	Sparno nerviūrų masė, kg	Nerviūros atsargos koeficientas	Maksimali deformacija, mm	Nerviūrų medžiagos kaina, €
Pušis			2,88	1,23	3,83	211
Stiklo pluoštas			2,43	6,0	10,83	28
Anglies pluoštas			1,41	3,9	6,62	161

Palyginamoji rezultatų lentelė atskleidė, kad sparno nerviūros skerspjūvio elementų optimizavimas, pritaikant kompozitinius anglies ir stiklo pluoštus, pagerino nerviūros charakteristikas. Pritaikant stiklo pluošto medžiagas vietoj 32 pušies sparno nerviūrų, galima sumažinti sparno nerviūrų konstrukcijos masę 15,5 % arba 0,45 kg. Atitinkamai anglies pluošto medžiagos leistų sumažinti sparno masę 51 % arba 1,47 kg. Stiklo ir anglies pluoštų nerviūros turi aukštesnį atsargos koeficientą, kuris leidžia įvertinti, kad šios medžiagos nerviūros konstrukcijoje yra saugesnės taikyti nei pušies nerviūros. Palyginus patiriamas deformacijas, anglies ir stiklo pluoštų nerviūros nusileidžia pušies nerviūrai, kas gali kelti abejonių kompozitinių medžiagų patikimumu, tačiau deformacijų skirtumai nėra dideli. Gauti išlaidų rezultatai medžiagoms parodė, kad mediena yra pati brangiausia medžiaga. Tačiau į šią kainą nėra įskaičiuoti nerviūros gamybos darbai, taikomi gaminant kompozitines ar medines nerviūras, kurie gali pakeisti galutinius gamybos kaštus. Vertinant medžiagų kainos rezultatus, pušies 1000 mm ilgio, 5 mm aukščio ir 10 pločio strypelio kaina: 1,65 €. Stiklo vienkrypčio pluošto kvadratinio metro kaina 5,16 €, sluoksnio storio 0,25 mm. Anglies vienkrypčio pluošto kvadratinio metro kaina 17,7 €, sluoksnio storis 0,1 mm.

Stiklo ir anglies pluošto nerviūrų strypelio skerspjūvio optimizavimo rezultatai patvirtino, kad inovatyvus anglies ir stiklo pluoštas gali būti pranašesnė medžiaga nerviūros konstrukcijoje nei

medienos medžiagos. Aukšti kompozitinio pluošto nerviūrų atsargos koeficientai, įrodo, kad kompozitinių medžiagų pritaikymas, pagal mechanines anizotropines savybes bei tinkamas nerviūros konstrukcijos strypelio skerspjūvio parametrų optimizavimas, gali duoti akivaizdžių sparno nerviūros tobulinimo rezultatų.

6.3 Skyriaus apibendrinimas

1. Nerviūros elementų skerspjūvio parametrų optimizavimas patvirtino, jog anglies ir stiklo pluoštas yra tinkamesnės medžiagos nerviūros konstrukcijai nei pušies mediena.
2. Gauti rezultatai formuluoja aiškią tendenciją, jog kompozitinės anglies pluošto medžiagos yra pažangi medžiaga, kurios pritaikymas nerviūros konstrukcijai, gali duoti apčiuopiamos naudos lėktuvo charakteristikoms gerinti.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad BEM yra patikimas metodas, tai patvirtina moksliniuose literatūros šaltiniuose pasiektos iki 10 % metodo paklaidos palyginus su realiais atliktais bandymais.
2. Atlikus BEM tikrinamąją analizę strypiniam elementui, palyginant analizinius sprendinius ir BE metodo rezultatus. Sprendinių paklaida neviršijo 5 % paklaidos. Nustatyta, kad BEM yra tinkamas kieto kūno struktūriniai analizei atlikti.
3. Apskaičiuota nerviūros pilnutinė apkrova, orlaiviui skrendant kruiziniu greičiu, esant didžiausiai neigiamai perkrovai, apkrova lygi 590 N ir didžiausiai teigiamai perkrovai, apkrova lygi 859 N.
4. Atlikta išsami nerviūros konstrukcijos analizė, tiriant medžiagų (struktūrinis plienas, aliuminis, fanera, pušis, stiklo pluoštas, anglies pluoštas) įtaką nerviūros charakteristikoms. Buvo nustatyta, kad kompozitinių medžiagų (anglies pluošto, stiklo pluošto) nerviūros rodo geriausias konstrukcijos charakteristikas, tačiau kompozitinės medžiagos yra nepakankamai išnaudojamos medienos konstrukcijos nerviūroje.
5. Kompozitinių medžiagų pritaikymas nerviūros konstrukcijai ir nerviūros strypelio skerspjuvio optimizavimas atskleidė, kad kompozitinės medžiagos, yra efektyvi priemonė mažinti lėktuvo sparno nerviūros masę, išsaugant reikalingą konstrukcijos atsargos koeficientą. Anglies pluošto medžiaga sparno nerviūrų masę leidžia sumažinti 1,47 kg arba 51 %, o stiklo pluošto medžiagos pritaikymas 0,45 kg arba 15,5 %.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Abodi, J. T. (2012). Elastic Buckling Of Plates Under In–Plane Patch Loading Using Finite Difference Method. *Journal of Kerbala University*. 10(2), 142–150. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/322055562_ELASTIC_BUCKLING_OF_PLATES;
- Acceptable means of compliance for very light aeroplanes*. (CS–VLA). (2008). Prieiga per Internetą: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/decision_ED_2003_18_RM.pdf;
- AIRCRAFT BASIC CONSTRUCTION*. (2000). Prieiga per internetą: http://home.iitk.ac.in/~mohite/Basic_construction.pdf;
- Aircraft Wood and Structure Repair*. (2017). Prieiga per internetą: <http://www.classicaviationdesigns.com/vdb/document/30>;
- Animhons, A., Maheswaran, N., Prabhu, M.S. and Sankaran, A. (2016). Static stress analysis of a wing bottom using Finite Element Method. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4(6), 114–119. Prieiga per internetą: <http://oaji.net/articles/2016/786–1482810713.pdf>;
- Bendsoe, M. P. and O. Sigmund. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer Verlag, Berlin;
- Chapter 6: The finite difference method*. (n.d). Prieiga per internetą: https://www.ljll.math.upmc.fr/frey/cours/UdC/ma691/ma691_ch6.pdf;
- Deformuojamo kūno mechanika*. (2010). Prieiga per internetą: http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Deform_kuno_mech.pdf;
- Difference Between Isotropic and Anisotropic*. (2017). Prieiga per internetą: <https://pediaa.com/difference-between-isotropic-and-anisotropic>;
- Dragonplate.com material specifications*. (2019). Prieiga per internetą: <https://dragonplate.com/Content/Images/uploaded/PDFs/DPSpecI-Beam.pdf>;
- Eves, J., Toropov. V. V., Thompson, M. H., Gaskell, P. H., Doherty, J. J. and Harris, J. C. (2009). Topology Optimization of Aircraft with Non–Conventional Configurations. *8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization Conference*, Universities of Leeds, Sheffield and York, UK. Prieiga per internetą: <http://eprints.whiterose.ac.uk/10474/>;

- Campbell, F. C. (2006). *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Kidlington, Oxford. Elsevier Inc. Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?hl=en&lr=&id=R7NHvVJf_ZEC&oi=fnd&pg=PP1&dq;
- Federal Aviation Administration. (2016). *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. Prieiga per internetą: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks;
- Filippini, G., Maliska C. R. and Vaz Jr, M. (2010). AN ELEMENT-BASED FINITE VOLUME METHOD FOR SOLID MECHANICS PROBLEMS. In *V European Conference on Computational Fluid Dynamic*. Lisbon, Portugal. Prieiga per internetą: http://www.sinmec.ufsc.br/site/arquivos/o-owpcrcyhnw_artigo_eccomas_2010.pdf;
- Garre, P. and Arjun, G. V. (2017). Modeling and Analysis of a RIBS and Spars of An Airplane Wing for Bending and Shear Loads. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 5(2), 295–315. Prieiga per internetą: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=6245;>
- Ghods, A. and Mir, M. (2014). Analysis of rectangular thin plates by using Finite Difference method, *Journal of Novel Applied Sciences*. 2014–3–3, 260–267. Prieiga per internetą: <http://jnasoci.org/wp-content/uploads/2014/03/260-267.pdf;>
- Grihon, S., Krog, L., Tucker, A. and Hertel, K. (2004). A380 weight savings using numerical structural optimization. In *Conference: AAAF Materials for Aerospace Applications 20th AAAF Colloquium*, Paris, France. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/259709151_A380_Weight_Savings_using_Numerical_Structural_Optimisation;
- Haibo, J. ir Qun, Z. (2013). Modified multilevel layout optimization method of composite wing structure. *Applied Science and Technology (IBACAST)*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/261059569_Modified_multilevel_layout_optimization_method_of_composite_wing_structure;
- Harakare, P. ir Heblikar, V. K. (2013). Evaluation of Static and Buckling load carrying capability of the Wing box through FEM approach. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 6–9. Prieiga per internetą: <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2013/09/Paper26-9.pdf;>
- Yuvaraj, S. R. and Subramanyam, P. (2015). Design and Analysis of Wing of an Ultralight Aircraft. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(8), 7456–7468. Prieiga per internetą: http://www.ijirset.com/upload/2015/august/141_Design.pdf.

- James, K. A., Kennedy, G. J. ir Martins R. R. A. (2014). Concurrent aerostructural topology optimization of a wing box. *Computers and Structures*, 134, 1–17. Prieiga per internetą: <https://experts.illinois.edu/en/publications/concurrent-aerostructural-topology-optimization-of-a-wing-box>;
- Johnson, Todd. (2019). *How Carbon Fiber Tubes Are Made*. Prieiga per internetą: <https://www.thoughtco.com/carbon-fiber-tubes-820389>;
- Juodis, J. ir Sankauskienė, T. (2009). *Medžiagų atsparumas, praktinių darbų aprašas*. Prieiga per internetą: http://asu.lt/wp-content/uploads/2015/02/ma_metod_su_turiniu.pdf;
- Kannan, T. and Veeranjanyulu, M. (2015). STRUCTURAL MODELING AND ANALYSIS OF COMPOSITE WING RIB USING FINITE ELEMENT METHOD. *IJESMR Journal*, 2(9), 20–41. Prieiga per internetą: <https://www.academia.edu/15607236>;
- Karidkar, S. and Patankar V. (2017). Finite Element Modeling and Simulation of Thin Wall Machining of Al 8011. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 10(1), 654–658. Prieiga per internetą: https://www.ripublication.com/irph/ijert_spl17/ijertv10n1spl_123.pdf;
- Katon, M., Rahman, N. and Manap, N. (2017). Theoretical and finite element method of static structural analysis at wing segment. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(15), 4491–4493. Prieiga per internetą: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6237.pdf;
- Katrnak, T. and Juračka, J. (2017). Topometry fem optimization of the wing structure of the transport aircraft. *Journal Aviation*, 21(1), 29–34. Prieiga per internetą: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16487788.2016.1266819>;
- Kim, S. and Park, Y. (1994). *An Improved Finite Difference Type Numerical Method for Structural Dynamic Analysis*. Prieiga per internetą: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:BdG82d6llbQJ>;
- Kong, Y.S., Abudullah, S., Omar, M.Z. and Haris, S. M. (2016). Topological and Topographical Optimization of Automotive Spring Lower Sea. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(7), 1388–1405. Prieiga per internetą: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1679-78252016000701388&script=sci_abstract;
- Kumar, D. and Sandipan R. (2018). Finite element analysis of aircraft wing using carbon fiber reinforced polymer and glass fiber reinforced polymer. In conference: *IOP Conference Series*

- Materials Science and Engineering*. 1–12. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/327781383>;
- Lasauskas, E. (2008). *Skrydžio principai. Mokomoji knyga*. Vilnius: Technika;
- Leary, J. M., Shidid, D. (2013). Topographic optimization with variable boundary conditions: Enabling optimal design of interacting components. *In proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design*, Seoul, Korea. 23–30. Prieiga per internetą:
<https://www.designsociety.org/publication/34639>;
- Limache, A. and Idelsohn, S. (2007). On the development of finite volume methods for computational solid mechanics. *Mecanica Computacional*, 26, 827–843. Prieiga per internetą:
<https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/1277/1218>;
- Limache, C. A. and Idelsohn, S. R. (2007). On The development of finite volume methods for computational solid mechanics. *VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, Buenos Aires, Argentina. Prieiga per internetą:
<https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/12.77/1218>;
- Mačiūnas, D. (2013). *Daugiakriteris globalus sijynų optimizavimas genetiniais algoritmais*. Vilnius, Technika 35–38 psl. Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1995595>;
- Matzaini, K., Norhanifah, A. R. and Norhashidah, M. (2017). Theoretical and Finite Element Method of Static Structural Analysis At Wing Segment. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 12(15), 4491–4493. Prieiga per internetą:
http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6237.pdf;
- Merkys, B. (2012). *Orlaivių konstrukcijos mokomoji knyga*. Vilnius: Technika;
- Mozumder, C. (2010). Topometry Optimization of Sheet Metal Structures for Crashworthiness Design Using Hybrid Cellular Automata. *Graduate Program in Aerospace and Mechanical Engineering*. Notre Dame, Indiana. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/profile/Chandan_Mozumder/publication/253811480;
- Onate, E. and Cervera, M. (2018). Finite volume format for structural mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(2), 181 – 201. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/227910912>;
- P.F.A. Engineering. (2005). *Flight envelope calculations*. Prieiga per internetą:
<https://www.lightaircraftassociation.co.uk/2010/Engineering/Design/flight%20envelopes.pdf/>;

- Peruru, S. P. and Abbisetti, S. B. (2017). DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF AIRCRAFT WING USING RIBS AND SPARS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 4(6), 2133–2139. Prieiga per internetą: <https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6417.pdf>;
- Rao, J., Kiran, S. and Chandra, S. (2008). *Topology Optimization of Aircraft Wing*. Prieiga per internetą: <https://www.altairatc.com/india/previous-events>;
- Rinku, A. and Ananthasuresh, G. K. (2015). Topology and size optimization of Modular ribs in Aircraft Wings. *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation*. Sydney, Australia. 1–6. Prieiga per internetą: http://web.aeromech.usyd.edu.au/WCSMO2015/papers/1218_paper.pdf;
- Rogers, J. M. (2018). *Finite Element Analysis of 3D Printed Aircraft Wing*. Portland State University, USA. Prieiga per internetą: <https://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=honorstheses>;
- Russell, J. B. (1996). *Performance and Stability of Airplane*. Centre for Aeronautics, City university, London. 1–21. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780340631706500037>;
- Sabbagh–Yazdi, S. R. and Bayatlou, M. (2015). Application of Finite Volume Method for Structural Analysis. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/268294496>;
- Sharma, R. and Garg, G. (2014). Design and Analysis of Wing Rib of Aircraft Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3(12), 17999–18005. Prieiga per internetą: [http://www.ijirset.com/upload/2014/december/33_Design%20\(1\).pdf](http://www.ijirset.com/upload/2014/december/33_Design%20(1).pdf);
- Skaičiuojamoji Mechanika (paskaitų konspektas)*. (n.d). Prieiga per internetą: http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Skaic_mech/Inziner_met/Teorija/;
- Stalnaker, J. J. and Harris C. E. (1997). *Structural Design in Wood, Plywood and Similar Wood Products*. Springer, Boston. Prieiga per internetą: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-4082-3_11;
- Sucharda, O. and Kubosek J. (2013). Analysing the Slabs by Means of the Finite Difference Method, *International Conference of Recent Advances in Applied and Theoretical Mathematics*. 268–274. Prieiga per internetą: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Budapest/MATH/MATH-38.pdf>;

- Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. Second edition. McGRAW-HILL BOOK COMPANY. Prieiga per internetą: http://cds.cern.ch/record/102847/files/0070858209_TOC.pdf;
- Ugural, A. C. (1999). *Stresses in Plates and Shells*. McGraw-Hills Books Co. Prieiga per internetą: <https://www.scribd.com/document/123359576/Ugural-Stresses-in-Plates-and-Shells>;
- Velmurugan, R. (n.d). *Composite Materials. Dept. of Aerospace Engg.* Indian Institute of Technology, Madras. Prieiga per internetą: <https://nptel.ac.in/courses/101106038/mod03lec02.pdf>;
- Vislavičius, K. (2000). *Medžiagų mechanika*. Vilnius: Technika;
- Wang, Y., Lui, L., Xing, Y., ir Yang, Z. (2017). Investigation of wing structure layout of aerospace plane based on the finite element method. *Advances in Mechanical Engineering*. 9(7), 1–9. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814017713701>;
- Wang, Q., Lu, Z. and Zhou, C. (2011). New topology optimization method for leading-edge ribs. *Journal of Aircraft*, 48(5):1741–1748. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/275844627_New_Topology_Optimization_Method_for_Wing_Leading-Edge_Ribs;
- Weisshaar, T., (2011). *Aerospace Structures – an Introduction to Fundamental Problems*. Purdue Universitetas: JAV;
- Williams, C. J. and Starke, A. E. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. Journal: *Acta Materialia*. 51(19), 5775–5799. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645403005020>;
- Wood in small aircraft construction. (2019). Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/aircraft-material>;
- Zhu, J., Zhang, W. and Xia, L. (2015). *Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design*. Archives of Computational Methods in Engineering, 23(4), 595–622. Prieiga per internetą: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-015-9151-2>.

PRIEDAI



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

PAŽYMĖJIMAS

2019 m. balandžio 4 d.
Vilnius

Simonas Rugys

dalyvavo

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
15-oje respublikinėje konferencijoje „Aviacija 2019“
ir skaitė pranešimą tema
Sparno nerviūros tyrimas skaitiniais metodais

Antano Gustaičio aviacijos instituto dekanas

dr. Justas Nugaras

Konferencijos mokslinio komiteto pirmininkas

doc. dr. Eduardas Lasauskas