



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Stogo medinių sijų stiprumo ir standumo tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Mantas Damašauskas

Projekto autorius

Lekt. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Panevėžys, 2023



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Stogo medinių sijų stiprumo ir standumo tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Integruotas projektavimo ir statybos valdymas (6211EX076)

Mantas Damašauskas

Projekto autorius

Lekt. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2023



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų fakultetas

Mantas Damašauskas

Stogo medinių sijų stiprumo ir standumo tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Mantas Damašauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Mantui Damašauskui**

Baigiamojo projekto tema *Stogo medinių sijų stiprumo ir standumo tyrimas*
(lietuvių kalba)

Baigiamojo projekto tema *Investigation of the Strength and Stiffness of Timber Roof Beams*
(anglų kalba)

Patvirtinta 2022 m. lapkričio 16 d. dekanų potvarkiu Nr.V25-13-30.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2023 m. sausio 4 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Ištirti vienbučio gyvenamojo karkasinio namo medinių stogo sijų (ne mažiau kaip 3-ių skirtingų tipų) stiprumą ir standumą. Tirti ne mažiau kaip 3-is skirtingo pavidalo/pobūdžio sijas. Tyrime panaudoti ne mažiau kaip 4-is visiems sijų pavidalams/pobūdžiams bendrus rodiklius, kurie turi įtakos sijų stiprumui ir standumui.

Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų rengimo metodinius reikalavimus.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su medinių stogo sijų stiprumu ir standumu.*
- 2. Nustatyti tyrime pasirinktų rodiklių įtaką sijų stiprumui ir standumui.*
- 3. Tarpusavyje palyginti nagrinėtų sijų stiprumus ir standumus.*

Vadovas

dr. Dainius Vaičiulis

(pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Mantas Damašauskas

(studento vardas, pavardė)

2022 m. lapkričio 22 d.

Damašauskas, Mantas. Stogo medinių sijų stiprumo ir standumo tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas / Doc. Dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): statybos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: medinės sijos, klijuotos medienos sijos, dvitėjinės medinės sijos, sijų stiprumo ir standumo tyrimas.

Panevėžys, 2023. 56 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro darbe apžvelgiami mokslininkų tyrimų rezultatai apie pjautinės medienos, klijuotos medienos ir 2T-sijos sijų stiprumą ir standumą, jų elgsena veikiant apkrovoms, medienos rūšies ir kilmės įtaką medinėms sijoms, jų stiprumui ir standumui.

Baigiamajame darbe naudojama programinė įrangą *Autodesk RSA*. Pasirinkta programinė įranga apskaičiuoti konstrukcijų stiprumui ir standumui naudoja baigtinių elementų metodą. Darbe bus apskaičiuojama dviatramių sijų stiprumas ir standumas, tarpusavyje lyginamos pjautinės medienos, klijuotos medienos, 2T-sijos, lyginamas jų stiprumas ir standumas esant saugos ir tinkamumo ribiniams būviams pagal „Eurokodas 5“ (EN 1995-1-1:2005). Medinės sijos veiks vienoda apkrova. Nuolatinė apkrova – stogo atitvaros detalė, įvertinus detalės svorius, apskaičiuota sijoms apkrova $0,647 \text{ kN/m}^2$. Skaičiuojant sniego apkrovą pagal EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“ pasirinktas I rajonas, kuriame sniego apkrova yra $1,20 \text{ kN/m}^2$, vietovės topografinė charakteristika – apsaugota, vieta, kurioje nagrinėjami statiniai yra aiškiai žemesni už supančią vietovę arba supančius medžius ir (arba) supančius aukštesnius statinius. Kadangi projektuojamo pastato stogas priimamas kaip neeksplotuojamas, darbe priskiriama, kad stogo naudojimo kategorija bus H – neprieinamieji stogai, išskyrus normalią priežiūrą (EN 1991-1:2004 „Eurokodas 1“, 2011), tokiu atveju stogo naudojimo apkrova pagal priskirtą stogo naudojimo kategoriją yra $0,40 \text{ kN/m}^2$. Vėjo apkrovai pagal EN 1995-1-4:2005 „Eurokodas 1“ pasirinktas I vėjo apkrovos rajonas, oro tankis $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Pagal vėjo apkrovos rajoną, pagrindinio vėjo greičio reikšmė $v_{b,0} = 24 \text{ m/s}$, vietovės kategorija – III (ruožai, ištisai apaugę augalija arba užstatyti pastatais, arba atskiromis kliūtimis, nutolusiomis vienos nuo kitų mažiau nei 20 kliūčių aukščių (pvz., kaimai, priemiestinės vietovės, nuolatinis, ištisas miškas)), priimama, kad pastatas dislokuotas ne kalnuotoje vietovėje, vėjo apkrova bus skaičiuojama priešvėjinė ir pavėjinė. Sijų stiprumas ir standumas bus lyginamas veikiant aukščiau išvardintoms apkrovoms, keičiant konstrukcijų tarpatramį, plotį, aukštį, sijų žingsnį, taip pat lyginamos sijos pagal skerspjūvio plotą ir svorį, gauti rezultatai atvaizduojami grafikuose.

Damašauskas, Mantas. Investigation of the Strength and Stiffness of Timber Roof Beams. Master's Final Degree Project supervisor Doc. Dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technology and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): civil engineering, technological sciences (engineering sciences).

Keywords: wooden beams, glued wood beams, composite glued (I-beam) type beam, study of the strength and rigidity of the beams.

Panevėžys, 2023. 56 pages.

Summary

The final master's thesis reviews the results of the researchers' research on the strength and stiffness of sawn timber, glued timber and 2T-beam beams, their behavior under loads, the influence of wood type and origin on wooden beams, their strength and stiffness.

Autodesk RSA software is used in the thesis. The selected software uses the finite element method to calculate the strength and stiffness of structures. The work will calculate the strength and stiffness of two-support beams, compare sawn timber, glued timber, 2T-beams, compare their strength and stiffness at safety and suitability limit states according to „Eurocode 5“ (EN 1995-1-1:2005). The wooden beams will act under a uniform load. Permanent load - part of the roof partition, after considering the weights of the part, the calculated load for the beams is 0.647 kN/m^2 . When calculating the snow load according to EN 1991-3:2003 „Eurocode 1“, the 1st district is selected, where the snow load is $1,20 \text{ kN/m}^2$, the topographical characteristic of the area is protected, the place where the structures in question are clearly lower than the surrounding area or surrounding trees and/or surrounding taller structures. Since the roof of the designed building is accepted as non-operational, the work assigns that the roof use category will be H - inaccessible roofs, except for normal maintenance (EN 1991-1:2004 „Eurocode 1“, 2011), in which case the roof use load according to the assigned roof use category is 0.40 kN/m^2 . For wind load according to EN 1991-1-4:2005 „Eurocode 1“, the 1st wind load district is selected, air density $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$. According to the wind load district, the value of the main wind speed $v_{b,0} = 24 \text{ m/s}$, terrain category - III (sections completely covered with vegetation or blocked by buildings or separate obstacles, separated from each other by less than 20 obstacle heights (eg., villages, suburban areas, permanent, whole forest)), it is assumed that the building is located in a non-mountainous area, the wind load will be calculated upwind and downwind. The strength and stiffness of the beams will be compared under the above-mentioned loads, by changing the structure span, width, height, pitch of the beams, as well as comparing the beams according to the cross-sectional area and weight, the obtained results are displayed in the graphs.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Mokslinės literatūros analizė.....	12
1.1. Klijuotos medinės sijos stiprumas	12
1.2. Dvitėjinės medinės (I – beam) tipo sijos	15
1.3. Pjautinės medienos sijos.....	22
2. Tiriamoji dalis.....	27
2.1. Skaičiuojamasis modelis.....	27
2.2. Skaičiuojamos apkrovos.....	28
2.3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	34
Išvados	51
Literatūros sąrašas	52
Priedai.....	55
1 priedas. 2T-sijos išnaudojimo schema, kai apkrovos vertinamos sijos viduryje.....	55
2 priedas. 2T-sijos išnaudojimo schema, kai apkrovos vertinamos sijos galuose.....	55
3 priedas. Pjautinės ir klijuotos medinės sijos schema, kai apkrovos vertinamos sijos viduryje...	56
4 priedas. Pjautinės ir klijuotos medinės sijos schema, kai apkrovos vertinamos sijos galuose....	56

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Klijuotinės medienos MOR ir MOE bandymų rezultatai.....	14
2 lentelė. Suskaičiuotos ir faktinės reikšmių palyginimas (Lokaj & Klajmonová, 2017, p. 273)	18
3 lentelė. Dvitėjinių sijų tamprumo modulio (EM) ir atitinkamo lentynos neardomojo tamprumo modulio vertės (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 362)	19
4 lentelė. Sijos defektacija vadovaujantis standartu (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 366).....	21
5 lentelė. Hipotetinių sijų, pagamintų tik iš medžio masyvo, lyginamieji matmenys ir keliamoji galia, kad atlaikytų tą pačią apkrovą kaip ir bandomosios dvitėjinės sijos	21
6 lentelė. JK ir Airijos medienos stiprumo klasės (Ridley-Ellis, Gil-Moreno, & Harte, 2022).....	23
7 lentelė. Tiesinių modelių determinacijos koeficientai R^2 ir statistinis reikšmingumas (p reikšmė), kai nulinė hipotezė yra ta, kad aiškinamasis kintamasis neturi įtakos atsako kintamajam (Gil Moreno et al, 2022, p.590)	24
8 lentelė. Medienos stiprumo klasė ir susiję parametrai (Medžio bitės, (n.d.))	26
9 lentelė. Tyrimo ir teorinis deformacijos momentai (Fiorelli & Dias, 2003).....	26
10 lentelė. Apkrovų veikimo trukmės klasės	28
11 lentelė. sijų nuolatinės apkrovos surinkimas.....	29
12 lentelė. Stogo atitvaros svoris. Įvertinus sijų žingsnį	29
13 lentelė. Sniego apkrova, įvertinus sijų žingsnį	30
14 lentelė. Stogo naudojimo apkrova, įvertinus sijų žingsnį	30
15 lentelė. Vėjo apkrovos, kai vėjas pučia skersai pastato ($q_p(z_e) = 0,461 \text{ kPa}$).....	33
16 lentelė. Vėjo apkrova įvertinus sijų žingsnį	33
17 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos aukščio.....	35
18 lentelė. Sijų skaičiuotinių, stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos pločio.....	37
19 lentelė. Sijų skaičiuotinių įrašų, stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos ilgio/tarpatramio	40
20 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto	42
21 lentelė. 2T-Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio	44
22 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos žingsnio	46
23 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos svorio.....	48

Paveikslų sąrašas

1 pav. Lenkimo bandymo schema ((Kazeroon, Ahmad, & Bkhari, 2016, p. 864)	13
2 pav. 100 ir 130 mm pločio klijuotų sijų apkrovos ir deformacijos (įlinkio)grafikas (Kazeroon, Ahmad, & Bkhari, 2016)	14
3 pav. Tuopos (Po), pušies ir tuopos (PiPo) ir pušies (Pi) sijų spaudimo jėgos ir deformacijų kreivės (Timbolmas, Bravo, Rescalvo, & Gallego, 2022, p. 8)	15
4 pav. Dvitėjinė sija (ASA.lt, 2021).....	16
5 pav. Dvitėjės sijos laboratorinis bandymas (Lokaj & Klajmonová, 2017, p. 272).....	17
6 pav. Keturių taškų lenkimo testavimo grafikas ir programinės įrangos sąsaja, rodanti apkrovos ir deformacijos kreives (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 361).....	19
7 pav. Trijų tirtų dvitėjinių sijų tipų lenkimo savybių vidurkis ir standartinis nuokrypis	20
8 pav. Tyrimo ruošiniai (Ghanbari-Ghazijahani, Russo, & Valipour, 2020, p. 4).....	22
9 pav. Ryšys tarp E_{dyn} ir stiprio įtemptiant bei lenkiant (Gil Moreno et al, 2022, p.590).....	25
10 pav. Stogo sijos modelis sudarytas Autodesk RSA terpėje, kai vėjo apkrova - priešvėjinė.....	27
11 pav. Stogo sijos modelis sudarytas Autodesk RSA terpėje, kai vėjo apkrova - pavėjinė.....	28
12 pav. Medinių sijų sutartiniai žymėjimai.....	28
13 pav. Stogo, veikiamo vėjo apkrovos, sričių raidinis žymėjimas pagal LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“	33
14 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos aukščio	36
15 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo išnaudojimo priklausomybė nuo sijos aukščio	36
16 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos pločio	38
17 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos pločio	39
18 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo ilgio	40
19 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos ilgio	41
20 pav. Sijų skaičiuotinių įlinkių ir leistinų priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto	43
21 pav. Sijų skaičiuotino stiprumo ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto.....	43
22 pav. 2T-Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio.....	45
23 pav. 2T-Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio	45
24 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos žingsnio.....	47
25 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos žingsnio.....	47
26 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos svorio	49
27 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos svorio	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

MOR – trūkimo modulis;

MOE – tamprumo modulis;

KKM / KVH – konstrukcinė mediena – su tiksliai apibrėžtomis gaminio savybėmis, gaminys iš spygliuočių medienos;

I-beam – dvitėjos medinės sijos, kurios gaminamos su medinėmis lentynomis ir jungiamąja OSB siennele;

OSB – OSB plokštės yra plačiai naudojama universali inžinerinės medienos plokštė, gaminama naudojant vandeniui atsparius karščiui kietėjančius klijus ir stačiakampio formos medienos pluoštus, išdėstytus kryžminiais sluoksniais;

Fanera – lakštinė klijuotos medienos medžiaga (medienos lukšto sluoksniuotis), kurios visi ar beveik visi sluoksniai yra lygiagretūs medienos lukšto sluoksniai.

Ivadas

Šiame projekte bus nagrinėjama viena pagrindinių pastato dalių – stogo sijos. Stogo sijos dažniausiai būna medinės. Sijos pagaminamos pagal projektuotojo arba konstruktoriaus nurodytus matmenis, kurie nustatomi atliekant konstrukcinius skaičiavimus.

Vienas iš paprasčiausių medienos gaminių – pjautinė medinė sija. Ji gaunama išilgai pjaustant rąstus. Klijuotos medienos sijos suklijuojamos iš mažų, vienodos stiprumo klasės medienos gabaliukų. Pastaruoju metu vis plačiau naudojamos sudėtinės sijos. Dažniausiai sutinkamas tokios sijos pavyzdys yra dvitėjinė sija (angl. *I-beam*). Toliau tokias sijas žymėsime kaip „2T-sija“. 2T-sijos gaminamos iš dviejų skirtingų medžiagų: sijos viršuje ir apačioje komponuojami mediniai tašeliai, o tarp jų dedama OSB plokštė.

Matome, kad net medinės sijos gali būti gana įvairios. Praktiniam medinių sijų naudojimui svarbu žinoti kaip sijos stiprumas ir standumas priklauso nuo medinių sijų tipo.

Tyrimo objektas – stogo medinės sijos.

Tiriamos individualaus namo skirtingos medinės stogo sijos, sijos bus veikiamos vienoda nuolatine apkrova $0,647 \text{ kN/m}^2$. Projekte bus vertinamos skirtingos stogo sijos naudojant skirtingą sijų aukštį, plotį, skerspjūvio plotą, ilgį, svorį, sijų žingsnį, bei patikrinama 2T-sijos stiprumo ir standumo priklausomybė nuo sienelės storio. Stogo medinių sijų stiprumas bus vertinamas pagal LST-EN 1995 Eurokodas 5: Medinių konstrukcijų projektavimas.

Tyrimų tikslas – atlikti stogo medinių konstrukcijų – sijų efektyvumo vertinimą.

Darbo uždaviniai:

1. išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su medinių stogo sijų stiprumu ir standumu.
2. nustatyti tyrime pasirinktų rodiklių įtaką sijų stiprumui ir standumui.
3. tarpusavyje palyginti nagrinėtų sijų stiprumus ir standumus.

Tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, analitiniai skaičiavimo metodai, baigtinių elementų metodas (BEM), lyginamoji analizė.

Autoriaus publikuotas straipsnis: DAMAŠAUSKAS Mantas; VAIČIULIS, Dainius. Pjautinės ir klijuotos medinių stogo sijų stiprumo palyginimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2022: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2022 m. lapkričio 25 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 2538-8045. 2022.

Baigiamojo projekto sudėtis ir apimtis. Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, lentelių ir paveikslukų sąrašai, santrumpų ir terminų sąrašas, įvadas, du skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir keturi priedai. Projekto aiškinamojo rašto apimtis 54 p., kuriame yra 27 paveikslai ir 23 lentelės, priedo apimtis 2 p.

1. Mokslinės literatūros analizė

1.1. Klijuotos medinės sijos stiprumas

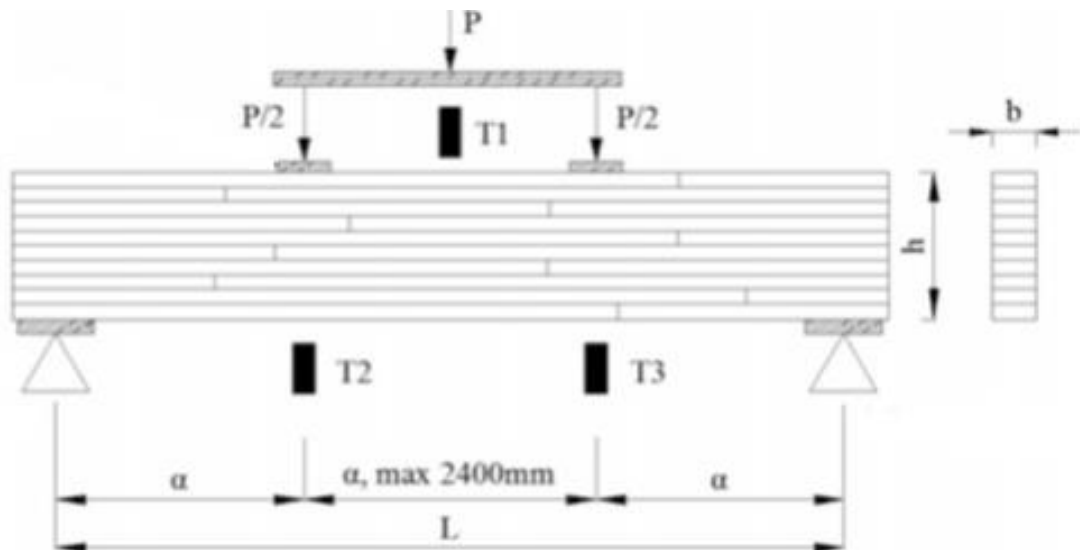
Klijuotinė mediena yra struktūrinių medienos gaminių tipas, apimantis daugybę sluoksnių, sujungtų su patvariais, drėgmei atspariais konstrukciniais kljais. Klijuotinė mediena turi daugybę privalumų lyginant su masyvia pjautine mediena (Sciomenta, et al., 2022; Vida, Lukacevic, Eberhardsteiner, & Füssl, 2022). Sujungus mažus medienos komponentus galima pagaminti didesnio skerspjūvio, didesnio ilgio gaminį, kuris kai kuriais atvejais tampa architektūriniu sprendimu, paliekant kaip dekorą elementą. Kaip nurodo Ong'as (2015) mediena gali būti naudojama gaminant konstrukcinius gaminius, kurie yra tvirtesni už plieną ir betoną, skaičiuojant stiprumo ir svorio santykį. Tai patvirtina ir Tuhkanen'as, Mölder'as, & Schickhofer'as (2018) pabrėždami ne tik galimybę geriausiai išnaudoti medienos savybes, bet ir panaudoti kaip dekorą elementą. Be to, pastebima, kad šio tipo mediena pasižymi geresnėmis stiprumo ir standumo savybėmis (Fink, Kohler, & Frangi, 2013; Vahedian, Shrestha, & Crews, 2019; Hassan, Abdulahad, & Emad, 2022), o taip pat pasižymi mažu jautrumu vibracijai bei aukšta garso izoliacija (Du, Hu, Xie, & Meng, 2021; Du, Hu, Han, & Shi, 2021). Mažas jautrumas vibracijai aktualus seisminėse zonose esantiems pastatams, kurių statyboje naudota mediena. Kaip pažymi Ding'as, Zhou'as, Huang & Si (2021) klijuotinės medienos naudojimo atveju padaroma mažesnė ir atskirais atvejais pataisoma žala pastatams ar atskiroms konstrukcijoms.

Klijuotinės medienos naudojimas Europoje siejamas su 1826 m. Pirmiausiai šią technologiją pritaikė Didžiosios Britanijos, Prancūzijos, Vokietijos ir kitų šalių inžinieriai dirbantys su tiltų, stadionų ir kupolo konstrukcijomis (Bakar, Saleh, & Mohamed, 2004). Ypatingai daug mokslinės produkcijos šia tema yra paskelbę Japonijos mokslininkai (Ido, Miyatake, Hiramatsu, & Miyamoto, 2022; Okamoto, Akiyama, Araki, Aoki, & Inayama, 2022).

Tyrimai atskleidžia (Brandner & Schickhofer, 2014; Bhkari, Bakar, Tahir, & Ahmad, 2012), kad bandinių be defektų atsparumas tempimui stipriai mažėja didėjant bandinių ilgiui. Tyrimų metu gauta, kad stiprumas priklauso nuo skerspjūvio ploto, o ne nuo tarpatramio ilgio. Bandinių stiprumas lenkimo metu sumažėjo dėl bandinių dydžio (Brandner & Schickhofer, 2014).

Schneeweiß'as & Felber'as (2013) tirdami skirtingo ilgio sijas, nustatyta, kad ilgesnių sijų stiprumo lenkimui vertės yra didesnės. Šie autoriai tyrė 343 ir 210 Douglas eglės sijų ilgio įtaką stiprumui. Bandymai atlikti veikiant centrinei taškinei apkrovai. Esant tarpatramio ilgiui atitinkamai 36 ir 46 mm, nustatė vidutines lenkimo stiprumo vertes, atitinkamai 91,4 ir 92,1 N/mm². Anot Kazeroon'o ir kt. (2016), lenkimo stipris paprastai mažėja didėjant tarpatramio ilgiui, kuris nepriklauso nuo apkrovos konfigūracijos.

Kazeroon'as, Ahmad'as, & Bkhari (2016) tyrime naudojo medieną pagamintą Malaizijos gamykloje laikantis tos šalies standartų. Tyrime naudota Mengkulang (*lot. Heritiera spp.*) mediena. Testavimui pasirinktos skirtingo ilgio (6 – 12 m ilgio), pločio (100 ir 130 mm) ir storio (300 – 600 mm) klijuotinės sijos (žr. 1 lentelę). Tyrimo metu nustatyta tarpatramių ilgių įtaka klijuoto pluošto stiprumui lenkiant (žr. 1 pav.). Tyrimo metu buvo naudojama 1 000 kN dviejų taškų apkrova. Tyrimui atlikti pasirinkta universali testavimo mašina (UTM). Deformacija buvo matuojama bandymo mašinos, judančios kryžminės galvutės judesiu, naudojant tiesinio kintamo diferencialinio transformatoriaus (LVDT) keitiklį. Visi bandymai buvo atliekami tol, kol sijos visiškai lūžta.



1 pav. Lenkimo bandymo schema ((Kazeroon, Ahmad, & Bkhari, 2016, p. 864)

Lenkimo savybės, trūkimo modulis (MOR) ir elastingumo modulis (MOE) apskaičiuojami atitinkamai naudojant (1) ir (2) formules:

$$\text{MOR} = (P_{\max}L)/(bh^2) \quad (1)$$

$$\text{MOE} = Pa(3L^2 - 4a^2) / (4\Delta bh^3) \quad (2)$$

Formulėse:

$P_{\max}$ – maksimali sijos apkrova

h – sijos storis

b – sijos plotis

L – sijos ilgis

a – atstumas nuo reakcijos iki artimiausio apkrovos taško (1/2 šlyties intervalo)

Δ – sijos neutralios ašies įlinkio padidėjimas, išmatuotas per vidurį,

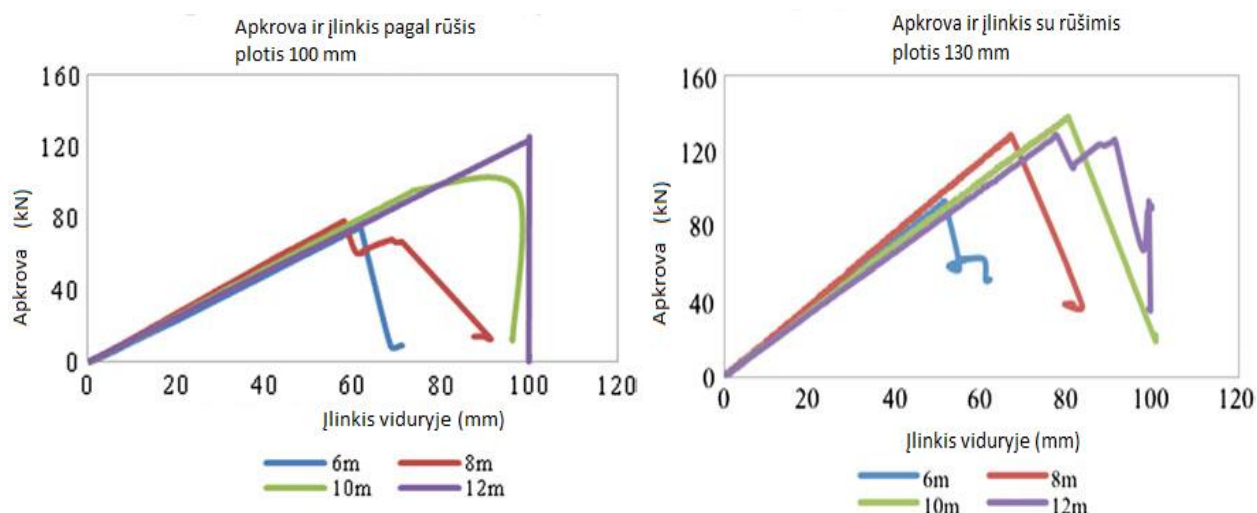
P – taikomos apkrovos padidėjimas žemiau proporcingos ribos.

1 lentelės duomenys atskleidžia, kad skirtingų skerspjūvių klijuoto sijų stiprio lenkimo arba trūkimo modulio (MOR) pokyčiai buvo nedideli. Tačiau vis tiek galima pastebėti, kad didėjant skerspjūviui MOR didėja. Palyginus tarpatramio ilgių poveikį MOR, buvo nustatyta, kad MOR mažėja didėjant tarpatramio ilgiui. Iš tamprumo modulio rezultatų matyti, kad MOE vertės šiek tiek pagerinamos padidinus tarpatramio ilgį.

1 lentelė. Klijuotinės medienos MOR ir MOE bandymų rezultatai

Sijos ilgis (m)	Matmenys (mm)		MOR		MOE	
	Plotis, b	Storis, h	Vidurkis (N/mm ²)	SN	Vidurkis (N/mm ²)	SN
6	100	300	47,6	5,62	14751,6	499
	130	300	42,7	2,76	16967,3	876
8	100	400	36,6	8,16	16974	717
	130	400	46,9	7,78	18032	498
10	100	500	28,8	5,47	17276,5	435
	130	500	35,8	7,45	17044,4	365
12	100	600	29,3	7,9	16160,5	1663
	130	600	34,9	7,44	17350,2	84,9

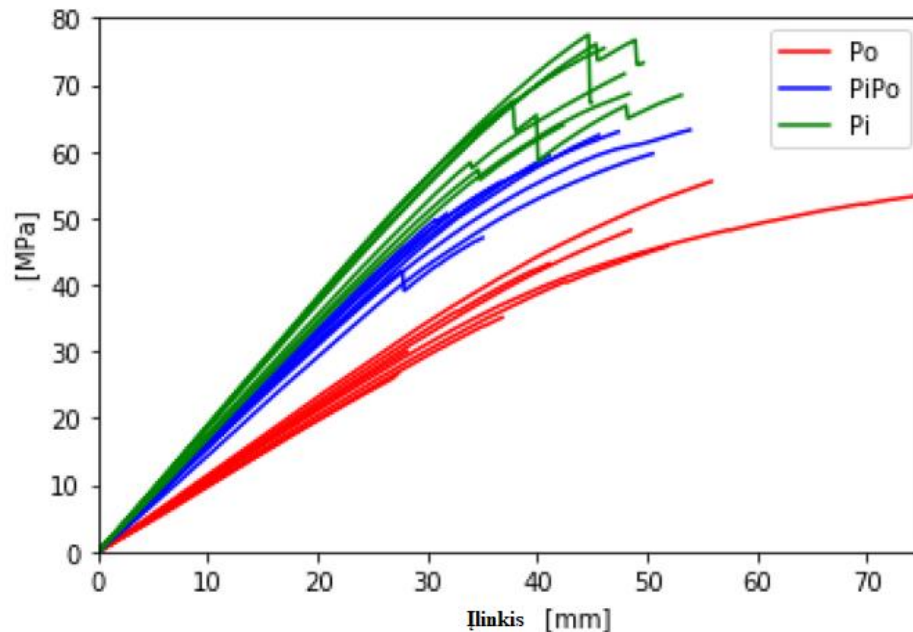
Apkrovos ir deformacijos (įlinkio) grafikai priklausomai nuo sijos pločio pateikiami 2 ir 3 paveikslė.



2 pav. 100 ir 130 mm pločio klijuotų sijų apkrovos ir deformacijos (įlinkio)grafikas (Kazeroon, Ahmad, & Bkhari, 2016)

Aptardami tyrimo rezultatus, tyrimo autoriai nurodo, kad dažniausia lūžio vieta skiriasi nuo tos vietos, kurioje buvo klijuota. Įtrūkimai formuojasi įtempimo zonos apačioje ir progresuoja silpniausio medienos taško link.

Panašus ir Ispanijos mokslininkų (Timbolmas, Bravo, Rescalvo, & Gallego, 2022) tyrimas. Tyrime naudota tuopos, pušies ir tuopos bei pušies klijuotinės medienos sijos. Gauti rezultatai pateikiami 3 paveikslė.

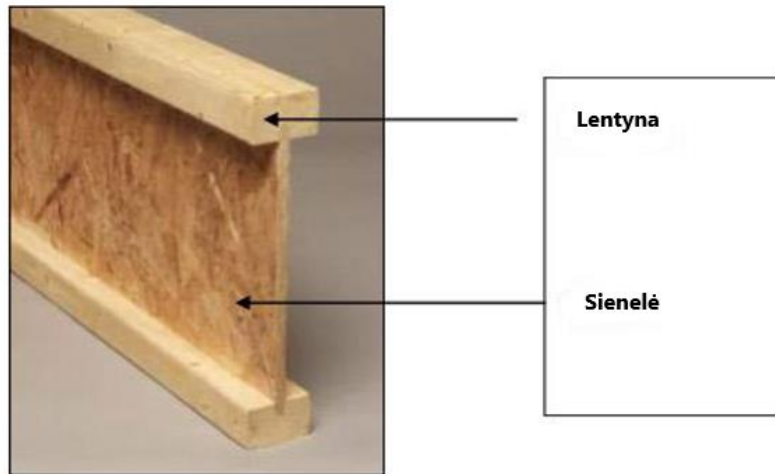


3 pav. Tuopos (Po), pušies ir tuopos (PiPo) ir pušies (Pi) sijų spaudimo jėgos ir deformacijų kreivės (Timbolmas, Bravo, Rescalvo, & Gallego, 2022, p. 8)

Paveikslo duomenys atskleidžia, kad pušinės sijos yra stipresnės (standesnės) nei tuopos, nurodomas skirtumas siekia apie 79 %. Konstatuojama, kad pušis yra labiau tinkama kaip konstrukcinė mediena, lyginant su tuopos. Kita vertus, derinant šias dvi skirtingas medienos rūšis pasiekiamas artimas pušiai rezultatas. Kaip nurodo tyrimo autoriai, tuopa yra tinkama medžiaga formuojant klijuotinės medienos sijas sudaranti sąlygas pasiekti sijos lengvumą ir neprarandant stiprumo bei elastingumo savybių.

1.2. Dvitėjinės medinės (I – beam) tipo sijos

Dvitėjinės formos sijų inžinerinė koncepcija susideda iš dviejų dalių: sienelės ir lentynos (žr. 4 pav.). Sienelė yra dalis, atsakinga už atsparumą šlyties įtempiams ir gali būti pagaminta iš faneros, orientuotos medienos drožlių plokštės arba medienos plaušų plokštės. Be to, sienelė yra labai svarbi, nes ji atsakinga už sijos inercijos momento gerinimą (Porteous, 2015). Lentynai, pritvirtinti prie juostos naudojant vandeniui atsparius ir patvarius klijus, yra viršutinėje ir apatinėje dvitėjinės sijos vietose. Lentynos yra atsakingos už atsparumo gniuždymą (viršuje) ir įtempimo (apačios) įtempiams. Dvitėjinių sijų panaudojimo metu būtent šiose pozicijose susikoncentruoja didžiausi įtempių lygiai. Šioms pozicijoms dažniausiai naudojama medžio masyvo arba konstrukcinė kompozicinė mediena (KKM), kuri turi pakankamai tvirtumo ir standumo, kad atlaikytų šiuos didelius įtempių lygius (Del Menezzi & Souza, 2012).



4 pav. Dvitėjinė sija (ASA.lt, 2021)

Dvitėjinės medinės sijos yra alternatyva įprastoms medienos masyvo sijoms. Lietuvoje ši „naujovė“ įsitvirtina gana sunkiai (ASA.lt, 2015), nors šio tipo sijos turi keletą esminių privalumų:

- jos yra lengvesnės nei medžio masyvo sijos, todėl montuojant nereikia papildomos kėlimo technikos, priklausomai nuo ilgio jas lengvai pakelia vienas ar du žmonės;
- pasižymi didele laikomąja galia, o tai leidžia didinti atstumą tarp atramų;
- labiau atsparios aplinkos poveikiui, nesideformuoja, išlieka stabilios;
- lyginant su medžio masyvu yra tvirtesnės, atlaikančios didesnes lenkimo ir gniuždymo jėgas;
- dėl daug mažesnio medienos ploto susidaro minimalūs šilumos tilteliai;
- dėl savo formos, šios sijos tinkamos laidams paslėpti;
- atskirais atvejais gali tarnauti kaip dekoro elementas;
- mažesnė kaina lyginant su medžio masyvo sijomis.

Lokaj‘as & Klajmonová (2017) bandymo metu naudojo dvitėjines sijas, kurių lentyna iš KVH, o tarpe OSB plokštė. Atlikti bandymai su šiais matmenimis:

- sijos aukštis: 200 ir 300 mm;
- lentynos plotis 47 ir 72 mm;
- lentynos aukštis visais atvejais 47 mm.
- gaminio ilgiai – 3,6 ir 5,4 m;

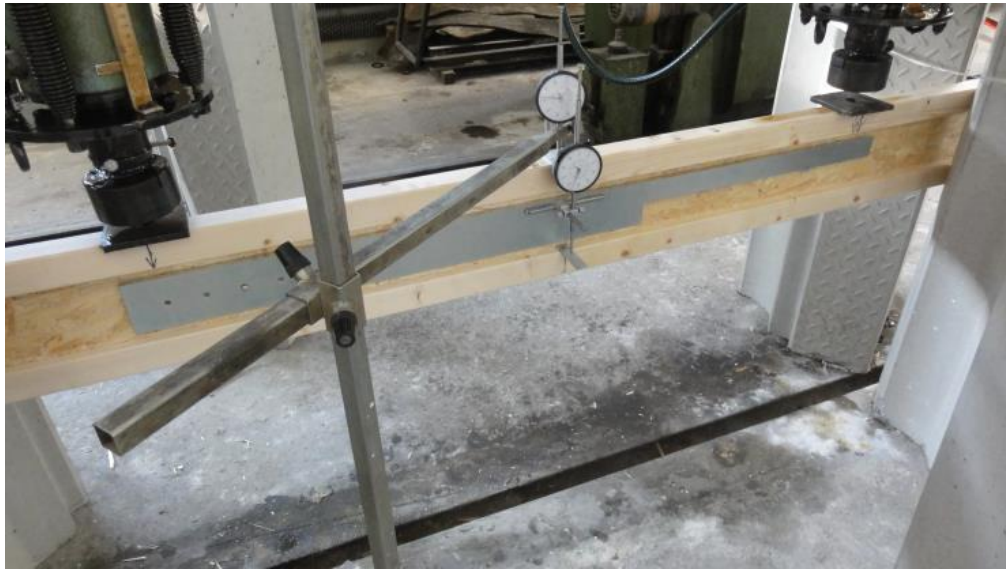
Iš viso bandyti 36 gaminiai:

- 10 gaminių, kurių aukštis 200 mm, lentynos matmenys 72 x 47 mm
- 10 gaminių, kurių aukštis 200 mm, lentynos matmenys 47 x 47 mm
- 9 gaminiai, kurių aukštis 300 mm, lentynos matmenys 72 x 47 mm
- 7 pavyzdžiai, kurių aukštis 300 mm, lentynos matmenys 47 x 47 mm

Bandymo metu atliktas standartinis lenkimas pagal ČSN EN 408 standartą (žr. 5 pav.).

Palyginimui su galiojančiais Europos standartais atliktas dvitėjinės sijos atsparumo lenkimui skaičiavimas. Projektavimo metodas pagrįstas linijinio tamprumo teorija ir tokiomis prielaidomis: sijos yra tiesiog atramos; atskiros dalys (medžio, medienos plokščių) yra arba per visą ilgį, arba pagamintos su klijuotomis galinėmis jungtimis; apkrova veikia z kryptimi, todėl momentas $M = M(x)$, kintantis sinusiškai arba parboliškai, ir šlyties jėga $V = V(x)$. Taip pat numatoma, kad lipni jungtis

tarp lentynų ir juostos yra pakankamai standi. Materialiai skirtingas skerspjūvis, kurį galima idealizuoti vienalyčiame skerspjūvyje per tamprumo modulio E santykį ir deformacijos koeficientus k_{def} .



5 pav. Dvitėjės sijos laboratorinis bandymas (Lokaj & Klajmonová, 2017, p. 272)

Efektinio skerspjūvio charakteristikos nustatomos taip:

$$A_{eff} = 2 \cdot A_f + A_w \cdot \left(\frac{E_w}{E_f} \right) \left(\frac{1+k_{def,f}}{1+k_{def,w}} \right) \quad (3)$$

formulėje:

A_{eff} – efektyvus skerspjūvio plotas;

A_f, A_w – lentynos skerspjūvio plotas; OSB skerspjūvio plotas;

E_f, E_w – lentynos elastingumo modulis; OSB elastingumo modulis;

$k_{def,f}, k_{def,w}$ – lentynos deformacijos koeficientas, OSB deformacijos koeficientas.

efektyvusis dvitėjinės sijos skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_{y,eff} = I_f + I_w \cdot \left(\frac{E_w}{E_f} \right) \left(\frac{1+k_{def,f}}{1+k_{def,w}} \right) \quad (4)$$

formulėje:

$I_{y,eff}$ – efektyvus inercijos momentas

I_f, I_w – lentynos skerspjūvio plotas; OSB skerspjūvio plotas

E_f, E_w – lentynos elastingumo modulis; OSB elastingumo modulis

$k_{def,f}, k_{def,w}$ – lentynos deformacijos koeficientas, OSB deformacijos koeficientas

Atsparumo momentas nustatomas pagal ribinį išorinių lentynos pluoštų, lentynos vidurio ir išorinių juostos pluoštų įtempimą. Tų trijų apskaičiuotų verčių minimali reikšmė buvo pasirinkta kaip dvitėjinės sijos atsparumo lenkimui momentas.

Laboratoriniai dvitėjinių sijų bandymai demonstruoja gerą sijų atsparumą lenkimui. Sujungimo vietoje sija nebuvo pažeista. Matavimų ir skaičiavimų rezultatų palyginimas pateikiamas 2 lentelėje.

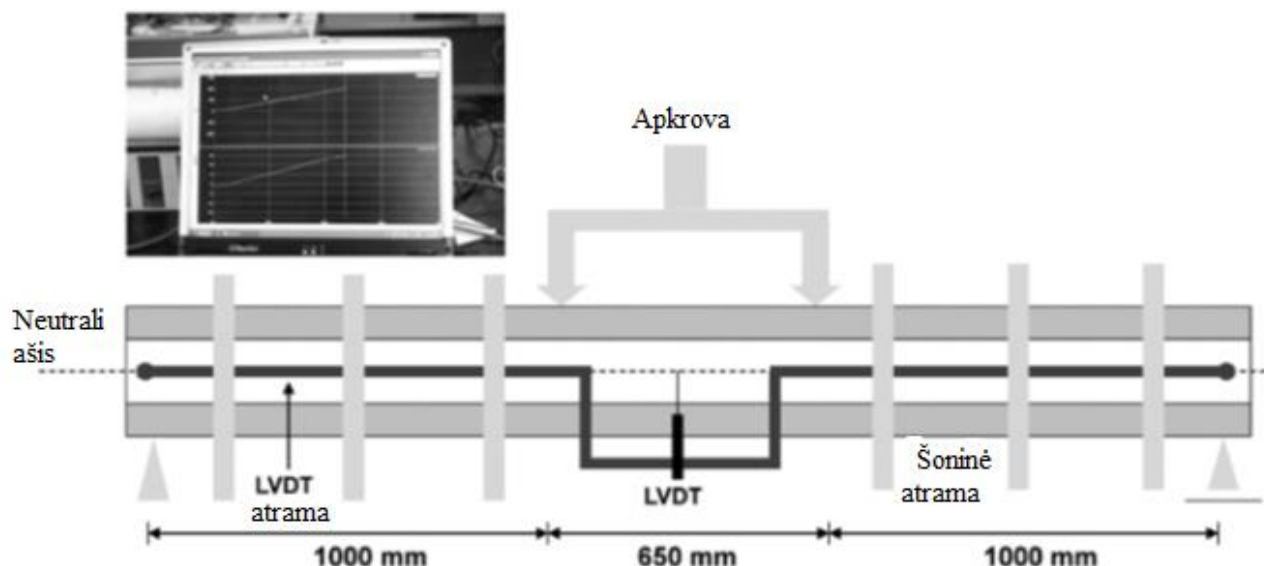
2 lentelė. Suskaičiuotos ir faktinės reikšmių palyginimas (Lokaj & Klajmonová, 2017, p. 273)

Sija	Skačiuota reikšmė [kNm]	Bandymo metu nustatyta reikšmė [kNm]
200/47/47	4,64	11,20
300/47/47	7,61	16,13
200/72/47	7,23	17,93
300/72/47	11,82	24,36

Del Menezzi & Souza's (2012) tyrime buvo naudoti kruopščiai atrinkti medienos karaliūnų genties (*Cariniana micrantha*) ir simarubinių šeimos (*Simarouba amara*) medienos gaminiai lentynoms. Mediena buvo džiovinama lauko sąlygomis 60 dienų, o vėliau laikoma kondicionuojamoje patalpoje (20 C, 65 % santykinis drėgnis). Lentynos, kurių matmenys 40 mm × 40 mm × 2750 mm (w × t × l), buvo išpjauti iš medienos ir vizualiai surūšiuoti. Lentynos su džiūvimo defektais (pasilinkę, susisukę, pakrypę ir t. t.) arba bet kokiais biologinio gedimo požymiais (mėlyna dėmė, vabzdžių skylės ir kt.) buvo atmesti. Galiausiai atrinkti 36 lentynos (10 iš *Cariniana micrantha* ir 26 iš *Simarouba amara*), kad būtų galima surinkti dvitėjines sijas. Sienelė pagaminta iš MDF plokštės, kurios pagrindas yra *Pinus* sp. pluoštas, sujungtas su karbamido formaldehido derva ir kurio tankis buvo apie 600 kg m³. MDF drėgmės kiekis apie 9,8 %, o medienos – 11,9 %.

Del Menezzi ir Souza's (2012) tyrimui atlikti buvo pagaminta 16 dvitėjinių sijų su šiais matmenimis 40 × 200 × 2750 mm. Dvitėjinės sijos buvo bandomos laikantis ASTM D198 standarto. Atstumas tarp apkrovos taškų (grynojo lenkimo tarpatramis) buvo 650 mm, o tarp apkrovos ir reakcijos taškų (šlyties intervalas) - 1 000 mm. Šešios šoninės atramos buvo išdėstytos kas 400 mm, kad būtų sumažintas sijos šoninis nestabilumas apkrovos metu.

Buvo pagaminta 16 dvitėjinių sijų su šiais matmenimis 40 × 200 × 2 750 mm. Dvitėjinės sijos buvo bandomos laikantis ASTM D198 standarto. Atstumas tarp apkrovos taškų (grynojo lenkimo tarpatramis) buvo 650 mm, o tarp apkrovos ir reakcijos taškų (šlyties intervalas) - 1 000 mm. Šešios šoninės atramos buvo išdėstytos kas 400 mm, kad būtų sumažintas sijos šoninis nestabilumas apkrovos metu.



6 pav. Keturių taškų lenkimo testavimo grafikas ir programinės įrangos sąsaja, rodanti apkrovos ir deformacijos kreives (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 361)

Apkrova suteikiama naudojant Pavitest C-4070 hidraulinę mašiną, kuri buvo reguliuojama bandymo greičiui 6,6 mm/min. Dvitėjinės sijos plyšimas įvyko maždaug per 10 minučių, kaip reikalaujama pagal standartą. Spindulio neutralios ašies įlinkis buvo išmatuotas tarp galinių reakcijos taškų (2 650 mm), naudojant 50 mm tiesinį kintamąjį diferencialinį transformatorių. Apkrovos ir deformacijos duomenys buvo gauti per ADS0500 IP integruotą sistemą, prijungtą prie AqDados 7.02 programinės įrangos. 6 paveiksle pateikta bandymo schema.

3 lentelė. Dvitėjinių sijų tamprumo modulio (EM) ir atitinkamo lentynos neardomojo tamprumo modulio vertės (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 362)

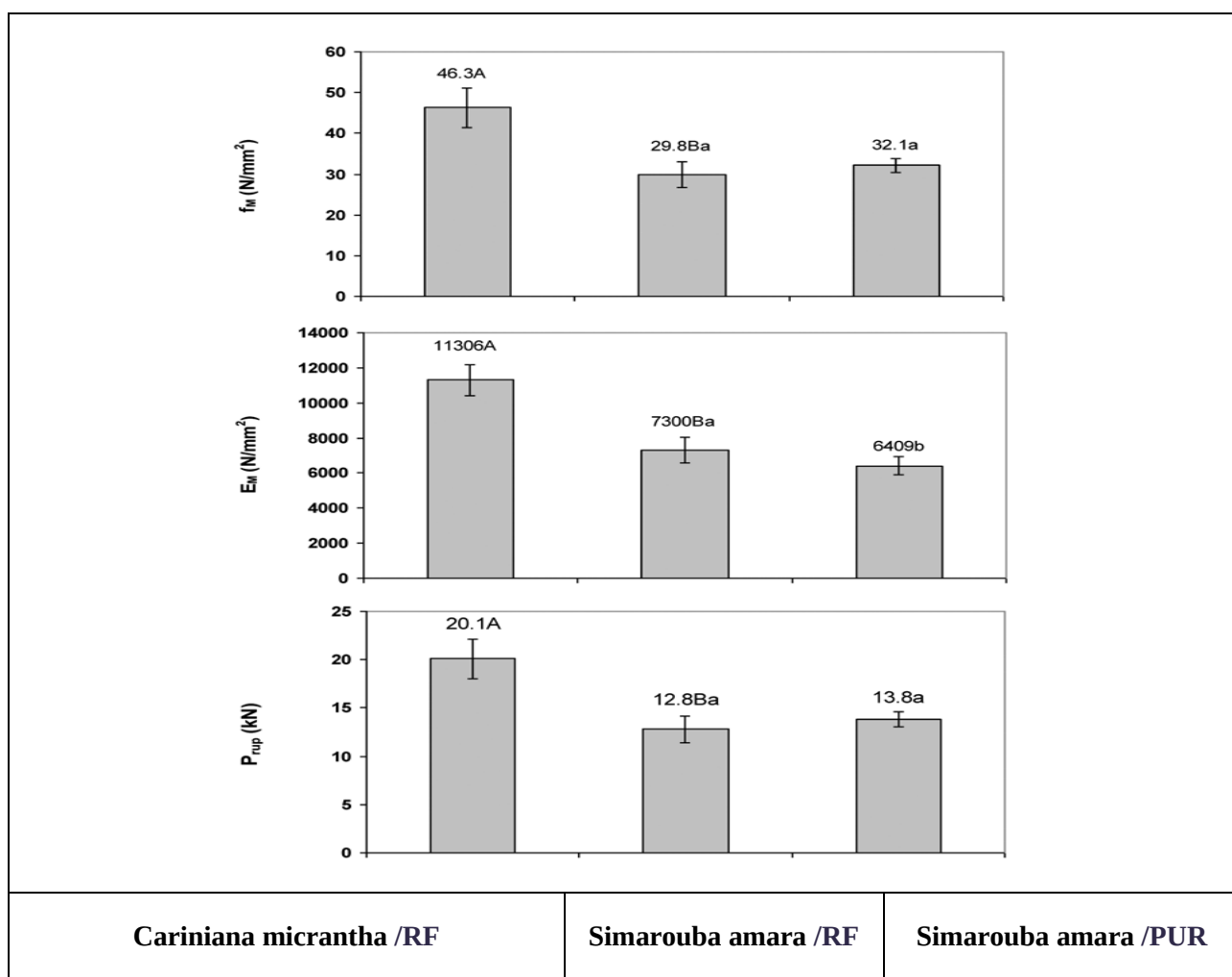
Medienos rūšis / klijai	Eksperimentinis ir nedestrukcinis E (N mm ⁻²)			
	E _M	E _{sb}	E _{dsw}	E _{dvt}
Cariniana micrantha /RF¹				
Maksimumas	12527	16349	15597	16038
Vidurkis	11306	15398	15184	15285
Minimumas	10811	14651	14720	14924
Simarouba amara /RF				
Maksimumas	8500	9045	9381	9056
Vidurkis	7300	8254	8597	8500
Minimumas	6547	7785	7845	7014
Simarouba amara /PUR				
Maksimumas	7200	7663	8408	9084
Vidurkis	6409	7250	8075	7470
Minimumas	5837	6737	7308	7184

¹ Klijai: RF – rezorcinolis-formaldehidas; PUR - ricinos aliejaus pagrindu pagamintas poliuretanai

3 lentelėje pateiktas dvitėjinės sijos tamprumo modulis (E_M) ir neardomasis lentynos tamprumo modulis (E_{sb} , E_{dsw} , E_{dvt}). Galima pastebėti, kad Simarouba amara lentynų dinaminių neardomųjų metodų (E_{dsw} , E_{dvt}) vidutinės vertės buvo šiek tiek didesnės nei gautos naudojant neardomąjį statinį metodą (E_{sb}). Šios tendencijos nepastebėta jungėms iš *Cariniana micrantha* nes trys neardomosios vertės buvo beveik vienodos.

Nustatyta, kad *Cariniana micrantha* lentynos buvo standesnės, nei Simarouba amara lentynos. Kadangi pirmasis (679 kg/m^3) yra tankesnis nei antrasis (394 kg/m^3). *Cariniana micrantha* medienos E_M vertė buvo $12\,800 \text{ N/mm}^2$, o f_M - $110,4 \text{ N/mm}^2$, o Simarouba amara medienos E_M ir f_M vertės buvo atitinkamai $7\,260$ ir 64 N/mm^2 .

Kaip matome iš 7 paveikslu duomenų bandymų metu gautų rezultatų standartinis nuokrypis yra nedidelis. Variacijos koeficientas svyravo nuo 5,6 iki 10,9 %. Toks mažas savybių kintamumas yra esminis vertinant iš inžinerijos perspektyvos.



²Didžiosios raidės palygina statistinius RF klijų vidurkius, o mažosios raidės lygina reikšmes tarp *Simarouba amara* sijų; f_M – plyšimo modulis, E_M – tamprumo modulis, P_{rup} = plyšimo apkrova

7 pav. Trijų tirtų dvitėjinių sijų tipų lenkimo savybių vidurkis ir standartinis nuokrypis

Iš 16 tirtų gaminių 1 atvejis kuomet defektavosi sienelė, o 15 atvejų lentyna. Detalesnė informacija pateikiama 4 lentelėje.

4 lentelė. Sijos defektacija vadovaujantis standartu (Del Menezzi & Souza, 2012, p. 366)

Mediena/klijai	Deformacija/atvejų skaičius			
	WC	FT	FC	FCB
Cariniana micrantha / RF	1		3	
Simarouba amara /RF		1	2	3
Simarouba amara /PUR		1	3	2

Cariniana micrantha sijos deformavosi daugiausia dėl viršutinio lentynos plyšimo suspaudžiant ir gniuždant. Iš 12 Simarouba amara sijų 10 buvo defektuotos dėl suspaudimo. Nepakankama šoninė atrama sukėlė lentynos sulinkimą penkiose sijose, nepaisant to, kad buvo šoninės atramos kas 400 mm. Lentynos tempimo sukelti defektai pasireiškė dviejose Simarouba amara sijose. Viename iš atvejų medienos lūžio vietoje buvo rasta vabzdžio veiklos pėdsakų (sukelia grybą), tai neabejotinai ir buvo deformacijos priežastis.

Hipotetinių medžio masyvo reikšmių ir bandymo metu gautų reikšmių palyginimas pateikiamas 5 lentelėje.

5 lentelė. Hipotetinių sijų, pagamintų tik iš medžio masyvo, lyginamieji matmenys ir keliamoji galia, kad atlaikytų tą pačią apkrovą kaip ir bandomosios dvitėjinės sijos

	Hipotetinė medžio masyvo sija		Dvitėjinė sija bandymo metu	
	Cariniana micrantha	Simarouba amara	Cariniana micrantha	Simarouba amara
Sijos gylis (mm)	117	124	200	200
Sijos plotis (mm)	40	40	40	40
Inercijos momentas (10^3 mm^4)	5319	6413	21650	21650
Sijos medienos tūris (10^{-6} m^3)	129	137	88	88
Sijos svoris (kg/m)	3,17	1,96	2,98	2,07
Santykinė sijos apkrova (N/kg sijai)	2303	2449	2450	2318

³ WC = sienlės lūžimas; FT = lentynos deformacija įtempus, FC = lentynos deformacija suspaudus, FCB = lentynos deformacija lenkiant.

Iš 5 lentelės pateiktų duomenų galima daryti išvadą, kad dvitėjinės sijos su Cariniana micrantha lentynos atlaiko didesnę apkrovą nei medžio masyvo sijos (+ 6,4 %). Tačiau priešingai pastebėta Simarouba amara medienos (– 5,7 %) atveju. Cariniana micrantha mediena yra šiek tiek tankesnė (+ 13,1 %) nei MDF sienelė. Todėl dalį vientisos sijos skerspjūvio pakeitus MDF, sumažėjo sijos svoris ir pagerėjo apkrovos laikymas. Priešingai, kadangi MDF medžiaga buvo tankesnė nei Simarouba amara mediena (+ 52,3 %), dėl to pakeitimas pagerino sijos svorį ir atitinkamai sumažino sijos apkrovą.

Atskirą tyrimų grupę sudaro bandymai rasti sprendimus stiprinant dvitėjines sijas. Ghanbari-Ghazijahani, Russo, & Valipour (2020) atliktame tyrime naudoti keli stiprinimo būdai (žr. 8 pav.):



8 pav. Tyrimo ruošiniai (Ghanbari-Ghazijahani, Russo, & Valipour, 2020, p. 4)

- sienelės ir lentynos dalinis stiprinimas anglies ar džiuto pluoštu;
- pilnas sienelės ir lentynos stiprinimas (apvyniojimas) anglies ar džiuto pluoštu;
- plieniniai lygiagretūs kampai ar kvadratiniai strypai
- medienos intarpai
- medienos intarpai ir plieniniai lygiagretūs kampai ar kvadratiniai strypai.

Tyrimų rezultatai (Ghanbari-Ghazijahani, Russo, & Valipour, 2020) atskleidžia, kad pluošto panaudojimas stiprina dvitėjinę siją, silpnąja vieta gniuždymo metu lieka sienelė (šiuo tyrime OSB plokštė). Plieno panaudojimas sustiprina visą dvitėjinę siją gniuždymo metu, bet, kaip ir pluošto panaudojimo atveju, silpniausia vieta tampa sienelė. O įvertinant kaštus ir svorį, šis variantas nėra pats patraukliausias. Medinių tašelių tvirtinimas abipus sienelės suteikia papildomą dvitėjinės sijos sienelės sutvirtinimą, todėl silpnąja vieta tampa lentynai. Tyrimo autoriai apibendrindami rezultatus pastebi, kad stiprinant sienelę (keičiant alternatyviomis medžiagomis nei OSB plokštė), galėtų padidinti šių sijų stiprį gniuždant.

1.3. Pjautinės medienos sijos

Pjautinė mediena vis dar išlieka viena populiariausių statybos medžiagų. Pirmiausiai dėl to, kad yra pakankamai informacijos apie jos savybes; ne mažiau svarbu ir tai, kad tai visiškai perdirbamas produktas, atliepiantis šiuo laikotarpiu aplinkosaugos reikalavimus (Gao, Zhou, Guo, Xu, & Guo, 2022); ir galiausiai, tai santykinai pigi statybinė medžiaga (Saad & Lengyel, 2022). Kita vertus, atkreipiamas dėmesys į šilumos ar ugnies poveikį šiai statybinei medžiagai (Nubissie, Ngamie, & Wofo, 2011).

Europoje konstrukcinė mediena rūšiuojama pagal Europos standartą EN14081-1 ir jį lydinčių standartų (pvz., Lycken et al. 2020) sistemą. Stačiakampio skerspjūvio mediena skirstoma į kategorijas pagal tris charakteristikas: lenkimo stiprumą, lenkimo standumą ir tankį (esant 12 % drėgniui). Be lenkimo stiprumo, klasifikavimas taip pat gali būti grindžiamas įtempimo stiprumu ir

standumu. Bet kuriuo atveju charakteringos stiprumo ir tankio vertės nurodomos kaip penktieji procentiliai ir standumas pagal vidurkį. Nepaisant to, kad Europoje yra vienodas standartas, kai kurios šalys taiko ir savus standartus, pvz., Jungtinė Karalystė ir Airija (žr. 6 lentelę).

Europos standartai pateikia lygtis, leidžiančias įvertinti būdingąjį įtempimo stiprumą nuo būdingo stiprumo lenkiant ir atvirkščiai, priklausomai nuo to, kuris metodas buvo taikytas pirmiau.

Medienos savybės skiriasi priklausomai nuo rūšies ir šalies, kurioje ji užaugo. Kaip nurodo Gil-Moreno et al (2022) $f_{m,k2}$ atskirose šalyse varijuoja nuo 20 iki 26 N/mm² (vidurkis 21,9 N/mm²) eglės ir 17 – 23 N/mm² (vidutiniškai 19,8 N/mm²) pušies medienai. Kaip nurodo Fischer et al. (2016; 2015), Stod et al. (2016), yra įprasta, kad Skandinavijos ir Vidurio Europos eglės ir pušies mediena pasiekia aukštesnę, nei C22 stiprumo klasę, tuo tarpu JK ir Airijoje auganti mediena dažniausiai yra C16 stiprumo klasės (~80 %) (Gil-Moreno, Ridley-Ellis, & Mclean, 2016). Airijoje ir JK pagrindinė statyboms auginama rūšis yra sitka eglė (*Picea sitchensis* (Bong) Carr.). Rūšis paprastai klasifikuojama kaip konstrukcinė mediena iki C16 ($E_{m,0,vidurkis} = 8$ kN/mm², $f_{m,k} = 16$ N/mm², $\rho_k = 310$ kg/m³), tačiau iš tikrųjų medienos stiprumas ir tankis yra didesnis nei reikalauja standartas. Įvertinimą riboja standumas, būdingas kitoms auginimo regiono rūšims (Gil-Moreno et al., 2016). Mažesniui našumui, palyginti su rūšimis, augančiomis žemyninėje Europoje, daugiausia įtakos turi naudojami trumpesni rotacijos ilgiai. Vietinė pušis, gali pasiekti aukštesnę stiprumo klasę (C20) nei sitka ar paprastoji eglė.

6 lentelė. JK ir Airijos medienos stiprumo klasės (Ridley-Ellis, Gil-Moreno, & Harte, 2022)

Klasė	Geriau nei EN338	5-oji procentilė (N/mm ²) Stipris lenkiant	Standumo vidurkis (kN/mm ²)	5-oji procentilė Tankis (kg/m ³)
TR26	>C24	28,3	11,0	370
C16+	>C16	18,5	8,0	330
NapierSA	>C24	25,0	11,0	375
NapierSB	>C22	22,0	10,0	360
NapierSC	>C16	16,0	8,0	320
NapierSD	>C14	15,0	7,0	310
NapierLA	>C30	30,0	13,0	480
NapierLB	>C27	28,0	12,0	440
NapierLC	>C18	21,0	9,0	400
NapierLD	>C16	20,0	8,0	390
NapierDA	>C35	35,0	13,0	460
NapierDB	>C30	30,0	12,0	460
NapierDC	>C16	16,0	10,0	400
NapierDD	>C14	14,0	9,0	400
Lentjuostė14 ³	>C14	14,0	7,5	330
Lentjuostė12	-	12,0	7,5	330

Klasė	Geriau nei EN338	5-oji procentilė (N/mm ²) Stipris lenkiant	Standumo vidurkis (kN/mm ²)	5-oji procentilė Tankis (kg/m ³)
Lentjuostė10	-	10,0	7,0	330

¹ Ne visi autoriai su tuo sutinka. Pvz.: Brokāns (2013), Saladis & Aleinikovas (2004) ir kt. Aut. pastaba.

² Būdingas (penktasis procentilis) lenkimo stipris lygiagrečiai grūdeliui. Aut. pastaba

³ Būdingas (penktasis procentilis) lenkimo stipris lygiagrečiai grūdeliui. Aut. pastaba

⁴ Gaminys iš žemaūgių eglių. Aut. pastaba.

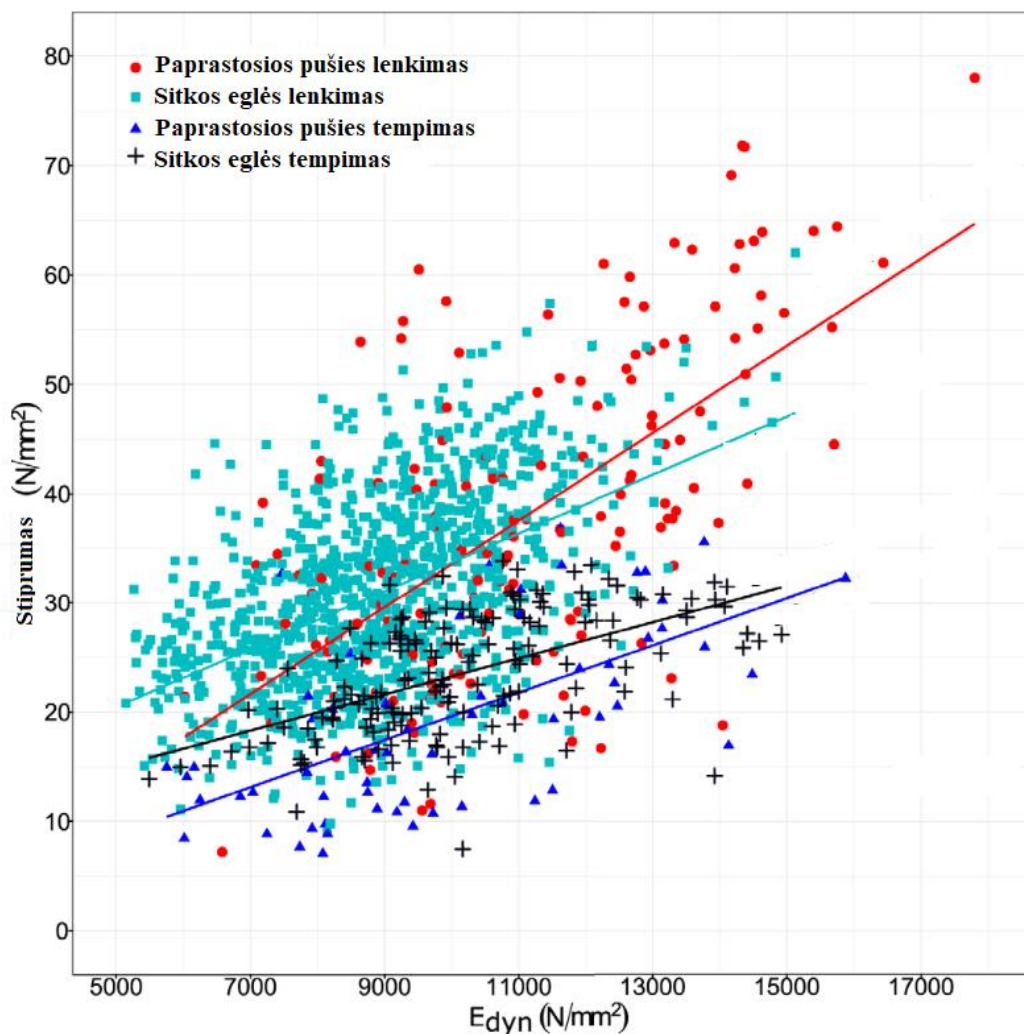
Gil – Moreno et al. (2022) palygino tris spygliuočių rūšis: sitkos eglę, paprastąją eglę ir paprastąją pušį. Sitkos eglė buvo auginama Airijoje. Mediena (858 vnt.) buvo gauta iš 23 metų amžiaus eglės. Sitkos eglės pavyzdžius įtempimo bandymui (153 vnt.) pateikė lentpjūvė Airijoje kaip įprastos gamybos dalį, siekiant padidinti verčių diapazoną, įtempimo rinkinys buvo papildytas 44 papildomais ruošiniais iš kito šaltinio. Šių papildomų dalių vidutinis ilgis buvo 1,8 m, trumpesnis nei standarto reikalavimai, tačiau anot autorių atitiko tyrimui keliamus tikslus. Paprastoji eglė kilusi iš dviejų 44 metų ir vienos 76 metų plantacijų Didžiojoje Britanijoje. Mediena buvo išbandyta lenkiant (143 vnt.) ir derinama su lenkimo sitka eglės duomenų rinkiniu, kad būtų galima ištirti platesnį verčių diapazoną. Paprastosios pušies bandiniai kilę iš įvairių Airijos bei Norvegijos vietovių. Viso parinkta 81 detalė įtempiant ir 158 lenkiant. Bandinių skerspjūvis $100 \times 45 \text{ mm}^2$, išskyrus 384 sitkos eglės bandinius, kurių skerspjūvis $75 \times 35 \text{ mm}^2$. Gauti tyrimo rezultatai pateikiami 7 lentelėje ir 9 paveiksle.

7 lentelė. Tiesinių modelių determinacijos koeficientai R² ir statistinis reikšmingumas (p reikšmė), kai nulinė hipotezė yra ta, kad aiškinamasis kintamasis neturi įtakos atsako kintamajam (Gil Moreno et al, 2022, p.590)

R ²	Lenkimas			Tempimas		
	Bendras	Britiška eglė	Paprastoji pušis	Bendras	Britiška eglė	Paprastoji pušis
$\rho - E$	0,37***	0,28***	0,24***	0,01 (ns)	0,01 (ns)	0,46***
$\rho - f$	0,23***	0,22***	0,23***	0,01 (ns)	0,01 (ns)	0,38***
$E - f$	0,54***	0,49***	0,55***	0,46***	0,33***	0,67***
$E_{dyn} - E$	0,75***	0,69***	0,79***	0,72***	0,75***	0,70***
$F_{dyn} - f$	0,34***	0,26***	0,40***	0,33***	0,31***	0,45***
$TKAR - f$	0,16***	0,07***	0,64***	0,10***	0,05*	0,55***

Pastabos: ρ – tankis, E – Elastingumo modulis, E_{dyn} – dinaminis elastingumo modulis, $TKAR$ – Bendras mazgų ploto santykis, f – stiprumas (lenkiant arba tempiant).

Ns – statistiškai nereikšminga; p: *** < 0,001; * < 0,05.



9 pav. Ryšys tarp E_{dyn} ir stiprio įtempiant bei lenkiant (Gil Moreno et al, 2022, p.590)

Tyrimo duomenys atskleidžia medienos kokybės ir kilmės svarbą nustatant ryšius tarp lenkimo ir tempimo savybių. Mechaninio elgesio skirtumai tarp rūšių taip pat gali atlikti svarbų vaidmenį ir gali neatitikti numanomo tiesinio ryšio, pateikto Europos standartuose. Tyrime pagrindinis dėmesys skiriamas stiprumo savybėms lenkiant ir įtempiant, kaip pagrindiniams parametrams keičiant stiprumo lenkimo ir tempimo klases. Tyrimo metu buvo tiriama mediena, kurios charakteristikos vertės C14, C16, T8 ir T11. Bandymai atlikti su eglėmis, parodė, kad jų linijinė regresija modeliavo ryšį tarp lenkimo ir tempimo charakteristikų stiprumo verčių, o pagal atliktus tyrimus su paprastąja pušimi, matyti, kad netiesinis ryšys tinka geriau.

Tyrimo duomenys leidžia teigti, kad Europos standarte pateikta konversijos lygtis, gauta naudojant aukštesnes stiprumo klases ir ekstrapoliuota į žemesnes klases, gerokai neįvertina būdingų Airijoje auginamų eglėlių, kurios Airijoje paprastai pasiekia C16 stiprumo lenkimo klases, tempimo stiprio vertes. Atvirkštinės konversijos atveju atsitinka priešingai. Mažesni skirtumai nustatyti paprastosios pušies atveju, tačiau šiuo atveju standartas pervertina konversiją iš būdingo lenkimo stiprumo į būdingą tempimo stiprumą.

8 lentelė. Medienos stiprumo klasė ir susiję parametrai (Medžio bitės, (n.d.))

Standartas EN	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Atsparumas lenkimui, N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Atsparumas tempimui, N/mm ²	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Atsparumas slėgimui, N/mm ²	16	17	18	20	21	22	23	24	26
Elastingumo modulis, KN/mm ²	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Tankis, Kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420

Tuo tarpu Lietuvos perdirbėjai nurodo, kad dažniausiai šalyje naudojama C18 ir C24 klasių mediena.

Kai kurie tyrėjai, pjautinę medieną tiria dalį jos klijuodami stiklo ar anglies pluošto juostomis.

9 lentelė. Tyrimo ir teorinis deformacijos momentai (Fiorelli & Dias, 2003)

Sustiprinimas	Mėginys	Eksperimentinis pažeidimo momentas	Teorinis pažeidimo momentas	Santykis $M_{\text{eksp}} / M_{\text{teor.}}$
Stiklo pluoštas	1	920	871	1,05
	2	1051	938	1,12
Anglies pluoštas	3	978	934	1,04
	4	1072	935	1,14
Stiklo pluoštas	5	1094	1085	1,00
	6	1301	1400	0,93
Anglies pluoštas	7	1491	1474	1,01
	8	1060	1144	0,93
Stiklo pluoštas	9	1118	1056	1,06

Fiorelli'as ir Dias'as (2003) tyrimo metu nustatė, kad tiek su stiklo, tiek su anglies audiniu sutvirtinta sija pasižymi geresnėmis savybėmis, nei tuo atveju, jei audinys nenaudotas. Be to, tyrime naudoti teoriniai skaičiavimai daugeliu atveju yra žemesni, nei atlikto bandymo metu (žr. 9 lentelę). Tai rodo gerą teorinį modelį ir jo tinkamumą praktiniams skaičiavimams. Kita vertus, vėlesni tyrimai, pvz., Neubauerová (2012) rodo, kad medienos kiekiui sijoje didėjant, stebimas anglies pluošto įtakos sumažėjimas sijos gebėjimui atlaikyti apkrovas.

Naujausi tyrimai apima hibridines anglies ir stiklo pluoštų kombinacijas (Xian, Guo, & Li, 2022; Rajak, Pagar, Menezes, & Linul, 2019; Guo, Xian, Li, Li, & Hong, 2022). Teigiama, kad hibridiniai pluoštai gali padidinti tempimo stiprį 51,3 %, o lenkimo stiprį 39,7 %. Tačiau, bandymai atskleidžia, kad hibridiniai pluoštai jautrūs aukštesnei temperatūrai – lenkimo stipris mažėja.

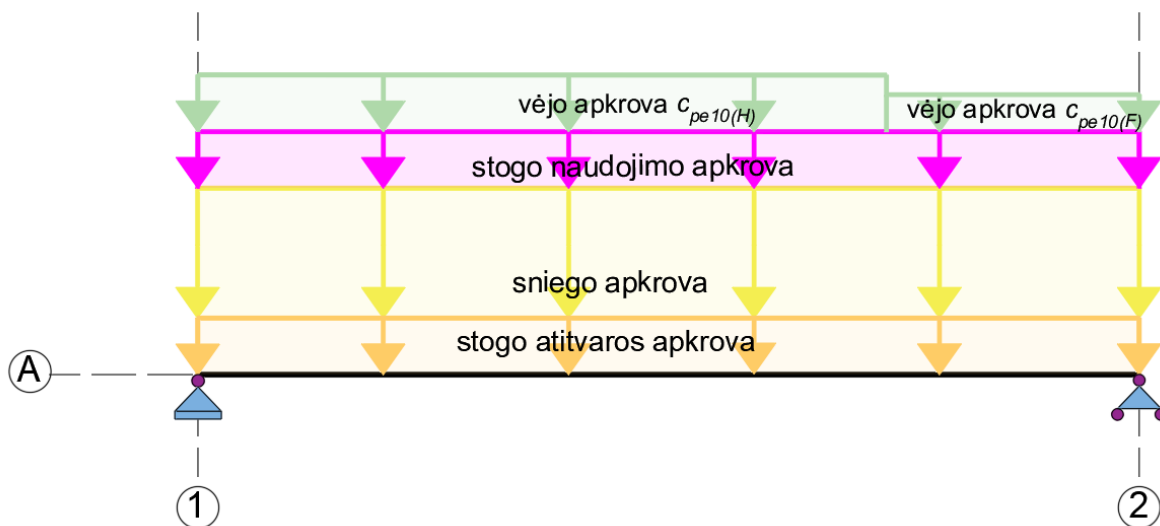
2. Tiriamoji dalis

2.1. Skaičiuojamasis modelis

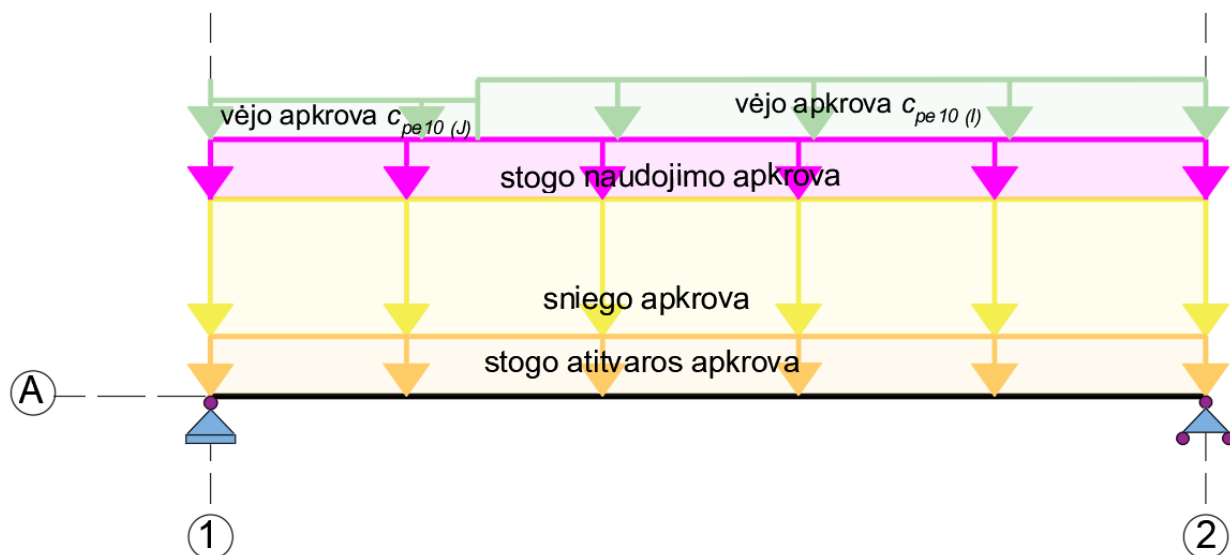
Pastatas projektuojamas Šiaulių mieste. Projekte pasirinktas dvišlaitis stogas, kurio nuolydis 10° . Pastato aukštis – 5,00 m, ilgis – 10,00 m. Projekte bus skaičiuojamos trijų tipų medinės sijos: pjautinės medienos, klijuotos medienos ir 2T-sijos. Pjautinės medienos klasė – C24, klijuotos medienos klasė GL24h, 2T-sijos tašeliai GL24h, sienelė – OSB plokštė.

Stogo sijoms numatyta vienoda vienoda apkrova, sijų ir jos sudedamųjų dalių svoriai pateikiami 11 lentelėje. Sijos, kurių stiprumas ir standumas lyginamas pagal aukštį, pateikti sijų duomenys 17 lentelėje, pagal plotį – 18 lentelėje, pagal ilgį – 19 lentelėje, pagal skerspjūvio plotą – 20 lentelėje. Apskaičiuotas standumas ir stiprumas 2T-sijos nuo sienelės storio rezultatai pateikiami 21 lentelėje. Keičiant sijų žingsnį rezultatai 22 lentelėje, o sijos, kurios bus lyginamos pagal svorį - pateikiamos 23 lentelėje. Projekte numatyta apskaičiuoti sijų stiprumą ir standumą naudojant, kai sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi. Sijų sutartiniai žymėjimai pateikiami 12 pav. Skaičiuojamasis sijos modelis sudarytas *Autodesk RSA* terpėje, skaičiuojamosios schemos pateikiamos 10 pav. ir 11 pav.

Skaičiavimai bus atlikti naudojant baigtinių elementų metodą, kuris realizuotas programinėje įrangoje *Autodesk RSA* (angl. *Robot Structural Analysis*). Tyrimo rezultatai gaunami sprendžiant plokščią uždavinį esant tamprims, mažoms deformacijoms. Skaičiuotinis sijų modelis sudaromas iš dviejų mazgų, lenkiamų, baigtinių elementų, kurių pusiausvyros lygtis gaunamos panaudojus Timošenko lenkiamų sijų teoriją. Kiekvienas baigtinių elementų mazgas turi tris laisvės laipsnius: poslinkiai išilgai ir skersai sijos ašies, bei sijos ašies deviacija (sijos neutralės liestinis kampas su horizontale). Sijų mechaninės savybės vertintos kaip vienalytės.

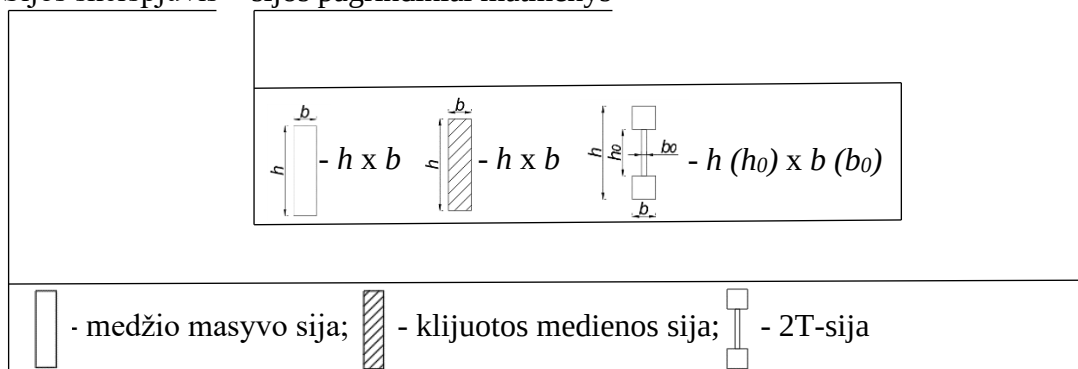


10 pav. Stogo sijos modelis sudarytas *Autodesk RSA* terpėje, kai vėjo apkrova - priešvėjinė



11 pav. Stogo sijos modelis sudarytas Autodesk RSA terpėje, kai vėjo apkrova - pavėjinė

Sijos skerspjūvis – sijos pagrindiniai matmenys



12 pav. Medinių sijų sutartiniai žymėjimai

2.2. Skaičiuojamos apkrovos

Skaičiuojant ar projektuojant medines konstrukcijas, reikia įvertinti apkrovų veikimo trukmės klases. Remiantis LST EN 1995-1-1:2005 „Eurokodas 5“ pasirinktos apkrovų veikimo trukmės, kurios pateikiamos 10 lentelėje (LST EN 1995-1-1:2005 „Eurokodas 5“). Šiame tyrime nuolatinės veikimo trukmės klasei priskirtas sijos ir stogo atitvaros savieji svoriai, trumpalaikių apkrovų veikimo klasei priskirtos vėjo ir stogo naudojimo apkrovos, o vidutinės trukmės apkrovų klasei priskirta sniego apkrova.

10 lentelė. Apkrovų veikimo trukmės klasės

Apkrovos veikimo trukmės klasė	Apkrovos veikimo trukmė	Apkrova
Nuolatinė	daugiau nei 10 metų	savasis svoris
Vidutinės trukmės	nuo 1 savaitės iki 6 mėnesių	sniegas

Apkrovos veikimo trukmės klasė	Apkrovos veikimo trukmė	Apkrova
Trumpalaikė	mažiau nei savaitė	vėjas

Pagal LST EN 1995-1-1:2005 „Eurokodas 5“ leistinas sijų įlinkis yra proporcingas tarpatramio ilgiui l (LST EN 1995-1-1:2005):

$$l/200 = 5,0/200 = 0,025 \text{ m} \quad (3)$$

11 lentelė. sijų nuolatinės apkrovos surinkimas

Medžiagos pavadinimas	plotis, m	aukštis, m	kN/m ²	kN/m
Beasbestiniai šiferio lakštai	-	-	0,15	0,090
Skersiniai grebėstai (L – 1,80m)	0,022	0,100	0,017	0,010
Išilginiai grebėstai (L – 1,60m)	0,050	0,030	0,010	0,006
Akmens vata	-	0,400	0,160	0,960
Išilginiai grebėstai (L – 1,60m)	0,05	0,03	0,010	0,006
Pakabinamų lubų konstrukcija	-	-	0,300	0,180
		Suma	0,647 kN/m²	0,388 kN/m

Atliekant tyrimą, numatytas sijų žingsnio kitimas, pakitus sijų žingsniui, apkrova didėja arba mažėja. Įvertinus sijų žingsnio kitimą, stogo atitvaros svoris pateikiamas 12 lentelėje.

12 lentelė. Stogo atitvaros svoris. Įvertinus sijų žingsnį

Sijų žingsnis, m	Stogo atitvaros svoris, įvertinus sijų žingsnį sijų žingsnis × atitvaros svoris, kN/m
0,60	0,388
0,80	0,518
1,00	0,647
1,20	0,776
1,40	0,906

Sniego apkrova. Pagal norminį dokumentą LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“ pasirinktas I rajonas, kuriame sniego apkrova yra 1,20 kN/m² (LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2004). Vietovės topografinė charakteristika – apsaugota, t.y. vieta, kurioje nagrinėjami statiniai aiškiai žemesni už supančią vietovę arba supančius medžius ir (arba) supančius aukštesnius statinius, todėl $c_e = 1,2$ (LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2003). Įvertinus šilumos nuostolius per stogą, $c_t = 1$ (EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2003). Pagal stogo formą, koeficientas $\mu_1 = 0,8$ (LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2004). Įvertinus sijų žingsnio kitimą, stogo sniego apkrova pateikiama 13 lentelėje.

Sniego apkrova (LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2004):

$$s = \mu_1 \cdot c_e \cdot c_t \cdot S_k = 0,8 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1,2 = 1,15 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

čia s – sniego apkrova, kN/m²;

μ_1 – stogo formos koeficientas;

c_e – vietovės topografinės charakteristikos koeficientas;

c_t – šilumos nuostolių per stogą koeficientas;

s_k – sniego rajonas, kN/m^2 .

13 lentelė. Sniego apkrova, įvertinus sijų žingsnį

Sijų žingsnis, m	Stogo atitvaros svoris, įvertinus sijų žingsnį sijų žingsnis $\times$ sniego apkrova, kN/m
0,60	0,69
0,80	0,92
1,00	1,15
1,20	1,38
1,40	1,61

Stogo naudojimo apkrova. Numatoma, kad stogo naudojimo kategorija bus H – neprieinamieji stogai, išskyrus normalią priežiūrą (LST EN 1991-1-3:2003 „Eurokodas 1“, 2004). Tokiu atveju stogo naudojimo apkrova yra $0,40 \text{ kN/m}^2$. Įvertinus sijų žingsnį, stogo naudojimo apkrova pateikiama 14 lentelėje.

14 lentelė. Stogo naudojimo apkrova, įvertinus sijų žingsnį

Sijų žingsnis, m	Stogo atitvaros svoris, įvertinus sijų žingsnį sijų žingsnis $\times$ stogo naudojimo apkrova, kN/m
0,60	0,24
0,80	0,32
1,00	0,40
1,20	0,48
1,40	0,56

Vėjo apkrova. Pagal norminį dokumentą LST EN 1995-1-4:2005 „Eurokodas 1“ pasirinktas I vėjo apkrovos rajonas, oro tankis $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Pagal vėjo apkrovos rajoną, pagrindinio vėjo greičio reikšmė $v_{b,0} = 24 \text{ m/s}$, krypties koeficientas $c_{dir} = 1$, metų laikų koeficientas $c_{season} = 1$ (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007). Vietovės kategorija – III (ruožai, ištiesai apaugę augalija arba užstatyti pastatais, arba atskiromis kliūtimis, nutolusiomis vienos nuo kitų mažiau nei 20 kliūčių aukščių (pvz., kaimai, priemiestinės vietovės, nuolatinis, ištiesas miškas)), kur šiurkščiojo ruožo ilgis $z_0 = 0,30$, maksimalus aukštis $z_{max} = 200 \text{ m}$ ir mažiausias aukštis $z_{min} = 5 \text{ m}$ (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007). Priimama, kad pastatas dislokuotas ne kalnuotoje vietovėje. Vėjo kryptis vertinama skersai pastato, t.y. $\theta = 0^\circ$. Skersai pastato veikiančios vėjo apkrovos ruožas bus parinkta atlikus skaičiavimus, vertinamas pavojaingesnis variantas, kai vėjo apkrova didžiausia.

Pagrindinis vėjo greitis (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}; \quad (5)$$

čia v_b – pagrindinis vėjo greitis;

c_{dir} – krypties koeficientas. $c_{dir} = 1$;

c_{season} – metų laikų koeficientas. $c_{season} = 1$;

$v_{b,0}$ - svarbiausioji pagrindinio vėjo greičio reikšmė, 24 m/s.

$$v_b = 1 \cdot 1 \cdot 24 = 24 \frac{m}{s};$$

Vidutinio vėjo greitis virš vietovės aukštyje z (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (6)$$

čia $c_r(z)$ - šiurkštumo koeficientas;

$c_0(z)$ - kalvotumo koeficientas. $c_0(z) = 1$;

v_b - pagrindinio vėjo greitis.

Šiurkštumo koeficientas susietas su mažiausiu aukščiu z_{min} (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right);$$

čia k_r - vietovės koeficientas priklausantis nuo šiurkščiojo ruožo ilgio z_0 ;

z - pastato aukštis, m;

z_0 - šiurkščiojo ruožo ilgis, m.

$$c_r = 0,2154 \cdot \ln\left(\frac{5}{0,3}\right) = 0,606;$$

Vietovės koeficientas, priklausantis nuo šiurkščiojo ruožo ilgio (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}; \quad (7)$$

čia z_0 – šiurkščiojo ruožo ilgis, m;

$z_{0,II} = 0,05$ m (šiurkščiojo ruožo ilgis II vietovės kategorijai).

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,2154;$$

$$v_m(z) = 0,606 \cdot 1 \cdot 24 = 14,544 \text{ m/s};$$

Vėjo turbulencijos intensyvumas aukštyje z (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \text{ kai } z_{min} \leq z \leq z_{max}; \quad (8)$$

čia k_1 - turbulencijos koeficientas. $k_1 = 1$;

c_0 - kalvotumo koeficientas. Vietovė nėra kalvota, todėl $c_0 = 1$.

$$l_v(z) = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{5}{0,3}\right)} = 0,356;$$

Viršūninio vėjo greičio slėgis, kuris apima vidutinį ir trumpalaikius greičio svyravimus aukštyje z (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_{m^2}^2(z); \quad (9)$$

čia ρ - oro tankis, kuris priklauso nuo altitudės, vėjo audrų zonoje numatomos temperatūros ir barometro slėgio. $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0,356] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 14,544^2 = 0,462 \text{ kPa};$$

Patikrinimui, viršūninio vėjo greičio slėgį $q_p(z)$ galima nustatyti ir pagal kitą LST EN 1991-1-4:2005 formulės išraišką (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b; \quad (10)$$

čia q_b - atskaitos vidutinis greičio slėgis;

$c_e(z)$ - ekspozicijos koeficientas.

Tarpusavio priklausomybė tarp pagrindinio vėjo greičio ir pagrindinio vėjo greičio slėgio (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“, 2007):

$$q_b = \frac{\rho}{2} \cdot v_b^2; \quad (11)$$

čia q_b – oro tankis, $1,25 \text{ kg/m}^3$;

v_b – pagrindinis vėjo greitis, 24 m/s .

$$q_b = \frac{1,25}{2} \cdot 24^2 = 0,360 \text{ kPa};$$

Ekspozicijos koeficientas $c_e(z)$ nustatomas pagal LST EN 1991-1-4:2005 4.2 paveikslą, kai $c_0 = 1$ ir $k_1 = 1$. $c_e(z) \approx 1,28$.

Ekspozicijos koeficiento reikšmė yra apytikslė, kadangi yra imama iš monogramos (LST EN 1991-1-4:2005 4.2 paveikslas), todėl galima paklaida.

$$q_p(z) = 1,28 \cdot 0,36 = 0,461 \text{ kPa}.$$

Vėjo apkrovų skaičiavimas, veikiantis dvišlaičius stogus (LST EN 1991-1-4:2005 1 formulė):

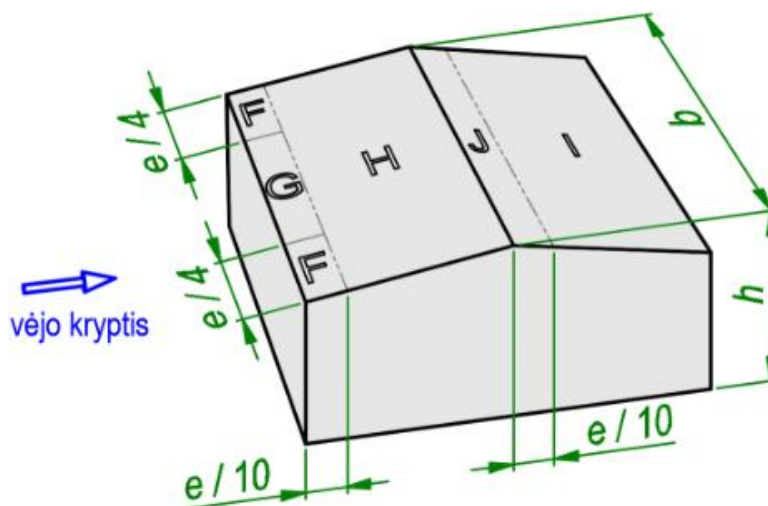
$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}; \quad (12)$$

čia $q_p(z_e)$ - viršūninio greičio slėgis, kPa;

c_{pe} - išorinio slėgio koeficientas (LST EN 1991-1-4:2005 7.4a, b lentelė);

z_e - išorinio slėgio atskaitos aukštis (LST EN 1991-1-4:2005 7.4 pav.), $z_e = h = 5 \text{ m}$.

Vėjo apkrovų, kai vėjas pučia skersai pastato, ruožų pasiskirstymo schemos pateikiamos 13 pav.



13 pav. Stogo, veikiamo vėjo apkrovos, sričių raidinis žymėjimas pagal LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“. Sritys F, G ir H yra priešvėjiniame stogo šlaite, o I ir J – pavėjiniame. Čia $e = \min(b; 2h)$; b – vėjo krypties statmenas stogo plano matmuo (LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“ 7.8 pav.)

Kadangi pastato apkrautasis plotas yra didesnis kaip 10 m^2 , priimu c_{pe10} reikšmę ir nustatau išorinio slėgio koeficientus $c_{pe,10}$ pagal norminį dokumentą LST EN 1991-1-4:2005 „Eurokodas 1“ 7.4 a lentelę.

15 lentelė. Vėjo apkrovos, kai vėjas pučia skersai pastato ($q_p(z_e) = 0,461 \text{ kPa}$)

Ruožas	Vėjo slėgio koeficientas, c_{pe10}	Vėjo charakteristinė apkrova $w_e = q_p(z_e) \times c_{pe}$, kN/m^2
F	-1,3	$0,461 \cdot (-1,3) = -0,599$
G	-1,0	$0,461 \cdot (-1,0) = -0,461$
H	-0,45	$0,461 \cdot (-0,45) = -0,2075$
I	-0,5	$0,461 \cdot (-0,50) = -0,2305$
J	-0,8	$0,461 \cdot (-0,80) = -0,3688$

Vėjo apkrova stogo sijai srityse F, H, I ir J (žr. 13 pav.), įvertinus sijų išdėstymo žingsnį pateikiama 16 lentelėje.

16 lentelė. Vėjo apkrova įvertinus sijų žingsnį

Ruožas	Sijų žingsnis, m	Vėjo apkrova, įvertinus sijų žingsnį sijų žingsnis $\times$ vėjo apkrova, kN/m
F	0,60	-0,360
F	0,80	-0,479
F	1,00	-0,599
F	1,20	-0,719
F	1,40	-0,839
H	0,60	-0,125
H	0,80	-0,166
H	1,00	-0,207

Ruožas	Sijų žingsnis, m	Vėjo apkrova, įvertinus sijų žingsnį sijų žingsnis $\times$ vėjo apkrova, kN/m
H	1,20	-0,249
H	1,40	-0,290
I	0,60	-0,138
I	0,80	-0,184
I	1,00	-0,231
I	1,20	-0,277
I	1,40	-0,323
J	0,60	-0,221
J	0,80	-0,295
J	1,00	-0,369
J	1,20	-0,443
J	1,40	-0,516

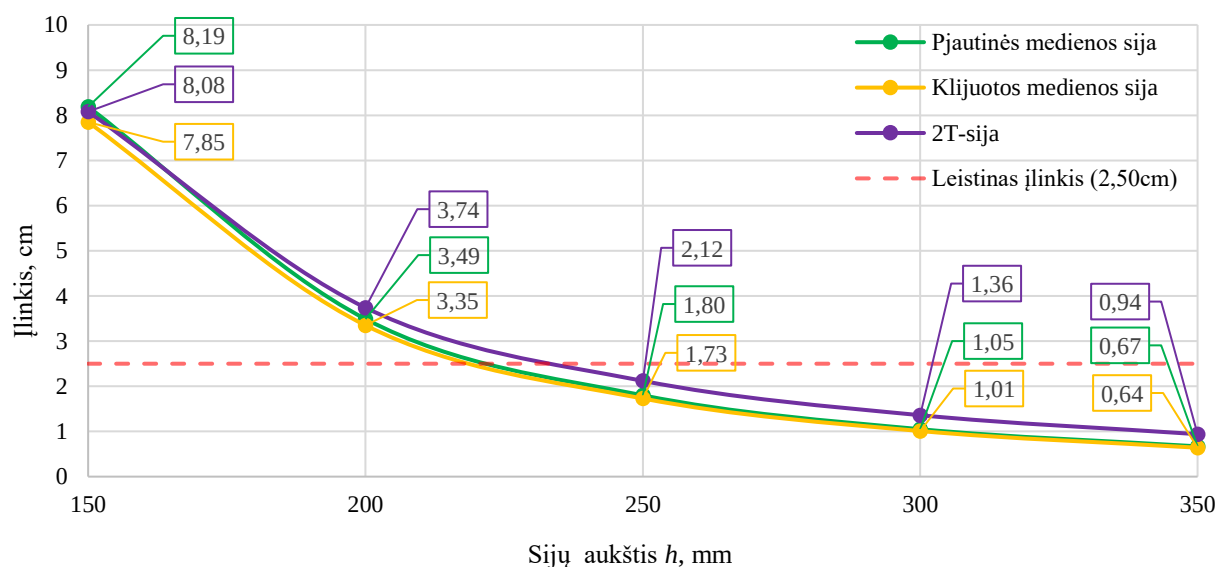
2.3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Atlikti skaičiavimai, bei sudaryti apkrovų deriniai su programine įranga *Autodesk RSA*. Atlikti medinių sijų stiprumo (a_1 , a_2) ir standumo (Dy) skaičiavimai, apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje (σ_1) ir apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas (a_1). Sijos viduryje maksimalūs suminiai įtempiai yra pavojingiausi su apkrovų deriniu ULS 20 (savasis svoris $\times 1,35$ + sniego apkrova $\times 1,3$), kai vėjo apkrovos stogo konstrukcijoms yra priešvėjinė ir pavėjinė. Atlikus skaičiavimus dėl sijų stiprumo ir standumo medinių sijų galuose, apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai įtempiai (τ_{max}). Pagal maksimalius tangentinius įtempius, apskaičiuojamas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas sijos galuose (a_2). Remiantis atliktais skaičiavimais, matyti, kad sijos galuose maksimalūs tangentiniai įtempiai yra pavojingiausi su apkrovų deriniu ULS 5 (savasis svoris $\times 1,35$ + stogo naudojimo apkrova $\times 1,3$ + vėjo apkrova $\times 0,78$ + sniego apkrova $\times 0,91$), kai vėjo apkrova priešvėjinė, o vėjo apkrovos stogo ruožai yra F ir H. Remiantis atliktų skaičiavimų rezultatais, apskaičiuotų sijų galuose maksimalūs tangentiniai įtempiai (τ_{max}), kai vėjo apkrova yra pavėjinė, stogo ruožai J ir I, įvertinta, kad apkrovų derinys yra pavojingesnis ULS 20.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 17 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 14 pav. ir 15 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos aukščio, sijos tarpatramis - 5,00 m, sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

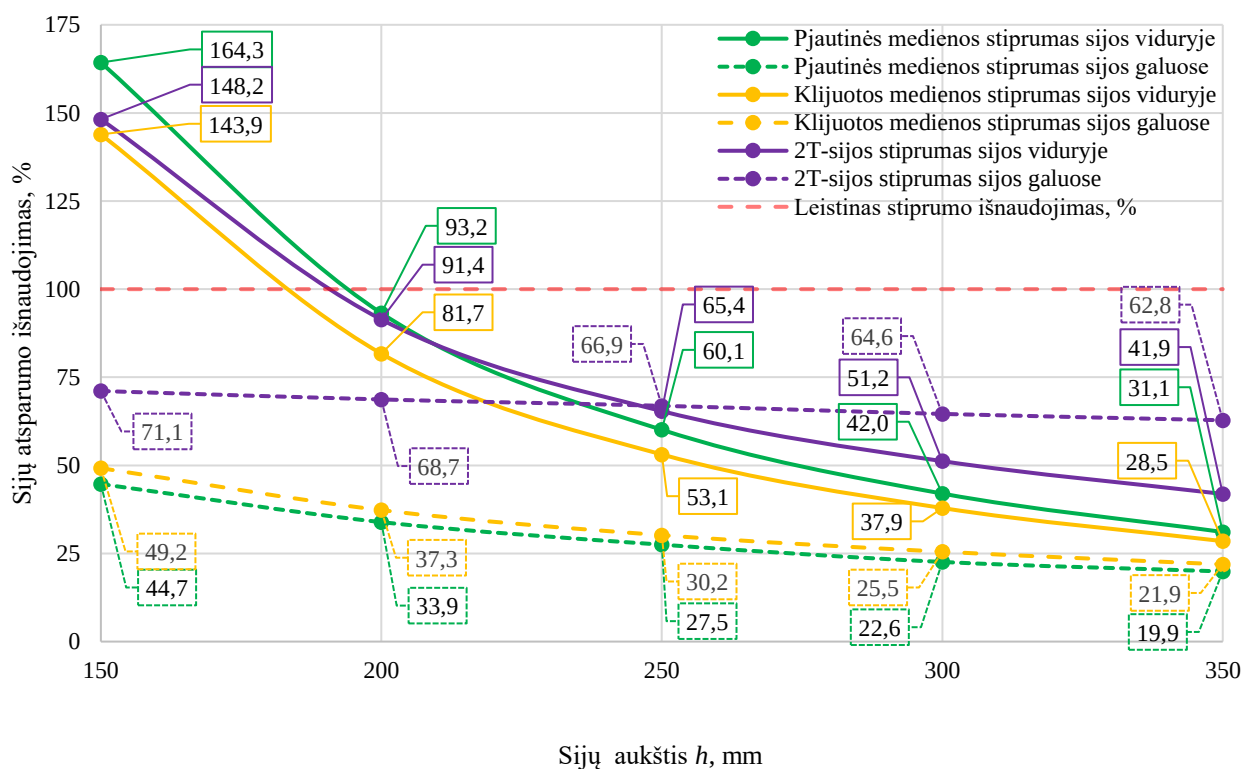
17 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos aukščio

Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	D_y , cm	$\sigma_{1 \max}$, MPa	a_1 , % (pagal ULS 20-ą derinį)	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , % (pagal ULS 5 derinį)	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_p , cm	$\sigma_{1 \max}$, MPa	a_1 , % (pagal ULS 20 derinį)	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , % (pagal ULS 20 derinį)	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	150x50	8,19	24,26	164,3	-0,83	44,7	Priešvėjinis	8,19	24,26	164,3	-0,73	44,3	Pavėjinis
	200x50	3,49	13,76	93,2	-0,63	33,9		3,49	13,76	93,2	-0,55	33,4	
	250x50	1,80	8,87	60,1	-0,51	27,5		1,80	8,87	60,1	-0,44	26,7	
	300x50	1,05	6,21	42,0	-0,42	22,6		1,05	6,21	42,0	-0,37	22,4	
	350x50	0,67	4,60	31,1	-0,37	19,9		0,67	4,60	31,1	-0,32	19,4	
	150x50	7,85	24,32	143,9	-0,83	49,2		7,85	24,32	143,9	-0,73	48,6	
	200x50	3,35	13,80	81,7	-0,63	37,3		3,35	13,80	81,7	-0,55	36,6	
	250x50	1,73	8,91	53,1	-0,51	30,2		1,73	8,91	53,1	-0,45	30,0	
	300x50	1,01	6,24	37,9	-0,43	25,5		1,01	6,24	37,9	-0,37	24,7	
	350x50	0,64	4,62	28,5	-0,37	21,9		0,64	4,62	28,5	-0,32	21,3	
	150(50)x 50(12)	8,08	25,05	148,2	-1,20	71,1		8,08	25,05	148,2	-1,05	70,0	
	200(100)x 50(12)	3,74	15,44	91,4	-1,16	68,7		3,74	15,44	91,4	-1,02	60,4	
	250(150)x 50(12)	2,12	10,96	65,4	-1,13	66,9		2,12	10,96	65,4	-0,99	66,0	
	300(200)x 50(12)	1,36	8,42	51,2	-1,09	64,6		1,36	8,42	51,2	-0,96	64,0	
	350(250)x 50(12)	0,94	6,80	41,9	-1,06	62,8		0,94	6,80	41,9	-0,93	62	
Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{1 \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.													



14 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino lūinkio priklausomybė nuo sijos aukščio

Remiantis apskaičiuotų rezultatų duomenimis tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 17 lentelėje ir 14 pav., matome, kad sijų lūinkis mažėja didėjant sijų aukščiui. Lūinkis netiesiškai kinta priklausomai nuo aukščio, aukščiui padidėjus 2,33 karto (nuo 150 mm iki 350 mm) visų sijų lūinkis vidutiniškai sumažėjo 0,09 karto. Kai sijos aukštis 150 mm, didžiausias lūinkis pjautinės medienos sijos 8,19 cm (žalia kreivė), o kai sijos aukštis 350 mm, didžiausias lūinkis 2T-sijos 0,94 cm (violetinė kreivė).



15 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo išnaudojimo priklausomybė nuo sijos aukščio

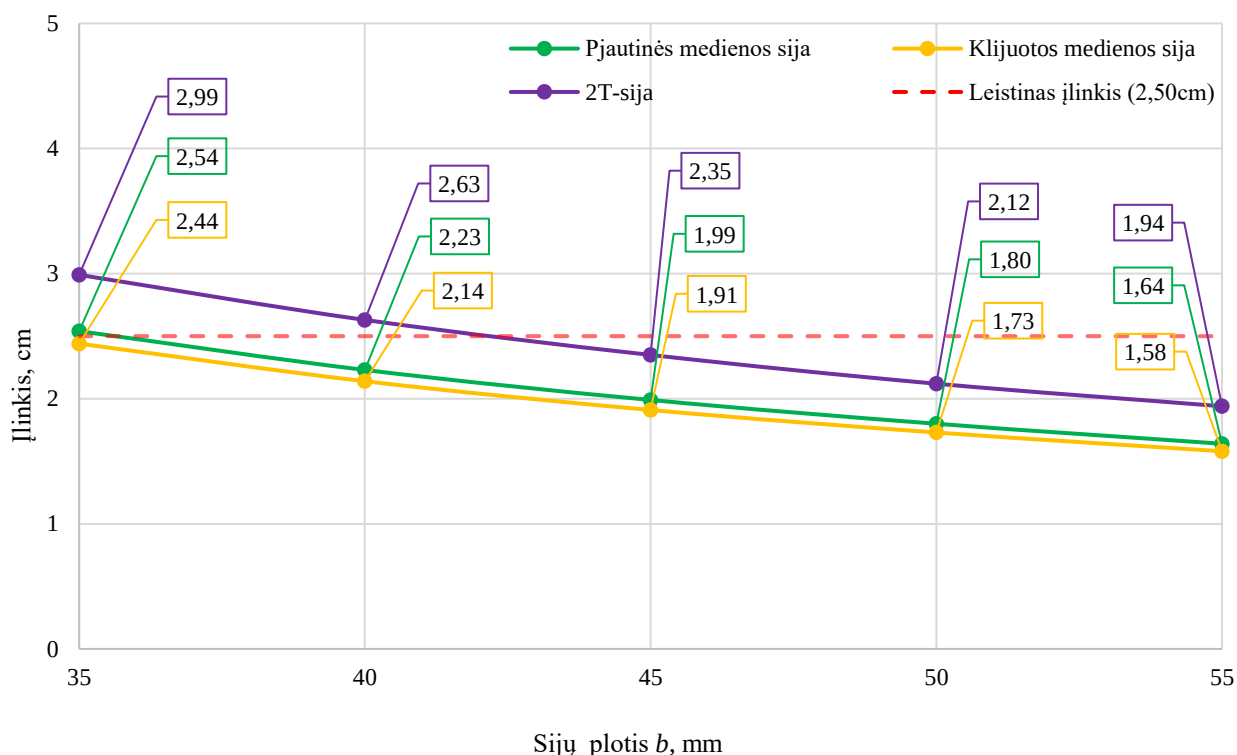
Remiantis apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 17 lentelėje ir 15 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas mažėja didinant sijų aukštį. Sijų stiprumas netiesiškai kinta priklausomai nuo sijos aukščio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų aukščio. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis viduryje, kai sijos aukštis nuo 150 mm – 200 mm, o galuose, kai sijų aukštis yra nuo 250 mm – 350 mm. Sijų aukščiui padidėjus 2,33 karto (nuo 150 mm iki 350 mm) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai sumažėjo nuo 152,13 % iki 40,8 %. Kai sijų aukštis 150 mm, didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienos sijos (žalia kreivė) – 164,3 %, kai aukštis 350 mm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 62,8 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 18 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 16 pav. ir 17 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos pločio, sijos tarpatramis - 5,00 m, sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

18 lentelė. Sijų skaičiuotinių, stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos pločio

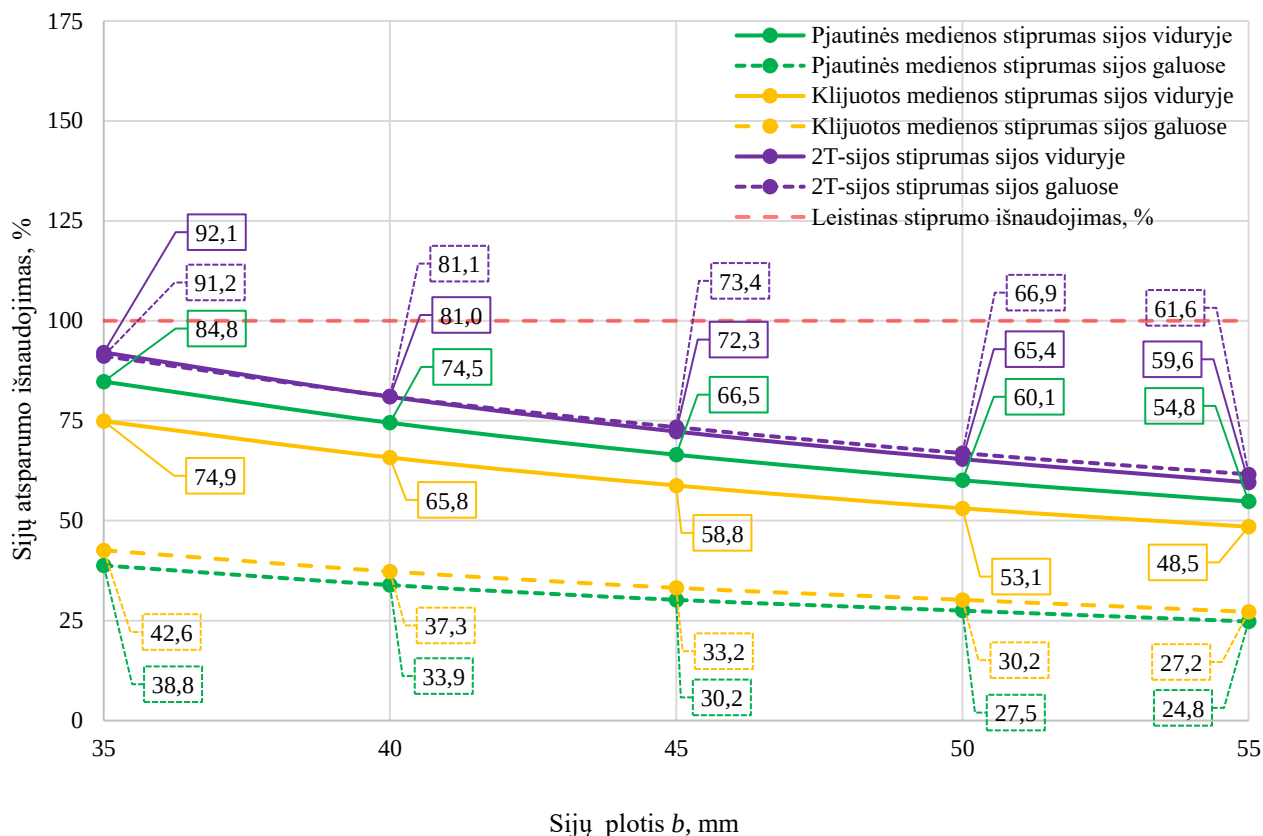
Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	D_j , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	α_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	α_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_j , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	α_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	α_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	250x35	2,54	12,53	84,8	-0,72	38,8	Priešvėjinis	2,54	12,53	84,8	-0,63	38,2	Pavėjinis
	250x40	2,23	11,01	74,5	-0,63	33,9		2,23	11,01	74,5	-0,55	33,4	
	250x45	1,99	9,82	66,5	-0,56	30,2		1,99	9,82	66,5	-0,49	29,7	
	250x50	1,80	8,87	60,1	-0,51	27,5		1,80	8,87	60,1	-0,44	26,7	
	250x55	1,64	8,10	54,8	-0,48	24,8		1,64	8,10	54,8	-0,40	24,3	
	250x35	2,44	12,56	74,9	-0,72	42,6		2,44	12,56	74,9	-0,63	42,0	
	250x40	2,14	11,04	65,8	-0,63	37,3		2,14	11,04	65,8	-0,55	36,6	
	250x45	1,91	9,86	58,8	-0,56	33,2		1,91	9,86	58,8	-0,49	32,6	
	250x50	1,73	8,91	53,1	-0,51	30,2		1,73	8,91	53,1	-0,45	30,0	
	250x55	1,58	8,13	48,5	-0,46	27,2		1,58	8,13	48,5	-0,41	27,3	
	250(150)x 35x50(12)	2,99	15,45	92,1	-1,54	91,2		2,99	15,45	92,1	-1,35	90,0	
	250(150)x 40x50(12)	2,63	13,59	81,0	-1,37	81,1		2,63	13,59	81,0	-1,20	80,0	
	250(150)x 45x50(12)	2,35	12,13	72,3	-1,24	73,4		2,35	12,13	72,3	-1,08	72,0	
	250(150)x 50(12)	2,12	10,96	65,4	-1,13	66,9		2,12	10,96	65,4	-0,99	66,0	
	250(150)x 55x50(12)	1,94	10,00	59,6	-1,04	61,6		1,94	10,00	59,6	-0,91	60,6	

Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{I \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.													



16 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos pločio

Remiantis apskaičiuotų rezultatų duomenimis tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 18 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 16 pav., matome, kad sijų įlinkis mažėja didėjant sijų pločiui. Įlinkis tiesiškai kinta priklausomai nuo pločio, pločiui padidėjus 1,57 karto (nuo 35 mm iki 55 mm) visų sijų įlinkis vidutiniškai sumažėjo 0,65 karto. Kai sijos plotis 35 mm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 2,99 cm (violetinė kreivė), o kai sijos plotis 55 mm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 1,94 cm (violetinė kreivė).



17 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos pločio

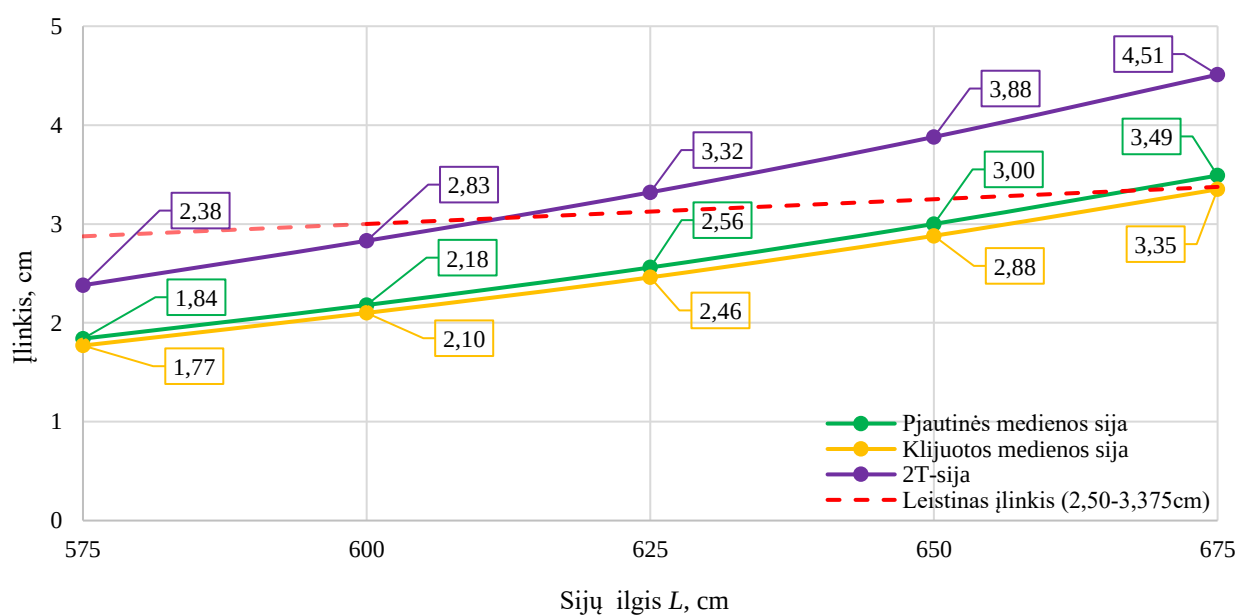
Remiantis apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 18 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 17 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas mažėja didinant sijų plotį. Sijų stiprumas tiesiškai kinta priklausomai nuo sijos aukščio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų pločio. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis viduryje, kai sijos plotis nuo 35 mm, o galuose, kai sijų plotis yra nuo 40 mm – 55 mm. Sijų pločiui padidėjus 1,57 karto (nuo 35 mm iki 55 mm) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai sumažėjo nuo 83,93 % iki 54,97 %. Kai sijų plotis 35 mm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 92,1 %, kai plotis 55 mm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 61,6 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 19 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 18 pav. ir 19 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos ilgio. Sijos tarpatais didinamas po 0,25 m, nuo 5,75 m – 6,75 m, sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

19 lentelė. Sijų skaičiuotinų įrašų, stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos ilgio/tarpatramio

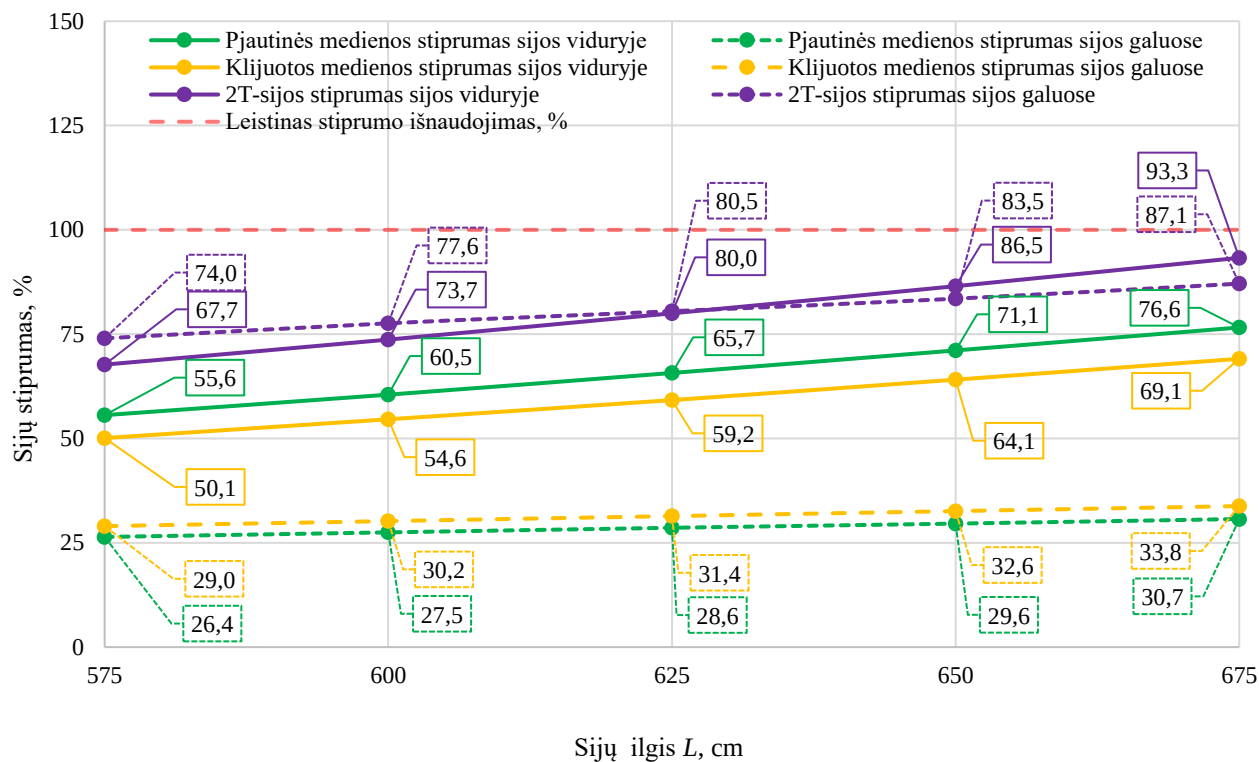
Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	Sijos ilgis, cm	D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	300x50	575	1,84	8,21	55,6	-0,49	26,4	Priešvėjinis	1,84	8,21	55,6	-0,43	26,1	Pavėjinis
		600	2,18	8,94	60,5	-0,51	27,5		2,18	8,94	60,5	-0,45	27,3	
		625	2,56	9,70	65,7	-0,53	28,6		2,56	9,70	65,7	-0,47	28,5	
		650	3,00	10,50	71,1	-0,55	29,6		3,00	10,50	71,1	-0,48	29,1	
		675	3,49	11,32	76,6	-0,57	30,7		3,49	11,32	76,6	-0,50	30,3	
	300x50	575	1,77	8,25	50,1	-0,49	29,0		1,77	8,25	50,1	-0,43	28,7	
		600	2,10	8,99	54,6	-0,51	30,2		2,10	8,99	54,6	-0,45	30,0	
		625	2,46	9,75	59,2	-0,53	31,4		2,46	9,75	59,2	-0,47	31,3	
		650	2,88	10,55	64,1	-0,55	32,6		2,88	10,55	64,1	-0,49	32,6	
		675	3,35	11,37	69,1	-0,57	33,8		3,35	11,37	69,1	-0,51	34,0	
	300(150)x50(12)	575	2,38	11,14	67,7	-1,25	74,0		2,38	11,14	67,7	-1,10	73,3	
		600	2,83	12,13	73,7	-1,31	77,6		2,83	12,13	73,7	-1,15	76,6	
		625	3,32	13,16	80,0	-1,36	80,5		3,32	13,16	80,0	-1,20	80,0	
		650	3,88	14,23	86,5	-1,41	83,5		3,88	14,23	86,5	-1,25	83,3	
		675	4,51	15,35	93,3	-1,47	87,1		4,51	15,35	93,3	-1,30	86,6	

Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{I \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.



18 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo ilgio

Apskaičiuoti rezultatai tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 19 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 18 pav., matome, kad sijų įlinkis didėja didėjant sijų ilgiui. Įlinkis tiesiškai kinta priklausomai nuo ilgio, ilgiui padidėjus 1,17 karto (nuo 575 cm iki 675 cm) visų sijų įlinkis vidutiniškai padidėjo 1,89 karto. Kai sijos ilgis 575 cm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 2,38 cm (violetinė kreivė), o kai sijos ilgis 675 cm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 4,51 cm (violetinė kreivė).



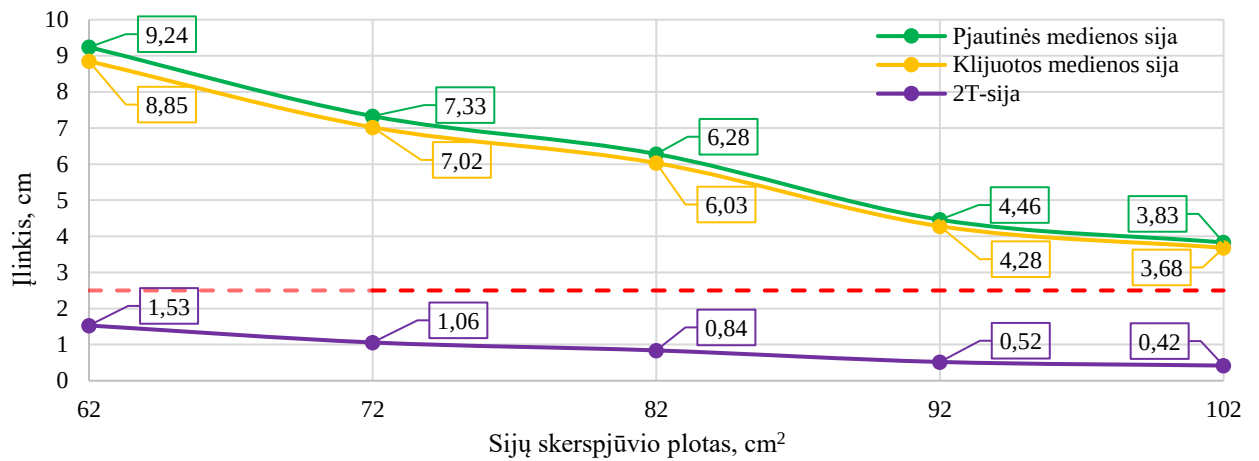
19 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos ilgio

Remiantis apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 19 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 19 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas didėja didinant sijų ilgį. Sijų stiprumas tiesiškai kinta priklausomai nuo sijos ilgio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų ilgio. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis viduryje, kai sijos ilgis 650 cm ir 675 cm, o galuose, kai ilgis yra nuo 575 cm – 625 cm. Sijų ilgiui padidėjus 1,17 karto (nuo 575 cm iki 675 cm) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai padidėjo nuo 59,9 % iki 79,67 %. Kai sijų ilgis 575 cm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 74,0 %, kai ilgis 675 cm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 93,3 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 20 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 20 pav. ir 21 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos skerspjuvio ploto. Sijos skerspjuvio plotas didinamas po 0,10 cm², nuo 62 cm² – 102 cm², sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

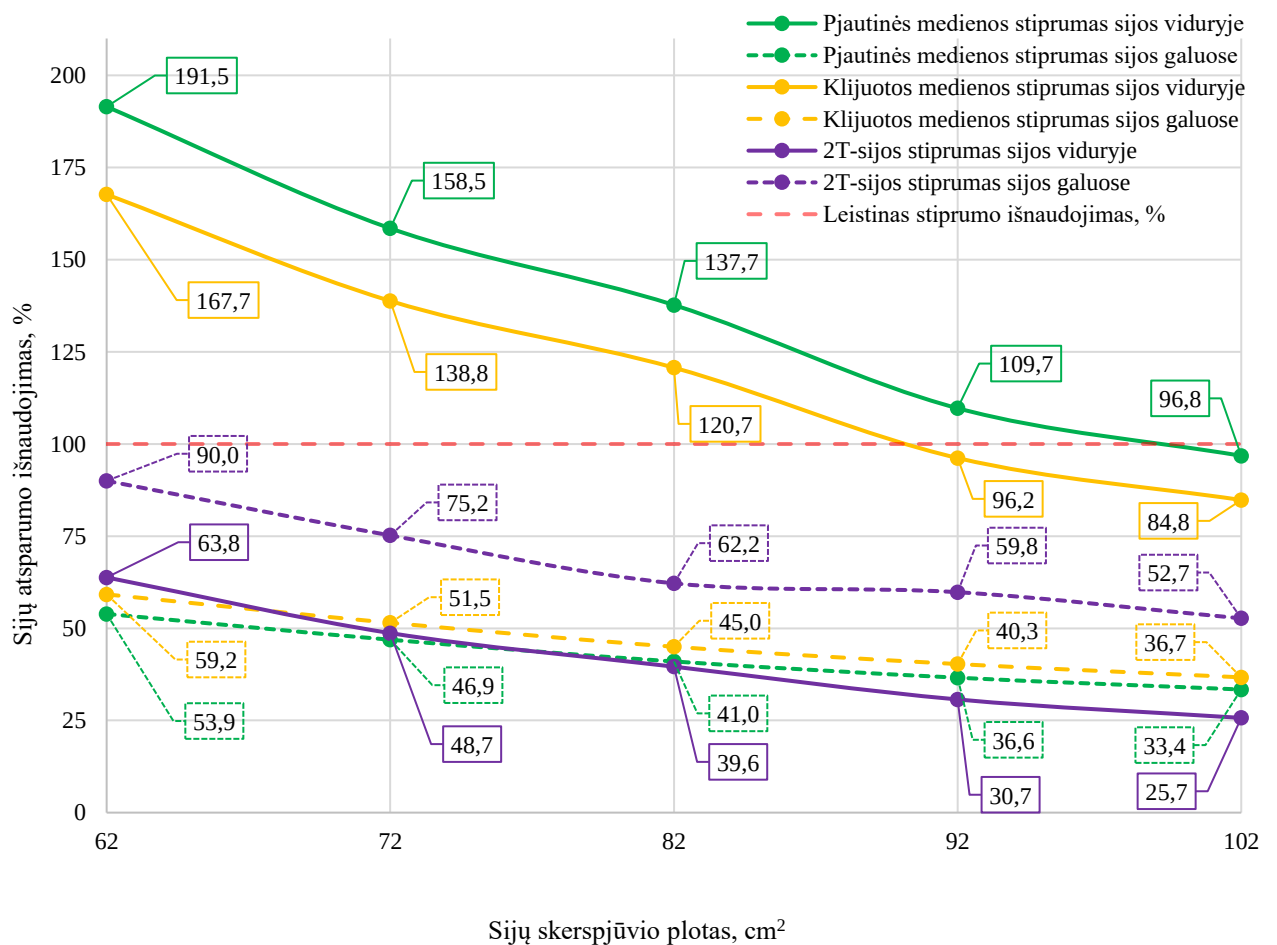
20 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto

Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	Sijos skerspjūvis, cm ²	<i>D_y</i> , cm	<i>σ_{I max}</i> , MPa	<i>a₁</i> , %	<i>τ_{max}</i> , MPa	<i>a₂</i> , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis <i>D_y</i> , cm	<i>σ_{I max}</i> , MPa	<i>a₁</i> , %	<i>τ_{max}</i> , MPa	<i>a₂</i> , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	155x40	62	9,24	28,29	191,5	-1,00	53,9	Priešvėjinis	9,24	28,29	191,5	-0,88	53,4	Pavėjinis
	161,8x44,5	72	7,33	23,41	158,5	-0,87	46,9		7,33	23,41	158,5	-0,76	46,1	
	164x50	82	6,28	20,34	137,7	-0,76	41,0		6,28	20,34	137,7	-0,67	40,7	
	184x50	92	4,46	16,21	109,7	-0,68	36,6		4,46	16,21	109,7	-0,60	36,4	
	188,9x54	102	3,83	14,29	96,8	-0,62	33,4		3,83	14,29	96,8	-0,54	32,8	
	155x40	62	8,85	28,34	167,7	-1,00	59,2		8,85	28,34	167,7	-0,88	58,6	
	161,8x44,5	72	7,02	23,46	138,8	-0,87	51,5		7,02	23,46	138,8	-0,76	50,6	
	164x50	82	6,03	20,40	120,7	-0,76	45,0		6,03	20,40	120,7	-0,67	44,6	
	184x50	92	4,28	16,26	96,2	-0,68	40,3		4,28	16,26	96,2	-0,60	40,0	
	188,9x54	102	3,68	14,33	84,8	-0,62	36,7		3,68	14,33	84,8	-0,54	36,0	
	330(250)x40(12)	62	1,53	10,40	63,8	-1,52	90		1,53	10,40	63,8	-1,33	88,6	
	359(270)x44.5(12)	72	1,06	7,87	48,7	-1,27	75,2		1,06	7,87	48,7	-1,11	74,0	
	367(267)x50(12)	82	0,84	6,38	39,6	-1,05	62,2		0,84	6,38	39,6	-0,92	61,3	
	450(350)x50(12)	92	0,52	4,86	30,7	-1,01	59,8		0,52	4,86	30,7	-0,88	58,6	
	472(364)x54(12)	102	0,42	4,05	25,7	-0,89	52,7		0,42	4,05	25,7	-0,78	52,0	
Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: <i>D_y</i> – apskaičiuotas įlinkis; <i>σ_{I max}</i> – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; <i>τ_{max}</i> – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; <i>a₁</i> – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; <i>a₂</i> – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.														



20 pav. Sijų skaičiuotinių įlinkių ir leistinų priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto

Apskaičiuoti rezultatai tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 20 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 20 pav., matome, kad sijų įlinkis mažėja didėjant sijų skerspjūvio plotui. Įlinkis netiesiškai kinta priklausomai nuo skerspjūvio ploto. Skerspjūvio plotui padidėjus 1,65 karto (nuo 62 cm² iki 102 cm²) visų sijų įlinkis vidutiniškai sumažėjo 0,40 karto. Kai sijos skerspjūvio plotas 62 cm², didžiausias įlinkis pjautinės medienos sijos 9,24 cm (žalia kreivė), o kai sijos skerspjūvio plotas 102 cm², didžiausias įlinkis pjautinės medienos sijos 3,83 cm (žalia kreivė).



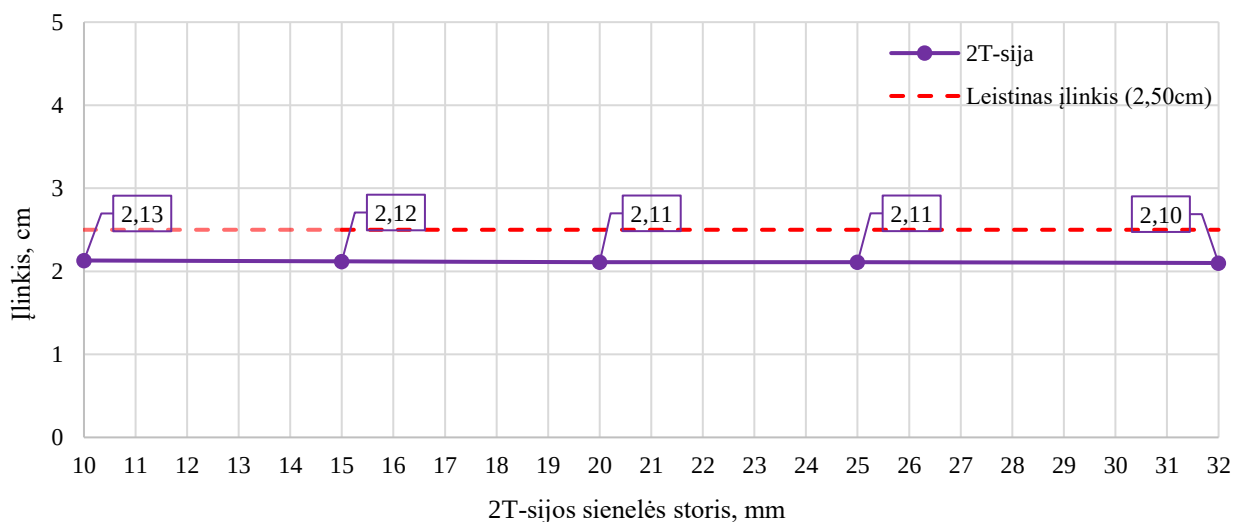
21 pav. Sijų skaičiuotinio stiprumo ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos skerspjūvio ploto

Apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 20 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 21 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas mažėja didinant sijų skerspjūvio plotą. Sijų stiprumas netiesiškai kinta priklausomai nuo sijos skerspjūvio ploto. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų skerspjūvio ploto. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis šiuo atveju tik sijos galuose, kai sijos skerspjūvio plotas nuo 62 cm² iki 102 cm², sijos viduryje stiprumas nevertinamas. Sijų skerspjūvio plotui padidėjus 1,65 karto (nuo 62 cm² iki 102 cm²) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai sumažėjo nuo 149,73 % iki 78,10 %. Kai sijų skerspjūvio plotas 62 cm², didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienis sijos (žalia kreivė) – 191,5 %, kai skerspjūvio plotas 102 cm², didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienis sijos (žalia kreivė) – 96,8 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 21 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 22 pav. ir 23 pav., kai 2T-sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos sienelės storio. 2T-sijos sienelės storis didinamas nuo 10 mm – 32 mm, sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

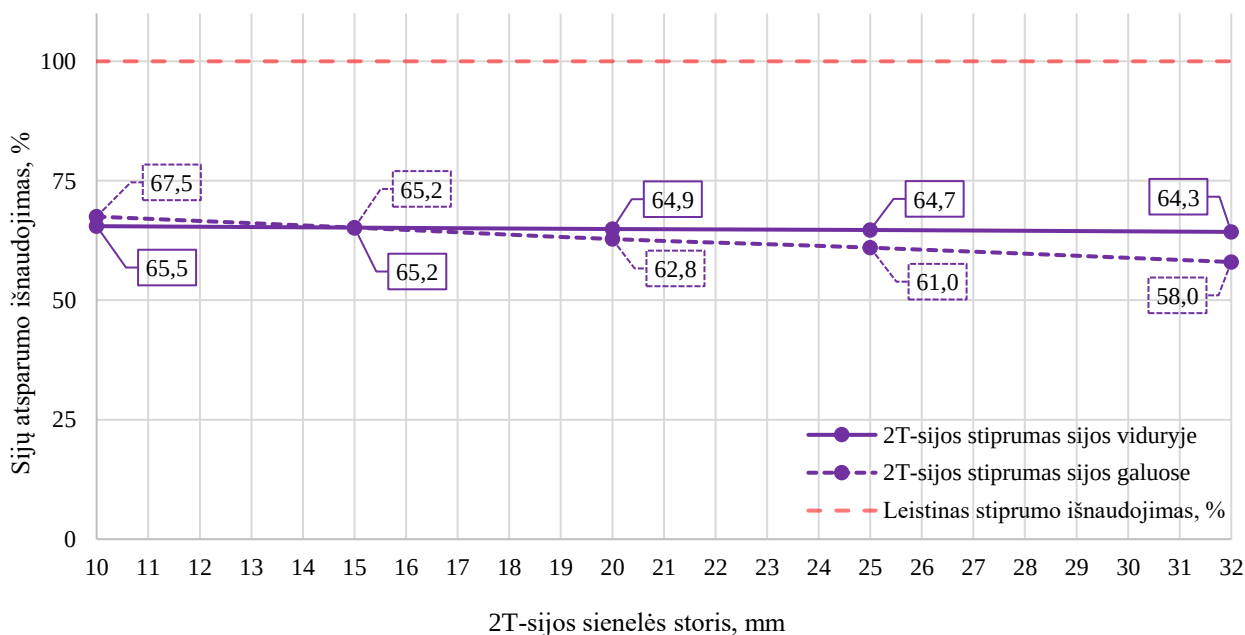
21 lentelė. 2T-Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio

Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	250(150)x50(10)	2,13	10,98	65,5	-1,14	67,5	Priešvėjinis	2,13	10,98	65,5	-1,00	66,6	Pavėjinis
	250(150)x50(15)	2,12	10,93	65,2	-1,10	65,2		2,12	10,93	65,2	-0,97	64,6	
	250(150)x50(20)	2,11	10,89	64,9	-1,06	62,8		2,11	10,89	64,9	-0,93	62,0	
	250(150)x50(25)	2,11	10,85	64,7	-1,03	61,0		2,11	10,85	64,7	-0,90	60,0	
	250(150)x50(32)	2,10	10,79	64,3	-0,98	58,0		2,10	10,79	64,3	-0,86	57,3	
Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{I \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.													



22 pav. 2T-Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio

Apskaičiuoti rezultatai tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 21 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 22 pav., matome, kad sijų įlinkis mažėja didėjant 2T-sijos sienelės storiui. Įlinkis tiesiškai kinta priklausomai nuo 2T-sijos sienelės storio. 2T-sijos sienelės storiui padidėjus 3,20 karto (nuo 10 mm iki 32 mm) sijų įlinkis vidutiniškai sumažėjo 0,99 karto. Kai sijos sienelės storis 10 mm, didžiausias įlinkis 2,13 cm, o kai sienelės storis 32 mm, didžiausias įlinkis 2,10 cm.



23 pav. 2T-Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo 2T-sijos sienelės storio

Apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 21 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 23 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas mažėja didinant 2T-sijų sienelės storį. Sijų stiprumas tiesiškai kinta priklausomai nuo 2T-sijos sienelės storio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis sijos galuose, kai sijos sienelės storis 10 mm, sijos viduryje stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis sijos viduryje, kai sijos

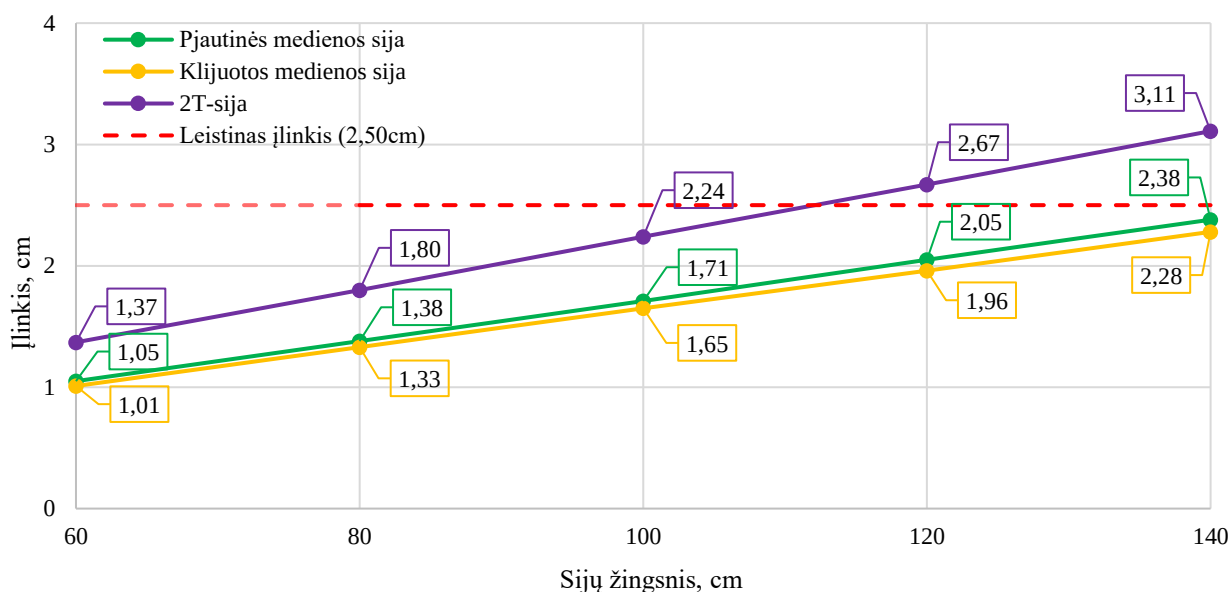
sielės storis yra nuo 20 mm iki 32 mm. 2T-sijų sienelių storiui padidėjus 3,20 karto (nuo 10 mm iki 32 mm) sijų stiprumo išnaudojimas sumažėjo nuo 67,5 % iki 64,3 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 22 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 24 pav. ir 25 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos žingsnio. Sijų žingsnis didinamas po 20 cm, nuo 60 cm – 140 cm, kai sijų matmenys 300x50. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras – šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

22 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos žingsnio

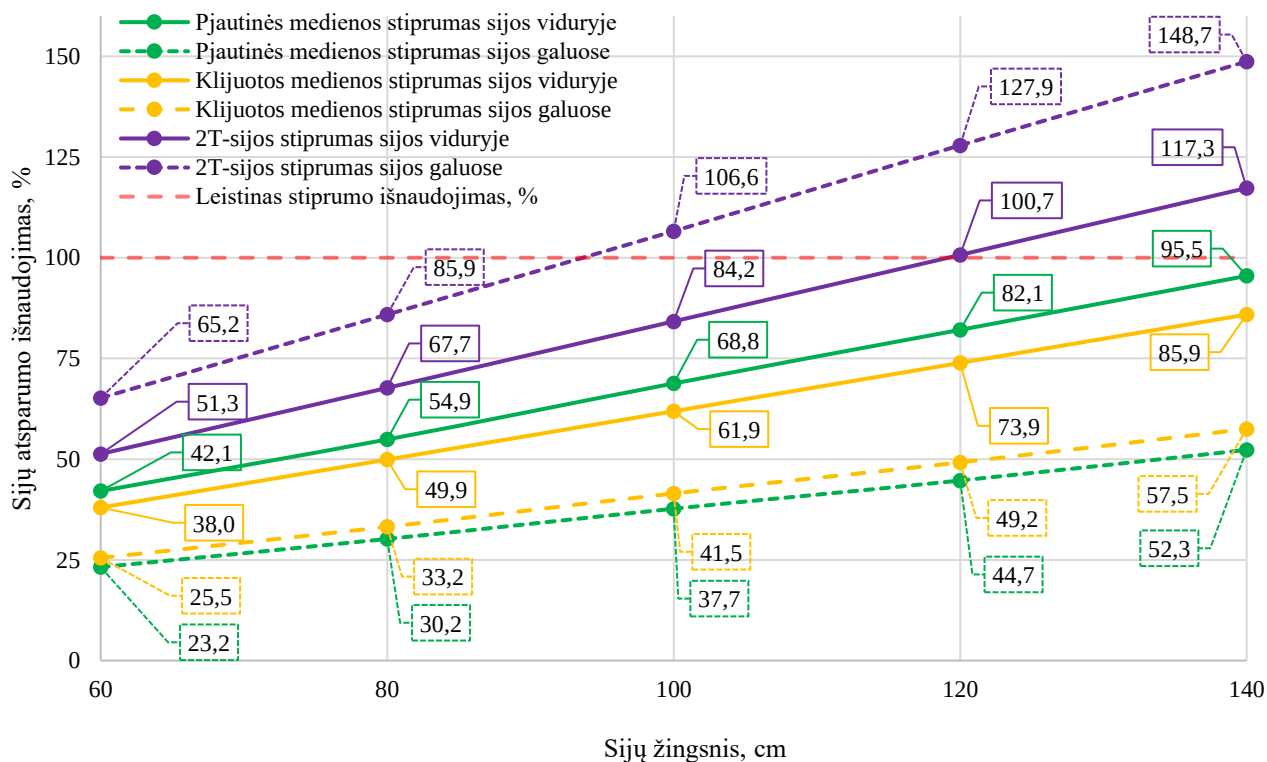
Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	Sijos žingsnis, cm	D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	300x50	60	1,05	6,22	42,1	-0,43	23,2	Priešvėjinis	1,05	6,22	42,1	-0,37	22,4	Pavėjinis
		80	1,38	8,19	54,9	-0,56	30,2		1,38	8,19	54,9	-0,49	29,7	
		100	1,71	10,16	68,8	-0,70	37,7		1,71	10,16	68,8	-0,61	37,0	
		120	2,05	12,13	82,1	-0,83	44,7		2,05	12,13	82,1	-0,73	44,3	
		140	2,38	14,11	95,5	-0,97	52,3		2,38	14,11	95,5	-0,85	51,6	
	300x50	60	1,01	6,25	38,0	-0,43	25,5		1,01	6,25	38,0	-0,37	24,7	
		80	1,33	8,22	49,9	-0,56	33,2		1,33	8,22	49,9	-0,49	32,6	
		100	1,65	10,19	61,9	-0,70	41,5		1,65	10,19	61,9	-0,61	40,6	
		120	1,96	12,16	73,9	-0,83	49,2		1,96	12,16	73,9	-0,73	48,6	
		140	2,28	14,14	85,9	-0,97	57,5		2,28	14,14	85,9	-0,85	56,6	
	300(200)x50(12)	60	1,37	8,44	51,3	-1,10	65,2		1,37	8,44	51,3	-0,96	64,0	
		80	1,80	11,15	67,7	-1,45	85,9		1,80	11,15	67,7	-1,27	84,6	
		100	2,24	13,86	84,2	-1,80	106,6		2,24	13,86	84,2	-1,58	105,3	
		120	2,67	16,58	100,7	-2,16	127,9		2,67	16,58	100,7	-1,89	125,9	
		140	3,11	19,31	117,3	-2,51	148,7		3,11	19,31	117,3	-2,20	146,6	

Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{I \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.



24 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos žingsnio

Apskaičiuoti rezultatai tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 22 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 24 pav., matome, kad sijų įlinkis didėja, didėjant sijų žingsniui. Įlinkis tiesiškai kinta priklausomai nuo sijų žingsnio. Sijų žingsniui padidėjus 2,33 karto (nuo 60 cm iki 140 cm) visų sijų įlinkis vidutiniškai padidėjo 2,27 karto. Kai sijų žingsnis 60 cm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 1,37 cm (violetinė kreivė), o kai sijų žingsnis 140 cm, didžiausias įlinkis 2T-sijos 3,11 cm (violetinė kreivė).



25 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos žingsnio

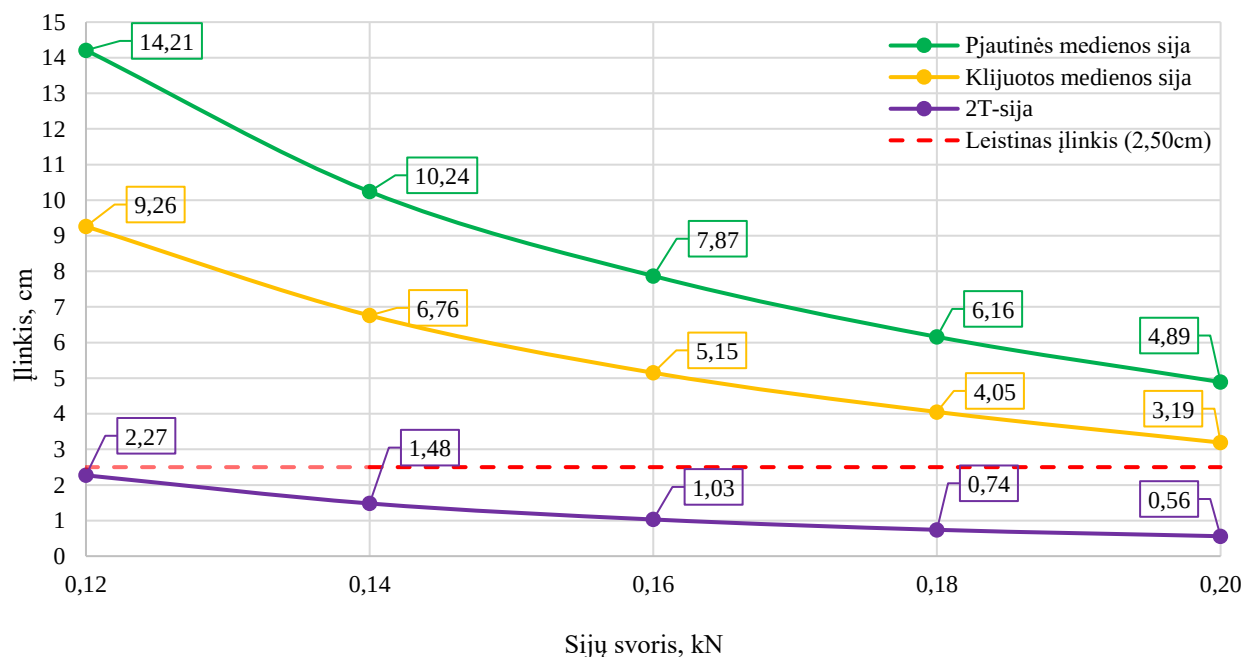
Apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 22 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 25 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas didėja didinant sijų žingsnį. Sijų stiprumas tiesiškai kinta priklausomai nuo sijų žingsnio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų žingsnio. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis šiuo atveju tik sijos galuose, kai sijos žingsnis yra nuo 60 cm iki 140 cm, sijos viduryje stiprumas nevertinamas. Sijų žingsniui padidėjus 2,33 karto (nuo 60 cm iki 140 cm) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai padidėjo nuo 48,43 % iki 110,03 %. Kai sijų žingsnis 60 cm, didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienos sijos (violetinė kreivė) – 65,2 %, kai sijų žingsnis 140 cm, didžiausias stiprumo išnaudojimas 2T-sijos (violetinė kreivė) – 148,7 %.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikiami 23 lentelėje, rezultatai grafiškai atvaizduojami ir pateikiami 26 pav. ir 27 pav., kai sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos svorio. Sijų svoris didinamas po 0,02 kN, nuo 0,12 kN – 0,2 kN, sijų žingsnis - 0,60 m. Sijų galų įtvirtinimai: vienas galas įtvirtintas šarnyriškai neslankiai, o antras - šarnyriškai paslankus horizontalia kryptimi.

23 lentelė. Sijų skaičiuotinių stiprumų ir standumų priklausomybė nuo sijos svorio

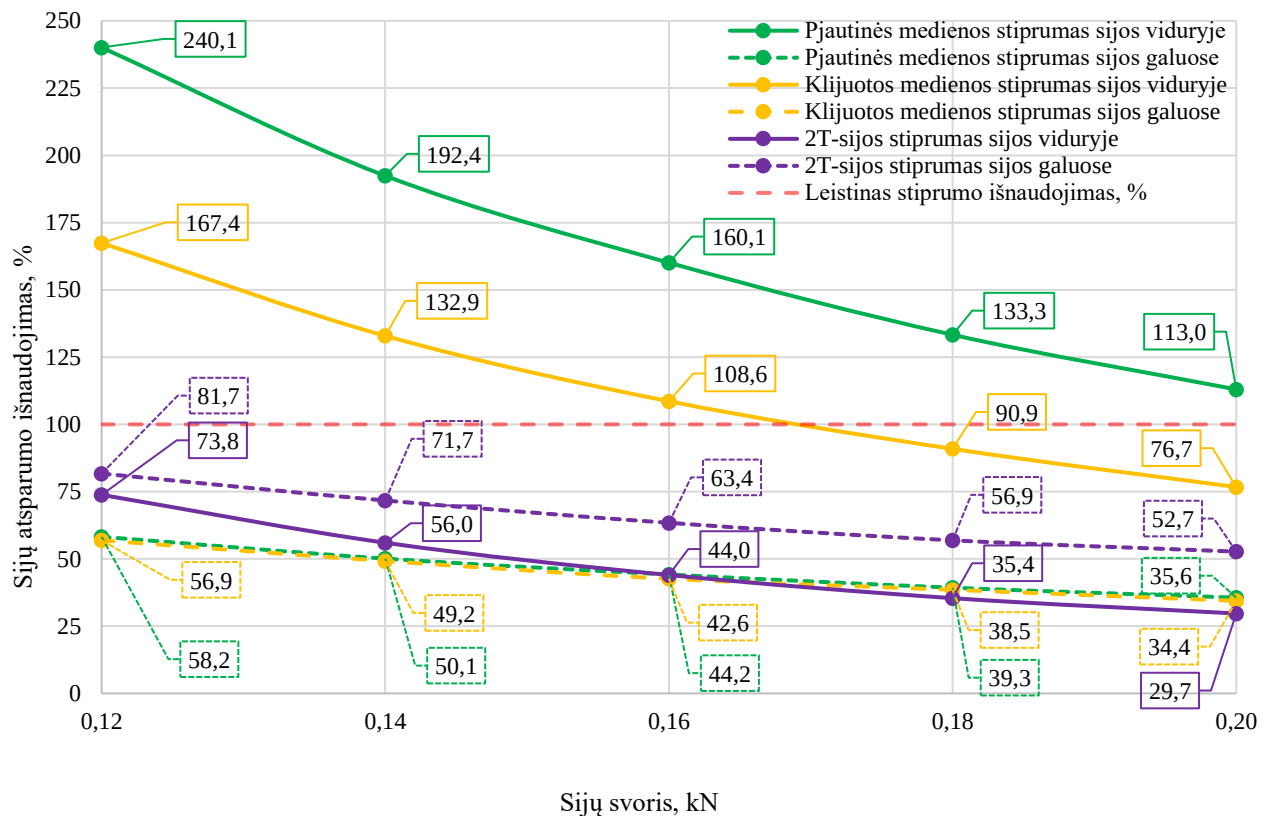
Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	Sijos svoris, kN	D_j , cm	$\sigma_{1 \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas ilkinis D_j , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
	130x44	0,12	14,21	36,50	240,1	-1,08	58,2	Priešvėjinis	14,21	36,50	240,1	-0,95	57,6	Pavėjinis
	142x47	0,14	10,24	28,73	192,4	-0,93	50,1		10,24	28,73	192,4	-0,82	49,8	
	152x50	0,16	7,87	23,64	160,1	-0,82	44,2		7,87	23,64	160,1	-0,72	43,7	
	162x53	0,18	6,16	19,69	133,3	-0,73	39,3		6,16	19,69	133,3	-0,64	38,8	
	173x55	0,20	4,89	16,69	113,0	-0,66	35,6		4,89	16,69	113,0	-0,58	35,2	
	148x44	0,12	9,26	28,29	167,4	-0,96	56,9		9,26	28,29	167,4	-0,84	56,0	
	161x47	0,14	6,76	22,46	132,9	-0,83	49,2		6,76	22,46	132,9	-0,72	48,0	
	173x50	0,16	5,15	18,36	108,6	-0,72	42,6		5,14	18,36	108,6	-0,64	42,6	
	184x53	0,18	4,05	15,37	90,9	-0,65	38,5		4,05	15,37	90,9	-0,57	38,0	
	197x55	0,20	3,19	12,97	76,7	-0,58	34,4		3,19	12,97	76,7	-0,51	34,0	
	263(175)x44(12)	0,12	2,27	12,31	73,8	-1,38	81,7		2,27	12,31	73,8	-1,21	80,6	
	301(207)x47(12)	0,14	1,48	9,21	56,0	-1,21	71,7		1,48	9,21	56,0	-1,06	70,6	
	337(237)x50(12)	0,16	1,03	7,16	44,0	-1,07	63,4		1,03	7,16	44,0	-0,94	62,6	
	373(267)x53(12)	0,18	0,74	5,70	35,4	-0,96	56,9		0,74	5,70	35,4	-0,84	56,0	
	410(300)x55(12)	0,20	0,56	4,74	29,7	-0,89	52,7		0,56	4,74	29,7	-0,78	52,0	

Sijos skerspjūvis	Sijos pagr. matmenys, mm	Sijos svoris, kN	D_y , cm	$\sigma_{1 \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius F - H	Apskaičiuotas įlinkis D_y , cm	$\sigma_{I \max}$, MPa	a_1 , %	$\tau_{\max}$, MPa	a_2 , %	Vėjo apkrovos paviršius J - I
Pastaba: Sutartiniai lentelės žymėjimai: D_y – apskaičiuotas įlinkis; $\sigma_{1 \max}$ – apskaičiuoti maksimalūs suminiai (lenkimo ir ašiniai) įtempiai sijos viduryje; $\tau_{\max}$ – apskaičiuoti maksimalūs tangentiniai (šlyties) įtempiai sijos galuose; a_1 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos viduryje; a_2 – apskaičiuotas sijos skerspjūvio atsparumo išnaudojimas, kai sijos stiprumas apskaičiuojamas sijos galuose.														



26 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino įlinkio priklausomybė nuo sijos svorio

Apskaičiuoti rezultatai tinkamumo ribiniams būviams, kurie pateikti 23 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 26 pav., matome, kad sijų įlinkis mažėja didėjant sijų svoriui. Įlinkis netiesiškai kinta priklausomai nuo sijų svorio. Sijų svoriui padidėjus 1,67 karto (nuo 0,12 kN iki 0,2 kN) visų sijų įlinkis vidutiniškai sumažėjo 0,34 karto. Kai sijų svoris 0,12 kN, didžiausias įlinkis pjautinės medienos 14,21 cm (žalia kreivė), o kai sijų svoris 0,2 kN, didžiausias įlinkis pjautinės medienos sijos 4,89 cm (žalia kreivė).



27 pav. Sijų skaičiuotino ir leistino stiprumo priklausomybė nuo sijos svorio

Apskaičiuotų rezultatų duomenimis saugos ribiniams būviams, kurie pateikti 23 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 27 pav., matyti, kad sijų stiprumo išnaudojimas mažėja didinant sijų svorį. Sijų stiprumas netiesiškai kinta priklausomai nuo sijų svorio. Projektuojant medines sijas saugos ribiniams būviams, vertinamas sijų stiprumo išnaudojimas tas, kuris yra pavojingesnis, t.y. sijos galuose arba viduryje. Šiuo atveju matyti, kad pjautinės ir klijuotos medinių stiprumo išnaudojimas didesnis yra sijos viduryje nepriklausomai nuo sijų žingsnio. 2T-sijos stiprumo išnaudojimas yra pavojingesnis šiuo atveju tik sijos galuose, kai sijos svoris yra nuo 0,12 kN iki 0,20 kN, sijos viduryje stiprumas nelyginamas. Sijų svoriui padidėjus 1,67 karto (nuo 0,12 kN iki 0,20 kN) visų sijų stiprumo išnaudojimas vidutiniškai sumažėjo nuo 163,07 % iki 80,80 %. Kai sijų svoris 0,12 kN, didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienos sijos (žalia kreivė) – 240,1 %, kai sijų svoris 0,20 kN, didžiausias stiprumo išnaudojimas pjautinės medienos sijos (žalia kreivė) – 113 %.

Išvados

1. Didinant sijų skerspjūvio aukštį sijų standumas didėja (įlinkis mažėja), o atsparumo išnaudojimas mažėja (didėja atsarga). Kai sijų plotis yra 50 mm, sijų aukštį padidinus 2,33 karto (t.y. nuo 150 mm iki 350 mm), sijų standumas vidutiniškai padidėja 10,72 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėja apie 3,73 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi klijuotos medienos sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu išnaudojimu 2T-sija. Skirtumas tarp šių sijų standumo, kai sijų gabaritiniai matmenys tokie pat, yra 1,35 karto, o skirtumas tarp išnaudojimų – 1,42 karto.
2. Didinant sijų skerspjūvio plotį sijų standumas didėja (įlinkis mažėja), o atsparumo išnaudojimas mažėja (didėja atsarga). Kai sijų aukštis yra 250 mm, sijų plotį padidinus 1,57 karto (t.y. nuo 35 mm iki 55 mm), sijų standumas vidutiniškai padidėja 1,54 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėja apie 1,53 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi klijuotos medienos sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu išnaudojimu – 2T-sija. Skirtumas tarp šių sijų standumo, kai sijų gabaritiniai matmenys tokie pat, yra 1,23 karto, o skirtumas tarp išnaudojimų – 1,25 karto. Atliktas tyrimas su 2T-sija, didinant tik sijos sienelės storį, gauta, kad padidinus sienelės storį 3,20 karto (nuo 10 mm iki 32 mm), sijos standumas padidėjo 1,01 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėjo 1,05 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi 32 mm storio sienelė, o mažiausiu standumu ir didžiausiu atsparumo išnaudojimu – 10 mm storio sienelė.
3. Didinant sijų tarpatramį / ilgį sijų standumas mažėja (įlinkis didėja), o atsparumo išnaudojimas didėja (mažėja atsarga). Kai sijų plotis yra 50 mm, aukštis 300 mm, sijų tarpatramį padidinus 1,17 karto (t.y. nuo 575 cm iki 675 cm), sijų standumas vidutiniškai sumažėjo 0,53 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėja apie 0,75 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi klijuotos medienos sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu išnaudojimu 2T-sija. Skirtumas tarp šių sijų standumo, kai sijų gabaritiniai matmenys tokie pat, yra 1,35 karto, o skirtumas tarp išnaudojimų – 1,42 karto. Atlikus sijų stiprumo tyrimą, didinant sijų žingsnį 2,33 karto (nuo 60 cm iki 140 cm), gauta, kad sijų standumas sumažėjo 0,44 karto, o sijų atsparumo išnaudojimas padidėjo 0,44 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi klijuotos medienos sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu atsparumo išnaudojimu – 2T-sija. Standumo skirtumas tarp šių sijų 1,36 karto, o atsparumo išnaudojimas skiriasi 1,73 karto.
4. Didinant sijų skerspjūvio plotą (didinamas sijų aukštis ir plotis) sijų standumas didėja (įlinkis mažėja), o atsparumo išnaudojimas mažėja (didėja atsarga). Sijų skerspjūvio plotą padidinus 1,65 karto (t.y. nuo 62 cm² iki 102 cm²), sijų standumas vidutiniškai padidėja 2,82 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėja apie 1,89 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi 2T-sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu išnaudojimu pjautinės medienos sija. Skirtumas tarp šių sijų standumo, kai sijų gabaritiniai matmenys tokie pat, yra 7,58 karto, o skirtumas tarp išnaudojimų – 1,99 karto.
5. Didinant sijų skerspjūvio plotą (didinamas sijų svoris) sijų standumas didėja (įlinkis mažėja), o atsparumo išnaudojimas mažėja (didėja atsarga). Sijų skerspjūvio plotą padidinus 1,67 karto (t.y. nuo 0,12 kN iki 0,20 kN), sijų standumas vidutiniškai padidėja 3,29 karto, o atsparumo išnaudojimas sumažėja apie 1,95 karto. Didžiausiu standumu ir mažiausiu atsparumo išnaudojimu pasižymi 2T-sija, o mažiausiu standumu ir didžiausiu išnaudojimu pjautinės medienos sija. Skirtumas tarp šių sijų standumo, kai sijų gabaritiniai matmenys tokie pat, yra 7,50 karto, o skirtumas tarp išnaudojimų – 2,54 karto.

Literatūros sąrašas

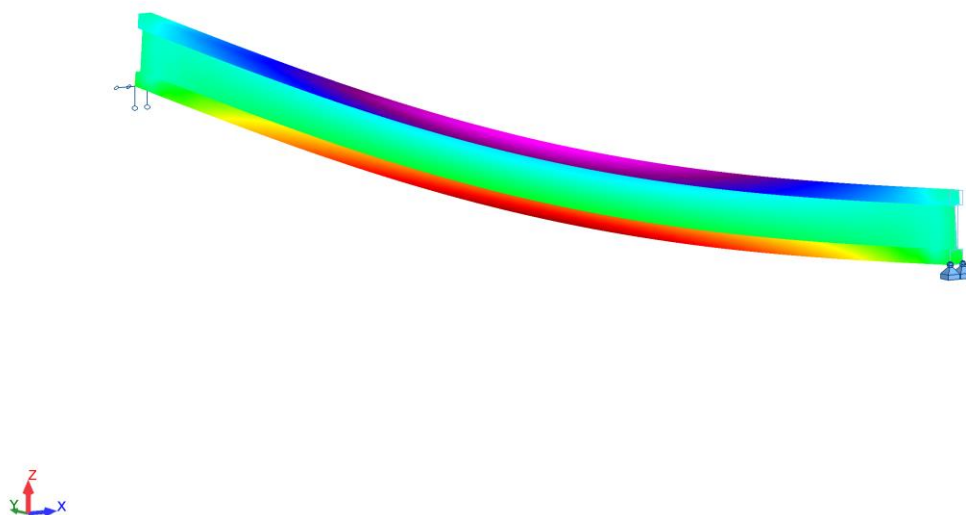
1. Anshari, B., Guan, Z. W., Kitamori, K., Jung, K., & Komatsu, K. (2012). Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. *Construction and Building Materials*, 29, 24-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.002>
2. ASA.lt. (2015 m. gruodžio 16 d.). Dvitėjinės sijos vietoj medinių gegnių: daugiau jėgos ir šilumos. Paimta 2022 m. kovo 15 d. iš <https://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/95/1/0/1/article/17876/dvitejines-sijos-vietoj-mediniu-gegnių-daugiau-jegos-ir-silumos>
3. Bakar, S. A., Saleh, A. L., & Mohamed, Z. B. (2004). Factors affecting ultimate strength of solid and glulam timber beams. *J Kejuruteraan Awam*, 16(1), 37-47.
4. Bhkari, N. M., Bakar, A. A., Tahir, P. M., & Ahmad, Z. (2012). Flexural strength of glued laminated timber beam from selected Malaysian tropical hardwood.
5. Brandner, R., & Schickhofer, G. (2014). Length effects on tensile strength in timber members with and without joints. *Materials and joints in timber structures*, 751-760. doi:10.1007/978-94-007-7811-5_67
6. Brokāns, A. (2013). The effect of timber properties on the behavior of bending elements under loadings. *Research for rural development 2013*. 2, p. 128-135. Jelgava: Latvia University of Agriculture.
7. Del Menezzi, C. H., & Souza, M. R. (2012). Flexural properties of wood I-beams flanged with tropical hardwoods. *Journal of Tropical Forest Science*, 24(3), 369–378.
8. Ding, Y., Zhou, Z., Huang, L., & Si, Y. (2021). Seismic performance of self-centering glulam frame with friction damper. *Engineering Structures*, 245. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112857>
9. Du, H., Hu, X., Han, G., & Shi, D. (2021). Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of glulam-concrete composite beams with interlayer. *Journal of Building Engineering*, 38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102193>
10. Du, H., Hu, X., Xie, Z., & Meng, Y. (2021). Experimental and analytical investigation on fire resistance of glulam-concrete composite beams. *Journal of Building Engineering*, 44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103244>
11. Fink, G., Kohler, J., & Frangi, A. (2013). Bending tests on glued laminated timber beams with well-known material properties. *IBK Bericht*, 350. doi:10.3929/ethz-a-009950793
12. Fiorelli, J., & Dias, A. A. (2003). Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. *Materials Research*, 6(2), 193-202.
13. Fischer, C., Vestøl, G. I., & Høibø, O. (2016). Modelling the variability of density and bending properties of Norway spruce structural timber. *Can J for Res*. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0022>. *Canadian Journal of Forest Research*. doi:10.1139/cjfr-2016-0022
14. Fischer, C., Vestøl, G. I., Øvrum, A., & Høibø, O. A. (2015). Pre-sorting of Norway spruce structural timber using acoustic measurements combined with site-, tree-and log characteristics. *Eur J Wood Prod*, 73, 819–828.
15. Gao, S., Zhou, L., Guo, L., Xu, M., & Guo, N. (2022). Temperature effect on mechanical performance of recycled glulam towards to sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 359. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132077>

16. Ghanbari-Ghazijahani, T., Russo, T., & Valipour, H. R. (2020). Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials. *Composite Structures*, 233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111579>
17. Gil-Moreno, D., Ridley-Ellis, D., & Mclean, P. (2016). Using the right modulus of elasticity to get the best grades out of softwood timber species in Great Britain. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016)*. Vienna.
18. Gil-Moreno, David; Ridley-Ellis, Dan; O'Ceallaigh, Conan; Harte, Annette M;. (2022). The relationship between bending and tension strength of Irish and UK spruce and pine. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, 585–596. doi:10.1007/s00107-022-01787-6
19. Guo, R., Xian, G., Li, F., Li, C., & Hong, B. (2022). Hygrothermal resistance of pultruded carbon, glass and carbon/glass hybrid fiber reinforced epoxy composites. *Construction and Building Materials*, 315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125710>
20. Hassan, O. A., Abdulahad, G., & Emad, N. A. (2022). A comparative study between glulam and concrete columns in view of design, economy and environment. *Case Studies in Construction Materials*, 16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00966>
21. Ido, H., Miyatake, A., Hiramatsu, Y., & Miyamoto, K. (2022). Effects of the presence or absence and the position of glued edge joints in the lamina on the shear strength of glued laminated timber. *J Wood Sci*, 68(55), 1-9. doi:<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02062-1>
22. Kazeroon, A. R., Ahmad, Z., & Bkhari, M. N. (2016). The Effect of Span Lengths on the Bending Strength Properties of Glued Laminated Timber Beam. *Proceedings of the International Civil*, 861-869.
23. Lycken, A., Ziethén, R., Olofsson, D., Fredriksson, M., Brüchert, F., Weidenhiller, A., & Broman, O. (2020). State of the art summary on industrial strength grading, including standards, RISE Report 2020:92. Stockholm: RISE Research Institutes of Sweden AB.
24. Lokaj, A., & Klajmonová, K. (2017). Problems of wood-based I-beams carrying capacity. *Procedia Engineering*, 190, 271-274.
25. Medžio bitės. ((n.d.)). Graduota mediena – profesionalų pasirinkimas. Paimta 2022 m. 03 15 d. iš <https://www.medziobites.lt/graduota-mediena-profesionalu-pasirinkimas>
26. Neubauerová, P. (2012). Timber Beams Strengthened by Carbon-Fiber Reinforced Lamellas. *Procedia Engineering*, 40, 292-297. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.097>
27. Nubissie, A., Ngamie, A. N., & Wofo, P. (2011). Dynamical behavior of a wooden beam under mechanical loading and fire. *Materials and Design*, 32. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.020>
28. Okamoto, S., Akiyama, N., Araki, Y., Aoki, K., & Inayama, M. (2022). Study on the strength of glued laminated timber beams with round holes: proposal of the design formula for the splitting strength. *Journal of Wood Science*, 68(6), 1-18. doi:<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02013-w>
29. Ong, C. B. (2015). Glue-laminated timber (Glulam). Esantis M. P. Ansell (Mont.), *Wood Composites* (p. 123-140). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00007-X>
30. Porteous, J. (2015). Composite section I-beams. Esantis M. P. Ansell (Mont.), *Wood Composites* (p. 169-193). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00009-3>
31. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, 11(10). doi:<https://doi.org/10.3390/polym11101667>

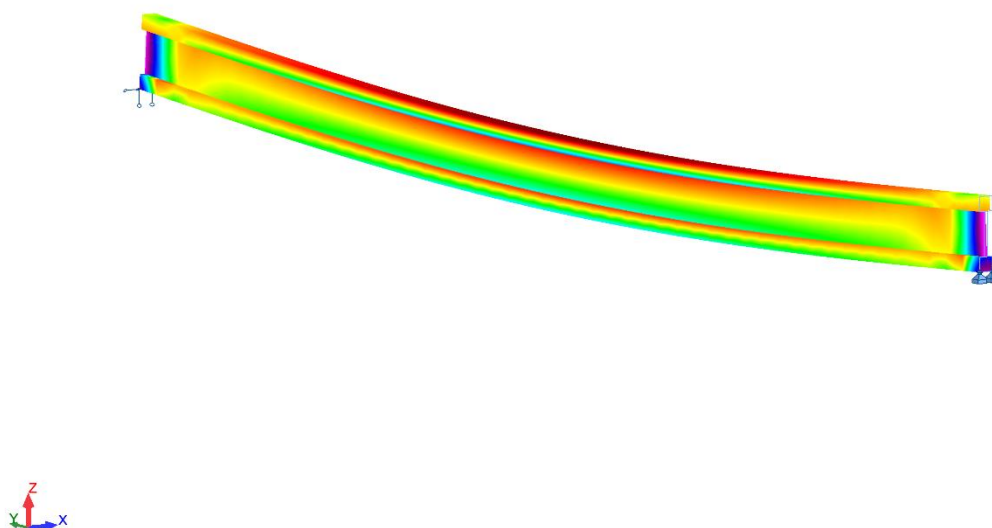
32. Ridley-Ellis, D., Gil-Moreno, D., & Harte, A. M. (2022). Strength grading of timber in the UK and Ireland in 2021. *International Wood Products Journal*, 13(2), 127-136. doi:10.1080/20426445.2022.2050549
33. Saad, K., & Lengyel, A. (2022). Strengthening Timber Structural Members with CFRP and GFRP: A State-of-the-Art Review. *Polymers*, 14. doi:https://doi.org/10.3390/polym14122381
34. Saladis, J., & Aleinikovas, M. (2004). Pušų medienos fizinių ir mechaninių savybių kintamumas bei korealiniai ryšiai tarp jų. *Miškininkystė*, 1(55), 60-67.
35. Schneeweiß, G., & Felber, A. (2013). Review on the bending strength of wood and influencing factors. *American journal of material science*, 3(3), 41-54.
36. Sciomenta, M., Spera, L., Peditto, A., Ciuffetelli, E., Savini, F., Bedon, C., . . . Fragiacomio, M. (2022). Mechanical characterization of homogeneous and hybrid beech-Corsican pine glue-laminated timber beams. *Engineering Structures*, 264. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114450
37. Stöd, R., Verkasalo, E., & Heinonen, J. (2016). Quality and bending properties of sawn timber from commercial thinnings of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Baltic Forestry*, 22, 148–162.
38. Timbolmas, C., Bravo, R., Rescalvo, F. J., & Gallego, A. (2022). Development of an analytical model to predict the bending behavior of composite glulam beams in tension and compression. *Journal of Building Engineering*, 45. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103471
39. Tuhkanen, E., Mölder, J., & Schickhofer, G. (2018). Influence of number of layers on embedment strength of dowel-type connections for glulam and cross-laminated timber. *Engineering Structures*, 176, 361-368. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.005
40. Vahedian, A., Shrestha, R., & Crews, K. (2019). Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. *Composites Part B*, 164, 377-389. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.007
41. Vida, C., Lukacevic, M., Eberhardsteiner, J., & Füssl, J. (2022). Modeling approach to estimate the bending strength and failure mechanisms of glued laminated timber beams. *Engineering Structures*, 255. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113862
42. Xian, G., Guo, R., & Li, C. (2022). Combined effects of sustained bending loading, water immersion and fiber hybrid mode on the mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composite. *Composite Structures*, 281. doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115060
43. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. EN 1995-1-1:2005. Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
44. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. EN 1991-3:2003. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-3 dalis. Bendrieji poveikiai. Sniego apkrovos. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
45. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. EN 1991-1:2004. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-3 dalis. Bendrieji poveikiai. Tankiai, savasis svoris, pastatų naudojimo apkrovos. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
46. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. EN 1991-1-4:2005. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-4 dalis. Bendrieji poveikiai. Vėjo poveikiai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

Priedai

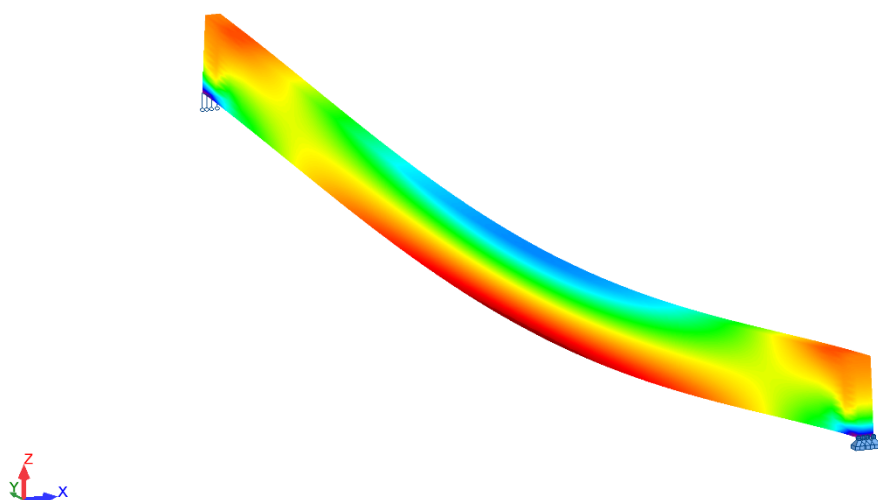
1 priedas. 2T-sijos stiprumo išnaudojimo schema, kai apkrovų poveikis sijai vertinamas sijos viduryje



2 priedas. 2T-sijos stiprumo išnaudojimo schema, kai apkrovų poveikis sijai vertinamas sijos galuose



3 priedas. Pjautinės ir klijuotos medinės sijos stiprumo išnaudojimo schema, kai apkrovų poveikis sijai vertinamas sijos viduryje



4 priedas. Pjautinės ir klijuotos medinės sijos stiprumo išnaudojimo schema, kai apkrovų poveikis sijai vertinamas sijos galuose

