

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Antanas Radzevičius

SLUOKSNIUOTŲJŲ SIJŲ ELEMENTŲ STANDUMO IR
STIPRUMO SĄRYŠIAI

Magistro darbas

Vadovas: doc. dr. A. Baltrušaitis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėja

Doc. dr. Vaida Jonaitienė

Antanas Radzevičius

**SLUOKSNIUOTŲJŲ SIJŲ ELEMENTŲ STANDUMO IR
STIPRUMO SĄRYŠIAI**

Medienos inžinerija (621J53001)

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas

Doc. dr. Antanas Baltrušaitis

Recenzentas

Doc. dr. Inga Juodeikienė

Atliko

DM – 3 gr. stud. Antanas Radzevičius

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Antanas Radzevičius

(Studento vardas, pavardė)

Medienos inžinerija (621J53001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Sluoksniuotųjų sijų elementų standumo ir stiprumo sąryšiai“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015m. Gegužės mėn. 29d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Antano Radzevičiaus** baigiamasis projektas tema „Sluoksniuotųjų sijų elementų standumo ir stiprumo sąryšiai“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Sluoksniuotųjų sijų elementų standumo ir stiprumo sąryšiai /Magistro projektas/ Autorius – A.Radzevičius/ Vadovas – Doc. dr. A.Baltrušaitis/ Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Medžiagų inžinerijos katedra. Kaunas, 2015 – 54 psl, 49 paveikslai, 7 lentelės

SANTRAUKA

Šis darbas susideda iš trijų pagrindinių dalių – literatūros apžvalgos, bandymų metodikos bei tyrimų rezultatų. Pirmojoje dalyje aptariami straipsniai, apžvelgiantys nedestrukcinis medienos stiprio prognozavimo metodus. Taip pat straipsniai, susiję su klijuotų ar kitais metodais surinktų medinių sijų tyrimais.

Tyrimo tikslas – ištirti sluoksniuotų sijų elementų standumo ir stiprumo sąryšius.

Tyrimai atlikti su pušies (lot. *Pinus silvestris*) medienos bandiniais. Elementai – sąlyginai mažų matmenų, skirstomi į tris ilgių grupes: 1010mm, 950mm ir 750mm.

Bandymų metu nustatyti pirminiai medienos parametrai – matmenys, drėgniai bei tankiai. Vėliau rankinio įrenginio „Timber Grader MTG“ pagalba nustatyti bandinių akustiniai dažniai bei tampros moduliai. Jiems priskirtos stiprio klasės nuo nekonstrukcinės *Reject* iki C40. Nedestrukciniu metodu išbandyta daugiau nei 140 elementų. Pagal EN 408 standartą atliktas keturių taškų lenkimo destruktinis tyrimas. Nustatyti lentų stipriai.

Atrinkti elementai tolimesniems bandymams. Po matmenų koregavimo ir pakartotino parametrų nustatymo, atliktas lentjuostės pozicijos įtakos tyrimas sijos tampriaplastiškosios savybėms. Bandymui naudoti 750mm ilgio elementai. Vėliau nustatyta elementų kiekio įtaka. Šis tyrimas atliktas su 1010mm bei 950mm ilgio bandiniais.

24 lentjuostės buvo suklijuotos į sijas, nustatytas jų tampros modulis.

Atlikus tyrimus nustatyta, jog elemento pozicija tirtomis sąlygomis neturi įtakos sijos tampriaplastinėms savybėms. Didinant elementų kiekį gerėja sijos tampros modulio ir tankio koreliacija.

Stiffness and strength relationships of GLULAM beam lamellas. / Head Assoc. Dr. A. Baltrušaitis. Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, Kaunas, 2015 – 54 pages., 49 fig., 7 tables.

SUMMARY

This work consists of three main parts – literature review, testing techniques, procedures and experimental results. In the first part of this work, publications related to non-destructive evaluation of timber are reviewed. Research based on glued laminated timber and other laminating methods, including stress laminated timber is also discussed.

The purpose of this work is to determine relationships between stiffness and strength of laminated beam elements.

Tests were conducted with samples of Scots pine (*Pinus sylvestris*). Elements are comparatively small-sized and can be divided into three length groups: those of 1010mm, 950mm and 750mm.

Primary characteristics, such as dimensions, density and moisture content were determined. Natural frequency and modulus of elasticity was defined by a hand-held device “Timber Grader MTG”. Each element was assigned to a certain strength class varying from Reject (non-structural timber) to C40. Parameters of more than 140 samples were determined. In accordance with EN 408 standard, the four point bending test was carried out, verifying non-destructive evaluation.

Elements for further tests were selected. Some dimensional adjustments and redetermination of characteristics were made. Then a test to determine the influence of lamella position to the elastic-plastic properties of the beam was carried out. Sample length of 750mm was used for this test. Later a quantity related experiment was conducted. In this test elements with length of 950mm and 1010mm were used.

A total of 24 lamella were glued together to make sample beams. Their characteristics, including natural frequency and modulus of elasticity were determined.

It has been noticed, that the position of lamella does not have any significant effect on the elastic-plastic properties of the beam. Also, with the increasing number of elements in a beam, the correlation between volume and modulus of elasticity increases.

Turinys

Santrauka.....	4
Summary	5
Paveikslėlių sąrašas.....	7
Lentelių sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga.....	11
1.1 Nedestrukciniai medienos tyrimai	11
1.2 Klijuotų ar kitais metodais surinktų medinių sijų tyrimai	18
2. Bandymų metodika bei programa	27
2.1 Naudotos medžiagos.....	27
2.2 Bandymų seka ir naudota įranga	27
2.3 Statistinis duomenų įvertinimas	35
3. Tyrimų rezultatai.....	37
3.1 Nedestrukciniai sijų ir elementų tyrimai	37
3.1.1 Medienos savybių nustatymas ir komplektų sijoms parinkimas.....	37
3.1.2 Tampros modulio priklausomybė nuo fizikinių medienos savybių	39
3.1.3 Elementų pozicijos įtaka tampriaplastiškosios sijos savybėms.	44
3.1.4 Elementų kiekio įtaka sijos savybėms.....	44
3.2 Statinis nedestrukcinis tyrimų verifikavimas	46
3.3 Pradinio įtempio metodu surinktų ir klijuotų sijų savybių palyginimas.....	49
4. Išvados	51
5. Literatūros sąrašas.....	52
6. Priedai	55

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

Pav. 1.1 Lazერიu nuskenuota šaka	14
Pav.1.2 Skersinių ir išilginių virpesių bandymas	15
Pav. 1.3 Terminio laidumo tyrimas	16
Pav. 1.4 Klijuotos sluoksninės medienos klasifikavimas pagal klijų siūlės poziciją skerspjūvyje	19
Pav. 1.5 Penkių taškų šlyties bandymo schema	20
Pav. 1.6 Įtemptais strypais sustiprintos klijuotos medienos sijos	22
Pav. 1.7 Statinio ir dinaminio tampros modulio ryšys (Kedras)	23
Pav. 1.8 Statinio ir dinaminio tampros modulio ryšys (Kėnis)	23
Pav. 1.9 Klijuotos sluoksninės medienos elementų kombinacijos schema	23
Pav. 1.10 Ryšys tarp išorinių sluoksnių ir bendro sijos tampros modulio	24
Pav. 1.11 SLT sistema	25
Pav. 1.12 Tvirtinimo sistemos detalės	25
Pav. 1.13 SLT įtempimas hidrauliniu domkratu	26
Pav. 2.1 Principinė bandymų eigos schema	27
Pav. 2.2 Bandymuose naudoti drėgmėmačiai	28
Pav. 2.3 Metinių rėvių pločio nustatymas	28
Pav. 2.4 „Timber Grader MTG“ įrenginys	29
Pav. 2.5 Tampros modulio nustatymo darbo vieta	29
Pav. 2.6 Dėl nuodžiūvio išlinkusi lenta	30
Pav. 2.7 Suvaržymas konfirmatoriais	30
Pav 2.8 Suvaržymas srieginiais strypais	30
Pav. 2.9 Suvaržymas srieginiais strypais	30
Pav. 2.10 Suvaržymo metodas nurodytas literatūroje	30
Pav. 2.11 Elementų kombinacijų derinių pavyzdinė schema	31
Pav. 2.12 Lenkiamos sijos įtempių diagrama	31
Pav. 2.13 Elementų skaičiaus ir stiprio klasių kombinacijų pavyzdinė schema	32
Pav. 2.14 Klijuoti elementai	32
Pav. 2.15 Keturių taškų lenkimo bandymo schema	33
Pav. 2.16 Keturių taškų lenkimo bandymas	33
Pav. 2.17 Statinio tampros modulio nustatymas SLT sijai	34
Pav. 3.1 Vidutinio metinių rėvių pločio pasiskirstymas	38

Pav. 3.2 Bandinių stiprumo klasių pasiskirstymas.....	39
Pav. 3.3 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio	40
Pav. 3.4 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio (Naujosios Zelandijos tyrimai)	40
Pav. 3.5 Bangos parametrai	41
Pav. 3.6 Tampros modulio priklausomybė nuo dažnio.....	42
Pav. 3.7 Tampros modulio priklausomybė nuo drėgnio	42
Pav. 3.8 Tampros modulio priklausomybė nuo metinių rėvių pločio.....	43
Pav. 3.9 Tampros modulio pokytis po obliavimo	43
Pav. 3.10 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (3 elementai)	45
Pav. 3.11 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (4 elementai)	45
Pav. 3.12 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (5 elementai)	45
Pav. 3.13 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio	47
Pav. 3.14 Tampros modulių (keturių taškų lenkimo bandymas, „Timber Grader MTG“) tarpusavio koreliacija.....	47
Pav. 3.15 Tampros modulio ir lenkiamojo stiprio koreliacija	48
Pav. 3.16 Tampros modulio (MTG) ir stiprio lenkiant koreliacija	48
Pav. 3.17 Klijuotų sijų tampros modulio priklausomybė nuo tankio	49
Pav. 3.18 Tampros modulio priklausomybė nuo akustinio dažnio (pradinio įtempimo metodus)	49
Pav. 3.19 Klijuotos sijos tampros modulio priklausomybė nuo akustinio dažnio	50

LENTELIŲ SĄRAŠAS

Lentelė 2.1 Tyrimuose naudoti bandiniai	27
Lentelė 3.1 Bandinių tankių statistiniai rezultatai.....	37
Lentelė 3.2 Metinių rėvių statistiniai rezultatai	37
Lentelė 3.3 Bandinių duomenys	38
Lentelė 3.4 Tampros modulių statistiniai rezultatai.....	38
Lentelė 3.5 Sijos elementų tampros moduliai	44
Lentelė 3.6 Keturių taškų lenkimo bandymo rezultatai	46

IVADAS

Mediena – atsinaujinanti žaliava, kuri plačiai naudojama ne tik individualioje, bet ir pramoninėje, inžinerinėje ar monumentalioje statyboje. Ši medžiaga pasižymi puikia estetinė išvaizda, palyginti mažu svoriu bei geromis stiprio savybėmis. Konstrukcijų gamybai reikalingi mažesni energiniai kaštai, jų apdirbimui ir surinkimui – paprastesnė įranga. Naudojant tvarių miškų medieną nedaromas neigiamas poveikis gamtai.

Būdama natūrali medžiaga, mediena pasižymi tam tikromis, tik jai būdingomis neigiamomis savybėmis. Tai įvairios ydos: šakos, puviniai, sakinės, pluošto įvijimai, skilinėjimai. Šią medžiagą būtina saugoti nuo biologinių bei atmosferinių poveikių.

Tikslų medienos stiprumą galima nustatyti tik destruktiniais metodais, tačiau elementas po to lieka nebenaudojamas. Dėl šios priežasties intensyviai plėtojami ir tobulinami nedestrukciniai medienos stiprio prognozavimo būdai. Pirmoji šio darbo dalis skiriama literatūros analizei bei bandinių stiprio prognozavimui nedestrukciniais metodais.

Didėjant statybinių medžiagų poreikiui, sudėtingėjant konstrukcijoms, nenumaldomai senkant ištekliams sukurti inžineriniai medienos produktai. Vieni jų, tokie kaip dvitėjės sijos, eliminuoja perteklinę medieną, taip mažindami žaliavos poreikį ir konstrukcijos svorį. Kiti – tokie kaip klijuota sluoksninė mediena, pašalinus nekokybiškas dalis, panaudoja prastesnės kokybės lentas. Klijuotos medienos gaminiai dėl savo teigiamų savybių, tokių kaip mažas svoris, didelis stipris ir universalios formos, bene dažniausiai naudojami inžineriniai produktai modernioje medinėje statyboje [24].

Pakankamai naujas inžinerinis medienos produktas – pradinių įtempių metodu laminuota mediena – SLT (angl. *Stress laminated timber*). Šis būdas pasižymi aibe teigiamų savybių – tvirtumu, matmenų dydžiu, surinkimo, naudojimo ir aptarnavimo patogumu. Lentjuostės tarpusavyje suveržiamos didelio stiprio metaliniais strypais ar varžtais. Klįjai tokiai konstrukcijai nereikalingi, kas leidžia elementus surinkti tiesiog statybvietėje. Ant skydų galima lieti betoną, tiesti asfaltbetonio dangą. Ši sistema plačiai naudojama tiltų paklotų bei terasų statyboje [30].

Antroji darbo dalis skiriama literatūros analizei klijuotų arba kitais metodais surinktų sijų tyrimams. Tiriamojoje dalyje atliekami bandymai su konfirmatoriais bei srieginiais strypais suveržtomis, taip pat klijuotomis sijomis.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Nedestrukciniai medienos tyrimai

M. Bacher pateikia skirtingų medienos stiprumo klasifikavimo principų palyginimą. Iš esmės, medienos klasifikavimas pagal stiprį (angl. *strength grading, classification*) atliekamas trimis pagrindiniais metodais: vizualiniu, klasifikavimas įrenginių pagalba (kontroliuojant įrenginius (angl. *machine control*)), klasifikavimas įrenginių pagalba (kontroliuojant produkciją (angl. *production control*) [19]. Europos stiprumo klasės sistema apibūdina šiuos dydžius: stiprumas – svarbiausia savybė, nes šis dydis susijęs su pastatų saugumu; standumas – svarbus dydis inžinieriams, kadangi reikalavimuose dažnai numatomi maksimalūs įlinkiai. Standumas nusako statinio eksploatacinį naudingumą ir patogumą; tankis – trečioji klasifikavimo savybė, laikoma mažiau svarbia, kadangi šis dydis negali patenkinamai numatyti stiprumo. Tikras medienos stiprumas nustatomas tik destruktiniais metodais, tačiau po tokių tyrimų mediena yra nebepanaudojama konstrukcijose, todėl šis dydis yra apytiksliai prognozuojamas ir apskaičiuojamas nedestrukciniais metodais. Standumas gali būti tiesiogiai nustatomas keliais būdais: lenkiant, ultragarsu, virpesių metodu. Straipsnyje aptariamos nekontaktinės klasifikavimo mašinos, kurios darbą atlieka ir rentgeno spindulių ar lazerio pagalba. Taip pat nurodomi vizualinės klasifikacijos principai. Tikrinamos šios ydos ir stiprumą mažinančios charakteristikos: matmenys, įtrūkimai, puviniai, šakos, kiti defektai.

Xiping Wang straipsnyje apžvelgė akustinius medžių bei rąstų matavimų būdus. Pristatomi akustinės bangos sklidimo medyje bei rąste sklidimo pagrindai, taip pat aptariamos skirtingos akustinio greičio (angl. *acoustic velocity*) matavimo technikos [1]. Iš esmės, medienos paviršiu stauga suteikus apkrovą, sukuriama įtempiai, kurie keliauja medienoje bangų pavidalu. Bangos sklidimo greitis matuojamas į medžio stiebo balaną įstatant du zondus – siųstuvą ir imtuvą. Tuomet suteikiama akustinė energija plaktuku ir apskaičiuojamas bangos sklidimo laikas nuo vieno zondo iki kito. Tokiu rezonansiniu principu remiasi ir rąstų matavimai. Akustinis sensorius pritvirtinamas prie rąsto galo, mechaniniu poveikiu paleidžiama banga. Elektroninis įrenginys fiksuoja šimtus rezonuojančių pulsų, iš kurių išvedamas vidurkis.

Zhi-ru Zhou, Mao-Cheng Zhao ir kt. [2] atliko tyrimą, kuriuo buvo siekiama patikrinti rezonansiniu pagrindu veikiančios įrangos patikimumą rūšiuojant Kiniškos tuopos medieną LVL (angl. *Laminated Veneer Lumber*) gaminiams. Naudoti 8 metų amžiaus 238 rąsteliai, kurie buvo bandomi naudojant „Director HM200TM“ rezonansinį įrenginį. Panaudojus gautus duomenis, apskaičiuotas dinaminis tampros modulis. Atrinkta 13 tipinių rąstų, iš kurių vėliau pagaminta fanera. Atlikti bangos sklidimo laiko bei lenkimo testai. Nustatyta, jog rąstų bei LVL dinaminis

tampros modulis, išmatuotas naudojantis rezonansinio pagrindo technologijomis, taip pat lenkimo tyrimu, yra susiję. Autoriai rekomenduoja tolimesnius šios srities tyrimus.

Nustatinėtos ir sijų iš skirtingo amžiaus medžių akustinės ir lenkiamosios savybės. Tyrime naudota 8, 9, 13, 15, 22 bei 23 metų amžiaus pušies (lot. *Pinus elliottii*) mediena [3]. Tik nukirsti rąstai buvo bandomi ultragarsu, taip pat buvo išmatuotas bangos sklidimo laikas. Vėliau bandymai pakartoti, medienai esant 12% drėgnumo. Taip pat atlikti lenkimo testai. Tyrimu nustatyta, jog ultragarso bangų sklidimo greičio bei tampros modulio kitimas atliko amžiaus funkcijos modelį. Reikšmės sparčiai kyla iki 15 metų amžiaus, o vėliau, rodiklių didėjimas išlieka pastovus. Taip pat matomas aiškus ryšys, tarp akustinių savybių bei tampros modulio.

Turkijoje atlikto tyrimo metu buvo nustatinėjamos Raudonosios pušies (lot. *Pinus brutia*) savybės, naudojant nedestrukcinį metodą. Mediena buvo 30 – 80 metų amžiaus, o bandymai atliekami įrengimu „Timber Grader MTG“ [4]. Nustačius dinaminį tampros modulį, nustatytas ir statinis tampros modulis bei stipris. Iš viso ištirta 790 bandinių. Tyrimai parodė, jog determinacijos koeficientas tarp dinaminio tampros modulio bei lenkiamojo stiprio yra 0,69. Taigi, teigiama, jog „Timber Grader MTG“ įrenginiu galima patikimai ir tiksliai nustatyti lenkiamąsias Raudonosios pušies mechanines savybes.

Khaled T. S. Hassan, Petr Horaček ir Jan Tippner paskelbtame straipsnyje aptariamas pušies standumo bei stiprumo vertinimas naudojant rezonansinį dažnį bei ultragarsines priemones. Buvo bandoma numatyti statinį lenkiamąjį tampros modulį bei lenkiamąjį stiprį [5]. Eksperimentai atlikti su 40 Paprastosios pušies (lot. *Pinus sylvestris*) bandinių, kurių matmenys buvo 20x60x500mm. Ultragarsu bei rezonansiniais virpesiais nustatytas kiekvieno bandinio tampros modulis. Po nedestrukcinio vertinimo, atliktas lenkimo bandymas. Dinaminis tampros modulis, išmatuotas skersinių vibracijų, išilginių vibracijų bei netiesioginio ultragarso pagrindu buvo 14 – 31% didesnis už statinį tampros modulį. Taip yra dėl šlyties deformacijų lenkimo bandymų metu. Buvo geras ryšys tarp dinaminio tampros modulio, gauto virpesių bei ultragarso metodais, ir tikro tampros bei lenkiamojo stiprio, tuo pagrindžiant šių metodų tinkamumą.

Kito tyrimo metu nedestrukciniais metodais buvo mėginama prognozuoti nedžiovintos medienos tampros modulį, nežinant pradinio jos drėgčio [6]. Tyrime naudota Prancūzijos pietvakariuose augusios Jūrinės pušies (angl. *Maritime pine*) mediena. Pirmieji matavimai buvo atliekami iškart nukirtus medieną. Toliau dinaminis tampros modulis buvo matuojamas esant skirtingiems drėgnumams, taip siekta nustatyti, kaip statinis (MOE) ir dinaminis (DMOE) tampros moduliai keičiasi, keičiantis drėgnumui, kaip jie siejasi tarpusavyje. Dydžiai buvo matuojami tik nukirstoje medienoje, esant 48, 28, 18 bei 12% drėgnumams. Nedestrukciniai bandymai – virpesių metodas. Atlikus matavimus, sekė destruktiniai lenkimo bandymai. Ištyrus daugiau nei 400

bandinių, nustatyta, kad drėgmės kiekis neturi labai didelės įtakos dinaminiam tampros moduliui, kol drėgnis yra didesnis už 18%.

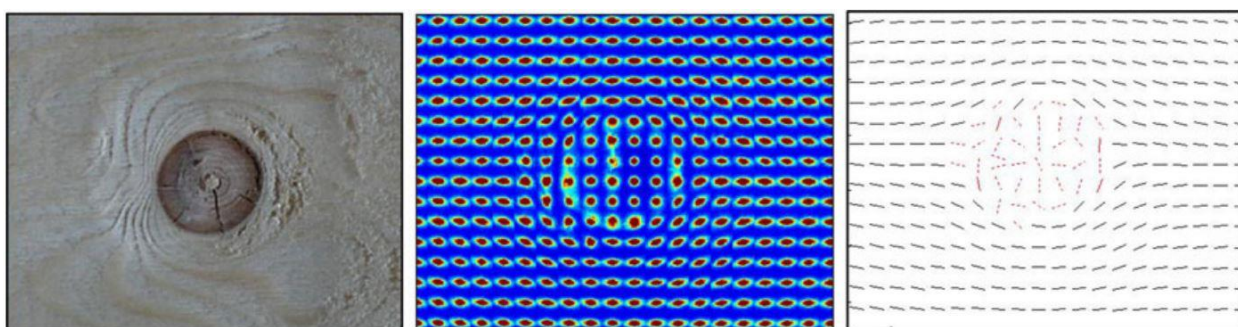
Dar viename straipsnyje aptariama apvaliosios medienos rūšiavimas pagal dinaminį tampros modulį statybinių lentų gamybai. Tyrimai atlikti visose stadijose nuo augančio medžio iki supjautos medienos. Matavimai gauti iš 154 vnt. 40 metų amžiaus Didžiosios pocūgės (lot. *Pseudotsuga menziesii*) medžių [7]. Iš apie 13m ilgio stiebų buvo supjauta 332 trumpųjų (4,1m) rąstų, o iš šių – 1820 lentų. Stovinčio medžio dinaminės savybės buvo nustatytos naudojant „Director ST300™“ įrenginį. Rąstų dinaminis tampros modulis nustatytas plaktuku sukėlus rezonansinius virpesius. Lentos buvo bandomos „ViSCAN-COMPACT“ įrenginiu, nustatytas lenkiamasis statinis tampros modulis. Dinaminio tampros modulio nustatymas, kaip rodo šis tyrimas, galimas tiek prieš supjaunant, tiek ir prieš džiovinant. Rūšiavimas miške, dar augančios medienos nėra itin patikimas. Be abejo, kokybės vertinimas šioje stadijoje gali būti atliekamas, tačiau tik kaip bendros gairės. Geriausi rezultatai gauti rąstų (ilgų ar trumpų) stadijoje.

Taivane atliktas tyrimas, kuriuo mėginta nedestrukciniais metodais rūšiuoti spygliuočių medieną. Bandymams atlikti naudota Japonijos kedrų, Didžiosios pocūgės bei Pietinės pušies mediena [8]. Vizualinio rūšiavimo metu mediena buvo suskirstyta į statybinę medieną (C klasė), standartinę (S klasė) bei pagalbinę (U klasę). Mediena, neatitinkanti žemiausios klasės standartų buvo priskiriama žemiau klasifikacijos (B (angl. *below – grading*)). Ultragarso tyrimai buvo naudojami apskaičiuoti dinaminį tampros modulį (DMOE). Naudota „Sylvatest“ įranga (22kHz dažnis). Skersinių virpesių metodas atliktas naudojant „Metriguard Model 340 Transverse Vibration Tester“. Rąstas buvo įtvirtintas dviejuose galuose, iš kurių viename, jutiklių ir kompiuterio pagalba buvo nustatomas DMOE. Statinio lenkimo metu mediena buvo bandoma „Shimadzu UH-10A“ universaliu bandymo įrenginiu. Tyrimais nustatyta, jog kuo aukštesnė klasė medienai buvo priskirta vizualinio rūšiavimo metu, tuo aukštesnės buvo dinaminio tampros modulio vertės, tačiau didžioji dalis vizualinio rūšiavimo kriterijų nebuvo glaudžiai susieti su specifinėmis savybėmis, todėl vizualus metodas nėra patikimas. Dinaminis tampros modulis buvo didesnis visoms medienos rūšims nei statinis tampros modulis.

Kitame straipsnyje buvo aprašomi būdai, kuriais siekta pagerinti senų medinių sijų tampros modulio nustatymą vietoje derinant nedestrukcinis bei vizualinius klasifikavimo metodus. Šiame tyrime panaudota 13 senų kėnio sijų iš senovinių pastatų Florencijos vietovėse [9]. Tai nebuvo istorinės ar architektūrinės svarbos objektai, todėl šios sijos buvo puiki medžiaga tyrimams. Prieš pradėdant bandymus, sijos buvo sandėliuojamos kartu apie 9 metus. Jų drėgnis vidutiniškai buvo 11,5%. Vietinis statinis tampros modulis buvo nustatomas keturių taškų lenkimo bandymu. Vizualinis klasifikavimas buvo atliekamas pagal Italijos standartus, pagal eilę požymių leidžiantis medieną suskirstyti į tris klases. Nedestrukciniais metodais tirtas tampros

modulis bei tankis. Lenkimo virpesių tyrimo metu elementai buvo paremiami tam tikruose mazguose, o vibracija sukeliama plaktuko smūgiu. Duomenys surenkami akselerometru, prijungtu prie kompiuterio. Išilginių virpesių tyrimas buvo atliekamas panašiai kaip prieš tai buvęs – akselerometras, pritvirtintas prie sijos galo, o kitame gale plaktuku sukeliama virpesiai, tokiu būdu nustatomas dinaminis tampros modulis. Bangos sklidimo greičio bandymas buvo atliktas du akselerometrų pritvirtintus prie skirtingų sijos galų. Viename jų plaktuku sužadinama banga. Akselerometrai prijungti prie osciloskopo, artimesnis tos vietos, kuriame buvo smūgis paleisdavo mikrosekundinę bangos sklidimo greičio skaičiuoklę, o tolimesnis ją sustabdydavo, taip užfiksuojant laiką. Gauti rezultatai rodo, kad nedestrukciniais metodais galima nustatyti senų sijų tampros modulį, tačiau dėl mažo bandinių kiekio šie tyrimai negali būti laikomi išbaigtais. Geriausius rezultatus demonstravo skersinių virpesių tyrimas.

Kitas straipsnis aprašo medienos stiprio lenkiant prognozavimą, remiantis vietine medienos pluošto orientacija. Pluošto orientacija yra nurodomoji savybė, kurios tyrimai kol kas nėra pakankamai tikslūs. Šiame darbe klasifikavimas bei rezultatai remiasi daug tikslesniais metodais [10]. Bandymuose naudotos lentos iš eglės medienos. Atlikti tokie tyrimai: lazerinis skenavimas (pav. 1.1 – šaka, lazerio spindulio pasklidimas paviršiuje ir apskaičiuota pluošto orientacija), dinaminis virpesių sužadinimas bei statinis apkrovimas.



Pav. 1.1 Lazериu nuskenuota šaka [10]

Pluošto orientacijos kampų skenavimui naudotas „WoodEye“ skeneris. Dinaminio standumo nustatymas buvo atliekamas nustatant mažiausią išilginį rezonansinį dažnį, kombinuojant su lentos tankiu, taip apskaičiuojant dinaminį tampros modulį. Šiam bandymui naudotas „Timber Grader MTG“ įrenginys. Taip pat buvo atliekamas keturių taškų lenkimo tyrimas, kuriuo nustatytas lenkiamasis stipris. Nustatyta, jog galima ganėtinai tiksliai nusakyti medienos savybes pagal pluošto orientaciją, kas leistų pritaikyti tokias sistemas praktikoje, tačiau tiksliai informacijai vis tiek reikalingos ir kitos savybės, tokios kaip tampros modulis kiekvienai konkrečiai lentai.

Atlikto tyrimo metu buvo siekiama įvertinti tropinių rūšių medienos lukštą nedestrukciniais metodais bei patikrinti, ar ši mediena tinka sluoksniuotosios statybinės faneros LVL (angl. *Laminated Veneer Lumber*) gamybai. Bandymuose naudoti 16 metų amžiaus *Schizolobium*

parahyba mediena, iš kurios buvo ruošiami 980x1000x2mm lukšto lakštai [11]. Išdžiovinus ore, po 10 dienų, matmenys buvo sumažinti iki 490x250x2mm. Iš viso pagaminti 64 lakštai. Tuomet nedestrukcinio būdu bandyti naudojant apkrovos virpesių metodą išilgine kryptimi. Į medžiagą triskart atsitrenkusi švytuoklė sukėlė virpesius, kuriuos išmatavo akselerometrai. Buvo matuojamas laikų, kuriuos užtrunka banga nukeliaudama tarp akselerometrų, vidurkis. Pagal šiuos laikus buvo apskaičiuotas tampros modulis. Tuomet iš lukštų pagaminta 8 sluoksnių fanera (gaminama naudojant formaldehido klijus). Tokiu pat būdu bandymai atlikti ir su fanera. Nors nenustatyta, ar iš šios rūšies medienos galima pagaminti kokybišką fanerą, tačiau rastas glaudus ryšys tarp lukšto ir faneros savybių, kas leidžia manyti, jog galima nuspėti faneros savybes nedestrukciniais metodais tiriant lukštą.

Kitame straipsnyje aptariamas medienos lenkiamojo stiprio, medžiagos homogeniškumo prognozavimas pagal dinamines savybes. Tirtas rezonansinių bangų panaudojimas šioms savybėms nustatyti. Tyrimai atlikti tiek statiniais, tiek dinaminiais metodais [12]. Lenta (3,6m ilgio) buvo pakabinama naudojant gumines juostas (Pav. 1.2).

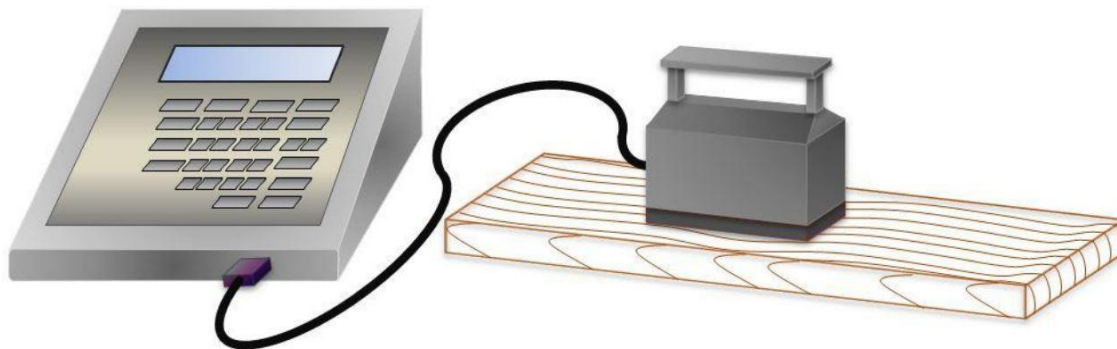


Pav.1.2 Skersinių ir išilginių virpesių bandymas [12]

Prie lentos galo arba lentos viršuje (galinėje dalyje) buvo pritvirtinamas akselerometras (gale – kai buvo matuojama išilginiai, o viršuje skersiniai virpesiai – akseleracija). Į kitą lentos galą (arba galinę viršutinę dalį) buvo suduodama impulsiniu plaktuku. Signalas buvo apdorotas kompiuteriu. Taip pat buvo atliekamas keturių taškų lenkimo bandymas, kuriuo nustatytas standumas bei stipris leniant. Nehomogeniškumas (ydos ir kiti netobulumai) lentoje nustatyti rezonansiniu būdu. Esant panašioms „tobulų ir netobulų“ lentų tampros moduliams, rezonansiniai dažniai skiriasi tarpusavyje. Šiame straipsnyje aptariamu tyrimu nustatyta, jog dinaminis tampros modulis, gautas iš skersinio lentos rezonansinio dažnio, turi aukštesnį lenkiamojo stiprio nustatymo patikimumą, nei tyrimus atliekant virpesiais išilgai lentos.

Tuker Dundar, Seref Kurt ir kt. atliko nedestrukcinį medienos stiprumo vertinimą naudojant terminį laidumą. Tyrimuose naudota buko (lot. *Fagus orientalis*), eglės (lot. *Abies*

nordmanniana) bei Juodosios pušies (lot. *Pinus nigra*) mediena [13]. Iš jų buvo išpjauti 20x50x350mm bandiniai. Kaitinantis įrenginys buvo padėtas spindulinėje plokštumoje, lygiagrečiai pluošto (Pav. 1.3).



Pav. 1.3 Terminio laidumo tyrimas [13]

Rodmenys buvo paimami trijuose kiekvienos lentos taškuose. Po terminio laidumo tyrimo buvo nustatomas bandinių tankis, lenkiamasis stipris, tampros modulis, smūginis lenkiamasis stipris bei gniuždomasis stipris. Visi tyrimai atlikti pagal ISO standartus. Nustatyta, jog tarp šilumos laidumo bei stiprumo (išskyrus stiprį gniuždant) savybių yra ganėtinai glaudus ryšys. Stipriausias ryšys buvo tarp šiluminio laidumo ir stiprio lenkiant.

Nedestrukciniais būdais bandyta tirti keletą medinių santvarų. Šios santvaros gautos iš senų statybų Italijoje. Tikslus konstrukcijų amžius nėra žinomas, tačiau manoma kad joms daugiau nei 70 metų [14]. Dar konstrukcijos vietoje kiekvienas elementas buvo sužymimas. Nedestrukcinis vertinimas apėmė šias sritis: vizualinę apžiūrą (irimas, mechaniniai pažeidimai), geometrinį vertinimą, drėgmės kiekio nustatymas (naudotas termohigrografas), tankio įvertinimas. Taip pat atlikti nedestrukciniai bandymai, tokie kaip kietumo tyrimas, „Pilodyn®“ metodas (plieninis virbas skverbiamas gilyn į medieną, taip nustatomas tankis. „Resistograph®“ naudojama maža adatėlė, kuri gali užfiksuoti tankio sumažėjimus, medienos savybių pablogėjimą. „Sylvatest®“ – ultragarsinis prietaisas, siunčiantis ir priimantis išilginius signalus, naudodamas pjezoelektrinius zondus. Toliau atlikti destruktiniai bandymai. Santvaros buvo bandomos jas apkraunant ciklinėmis simetrinėmis ir asimetrinėmis apkrovomis. Galiausiai, gauti rezultatai rodo, jog ryšys tarp destruktinių ir nedestruktyvių santvaros tyrimų yra ganėtinai silpnas. Tai pat nurodoma, jog net laboratorinėmis sąlygomis įvertinti realaus dydžio elementų parametrus yra labai sunku.

Kitame straipsnyje buvo aprašoma mažų eukalipto detalių tyrimai rezonansu. Tyrimo tikslas buvo nustatyti ryšį tarp smulkios pjautinės medienos standumo ir mažų jos detalių iš 6 metų amžiaus Eukalipto medienos, naudojant rezonansinę techniką [15]. Bandymuose naudota 100 *Eucalyptus grandis x urophylla* hibridų rąstų iš Brazilijos, kurių amžius 6 metai. Bandiniai buvo testuojami skersiniais ir išilginiais virpesiais. Pirmuoju atveju išmatuoti virpesiai buvo

naudojami apskaičiuojant dinaminį skersinį tampros modulį, kuris atstovauja standumą lenkimo tyrime ir dinaminį šlyties modulį. Išmatuoti išilginiai virpesiai panaudoti skaičiuojant dinaminį tampros modulį, kuris atstovauja standumą gniuždant ar tempiant. Dinaminiai tyrimai buvo atliekami bandinius dedant ant elastinių atramų, taip sukuriant laisvus virpesius. Impulsas buvo suteikiamas nestipriai trenkiant plaktuku kitoje pusėje, nei yra akustinis mikrofonas. Tyrimų metu nustatytas ryšys tarp didelių ir mažų medienos egzempliorių. Tampros modulio koreliacija buvo tarp 0,68 iki 0,75 atitinkamai dideliems ir mažiems bandiniams. Rezonansiniai metodai rodo nemažą potencialą charakterizuojant mechanines medienos savybes greitu ir nebrangiu būdu.

Peter Niemz bei David Mannes paskelbtame straipsnyje aprašomi tam tikri nedestrukciniai medienos ir medienos medžiagų tyrimo būdai [16]. Čia aptariami tokie metodai kaip deformacijų matavimas. Esant apkrovai išmatuotos deformacijos padeda įvertinti tampros modulį. Atsparumu gręžimui naudojant mažą grąžtelį nustatomos tuštumos ir tankio pokyčiai medienoje, sumažėjant reikiamai gręžimo jėgai. Kietumas nustatomas išmatuojant adatos, smeigiamos pastovia apkrova, įsmigimo gylį. Šis dydis susijęs su tankiu. Garso ir nuosavo dažnio matavimo metodai remiasi tuo, kad garso bangos sklidimo greitis priklauso nuo medžiagos elastinių savybių. Garso emisija apima signalus, kurie yra skleidžiami medžiagos mikrotrūkinėjimų, veikiant apkrovai (žymiai mažesnei, nei kritinė). Toks metodas gali būti naudojamas aptinkant struktūrinius pakitimus arba įtrūkimus atsirandančius džiovinant medieną. Rentgeno spinduliai: šis metodas remiasi principu, jog medžiagos struktūros pokyčiai susilpnina radiacinę skverbę. Spalvos matavimai: naudojamas blizgesio lygis bei spektroskopija. Oksiduojantis medienai keičiasi jos spalva. Arti infraraudonųjų spindulių spektroskopija įgalina medžiagos cheminę charakterizavimą. Drėgmės matavimai galimi keliais būdais. Vienas jų remiasi drėgmės ir elektrinės varžos tarpusavio priklausomybe. Apdailos dangos storis gali būti nustatomas ultragarsu, elektrine varža, optinėmis sistemomis. Termografinis metodas naudoja šiluminės varžos skirtumus medienoje, kas leidžia nustatyti medienos defektus.

Kitame tyrime pusiau destruktiniais tyrimo būdais nustatinėjamos medienos mechaninės savybės. Straipsnyje lyginami pusiau destruktiniai ir destruktiniai medienos tyrimai [17]. Tyrimo metu atlikti tokie pusiau destruktiniai bandymai: dinaminis smaigo prasiskverbimas, varžto ištraukimas, mikrogręžimas ir naujas metodas, kuris remiasi mechaniniu medienos atsparumu smaigui, palaiapsniui į ją spaudžiamam. Tyrimuose naudota eglė (lot. *Picea abies*), kėnis (lot. *Abies alba Mill*) bei paprastoji pušis (lot. *Pinus sylvestris*). Tyrimai atlikti siekiant nustatyti medienos savybes išilgai ir skersai kamieno. Naudota mediena buvo 12% drėgnio. Atlikus palyginimus tarp pusiau destruktinių ir destruktinių tyrimų buvo nustatyti sąryšiai.

Pusiau destruktiniais metodais galima sėkmingai nustatyti medienos savybes. Destrukciniai metodai buvo standartiniai apkrovų bandymai, atlikti nedestrukcinį metodų verifikavimui.

Takunori Noguchi, Eiichi Obataya, Kosei Ando atliko tyrimą nustatant senėjimo įtaką vibracinėms medienos savybėms. Naudota japoniškos raudonosios pušies (lot. *Pinus densiflora*) mediena [18]. Ši mediena buvo naudojama 115, 270 ir 290 metų senumo šventyklose. Prieš bandymus dar buvo sandėliuojama 6 metus. Kaip „nauja“ mediena buvo naudojami šviežiai nukirsti medžiai. Šiame straipsnyje aptariamas ne medienos augimo amžius, tačiau amžius, praėjęs po medžio nukirtimo. Vibracinių savybių nustatymui naudotas skersinių virpesių bandymas. Taip nustatytas tampros modulis. Dinaminis šlyties modulis išmatuotas sukamosios švytuoklės metodu.

Atlikti tyrimai sąlyginai senos (121 – 296 metų) ir naujos (8 metų) medienos vibracinėms savybėms nustatyti. Senoji mediena buvo standesnė, garsas joje sklido greičiau. Tai nurodo, jog sendinimas gali pagerinti medienos akustines savybes.

Tyrimu, atliktu su eglės mediena buvo siekiama apskaičiuoti dinaminį tampros modulį (MOE), atrasti kontaktą tarp rąstų MOE ir lentų medienos klasių (nekonstrukcinė *Reject*, C18, C24, C30), taip pat ryšį tarp vizualinės rąstų klasifikacijos bei rąstų tampros modulio [20].

Apžvelgus straipsnius matyti, jog nedestrukciniai medienos tyrimo būdai yra plačiai nagrinėjami ir nuolatos tobulinami. Įvairūs įrenginiai pritaikomi daugelyje sričių. Jais galima tirti ne tik masyviąją pjautinę medieną, bet ir augančius medžius ar medienos gaminius.

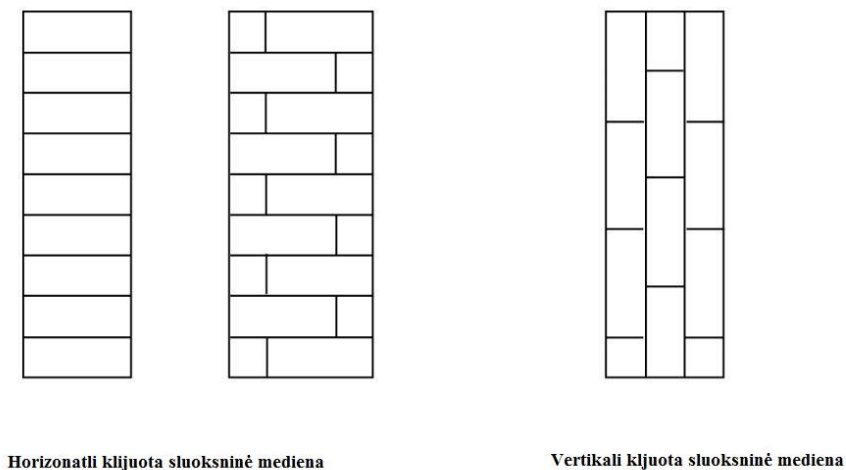
1.2 Klijuotų ar kitais metodais surinktų medinių sijų tyrimai

Šioje dalyje apžvelgiami darbai, susiję su klijuotų ar kitais metodais kombinuotų medinių sijų savybių nustatymu. Nors praktikoje dažniausiai naudojama klijuota sluoksninė mediena (ang. *Glued laminated timber; Glulam*), pasitaiko ir kitokių sijų kombinavimo metodų (varžymas diržais, srieginiais strypais). Tai naujas sijų ar konstrukcijų surinkimo būdas, vadinamas pradinio (išankstinio) įtempimo sluoksnine mediena (angl. *Stress Laminated Timber, SLT*).

Sijos vis dažniau komponuojamos ir su jas stiprinančiomis medžiagomis, tokiomis kaip anglies pluoštas ar įklijuojamais strypais (angl. *glued-in rod*).

Klijuota sluoksninė mediena gaunama tarpusavyje sujungiant tam tikrą skaičių medinių, stačiakampio skerspjūvio elementų. Sijoje visų elementų pluošto kryptys yra lygiagrečios [22]. Dėl palankesnių savybių ir ekonomiško, sijos dažniausiai gaminamos iš spygliuočių medienos, tačiau standartais nurodoma kaip teisingai pagaminti siją ir iš lapuočių. Beržo ir drebulės mediena yra pakankamai tvirta mechaniškai, tačiau neatspari puviniams [32]. Įvairiuose standartuose aprašomi reikalavimai klijuotų sijų gamybai bei savybėms. Pagrindinės

charakteristikos, tokios kaip stipris ar drėgnis, kaip ir daugelio statybinių medžiagų, priklauso nuo pastatų, kuriuose jos bus naudojamos, klasės. Gaminant laikančiąsias klijuotas medienos konstrukcijas patariama, kad drėgnis būtų apie 10% [32]. Standarte [22] išskiriamos klijuotos sluoksninės medienos rūšys – vertikali (angl. *vertical glulam*) bei horizontali (angl. *horizontal glulam*) sluoksninė mediena (Pav. 1.4).



Pav. 1.4 Klijuotos sluoksninės medienos klasifikavimas pagal klijų siūlės poziciją skerspjūvyje [22]

Klijuota mediena klasifikuojama pagal stiprį, naudojamos medienos tipą (ar tipus), taip pat vizualinius standartus.

Gamintojai, remdamiesi standartais arba savo gamybiniais pajėgumais klijuotos medienos gaminius skirsto į vizualines klases [36]:

Industrinės kokybės gaminiams taikomi žemiausi vizualiniai reikalavimai – didžiausio diametro sveikos šakos, defektų užtaisymai, išplėšimai, įaugusi žievė ar kiti neesminiai defektai yra leidžiami.

Standartinės kokybės gaminiams taikomi kiek aukštesni reikalavimai. Ribojamas sakinių dydis, leidžiami tik mažesni išplėšimai ir kiti defektai.

Rinktinės kokybės gaminiams taikomi aukščiausi reikalavimai. Defektai turi būti pašalinti, neleidžiami išplėšimai ar įaugusi žievė. Šios rūšies gaminiai naudojami matomose konstrukcijose. Vizualinės kokybės parametrai bei jų dydžiai pateikiami 6 priede [36].

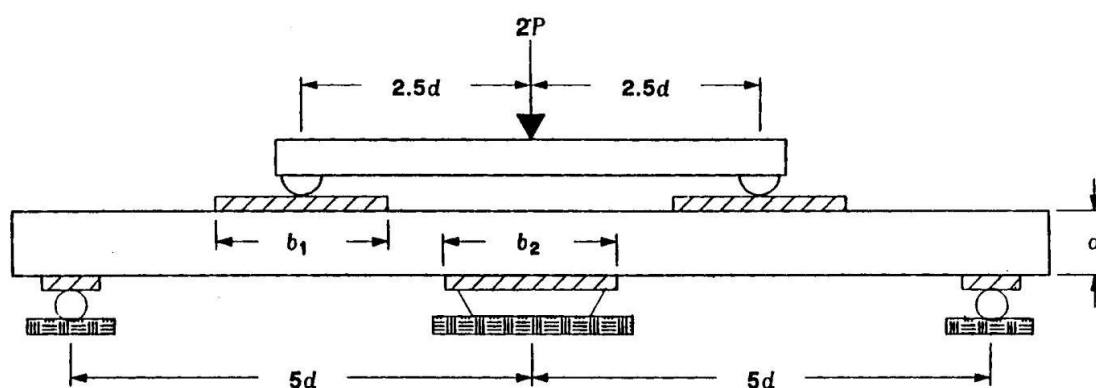
Pagal homogeniškumą klijuota sluoksninė mediena skirstoma į „h“ ir „c“ tipus (angl. *Homogenous, combined*).

Klijuota sluoksninė mediena yra atsparesnė skilinėjimams nei masyvioji mediena, tačiau dėl aplinkos poveikių gaminio paviršiuje atsiradę defektai yra neišvengiami. Gamintojai nurodo, jog

tokie įplyšimai traktuojami kaip skilinėjimai ir yra leidžiami. Jie neturi esminės įtakos galutiniam gaminio stipriui [36].

Standarte Eurocode 5 nurodoma, jog medienos stiprio klasės turi atitikti EN 14080 standartą. Lietuvoje taikomas Statybos techninis reglamentas [39] nurodo tik homogeninės klijuotosios sluoksninės medienos fizikines ir mechanines savybes (priedas Nr.4). Remiantis DIN 1052:2004 standartu, išskiriamos šios klasės: GL 24h; GL 24c; GL 28h; GL 28c; GL 32h; GL32c; GL 36h; GL 36c [38].

Visos praktikoje naudojamos charakteristikos yra išvestos iš aibės tyrimų rezultatų, kurie atliekami ir atnaujinami. Tai leidžia tam tikras reikšmes patikslinti. Siekiant patikslinti kriterijus, taikomus atliekant šlyties bandymus klijuotai sluoksninei medienai, buvo atliktas tyrimas, kurio metu tirtos klijuotos sijos bei skydai [23]. Bandymai atlikti naudojant penkių taškų šlyties testą (Pav. 1.5). Tyrimo metu panaudoti 200 kėnio (angl. *Douglas fir*) bandinių, iš kurių 100 buvo apkraunami išilgai (per stipriąją ašį, sijų bandymai), o likę apkraunami plokščiai (per silpnąją ašį, skydų bandymas).



Pav. 1.5 Penkių taškų šlyties bandymo schema [23]

Bandymų rezultatai nurodo, jog šoninės šlyties duomenys atitinka kitų analogiškų tyrimų duomenis. Plokščiojo metodo bandymai davė kiek kitokius rezultatus. Bandyti mažesnių matmenų elementai. Pasireiškė skirtingi suirimo variantai. Bandiniai lūžo ne vien dėl šlyties, bet ir dėl lenkimo. Išvadoje nurodoma, jog plokščiai apkrauti elementai gali atlaikyti didesnius šlyties įtempius, nei vertikalaus apkrovimo metu.

Lenka Melzerová bei Petr Kuklík straipsnyje aptariamas klijuotos medienos tankio ir poslinkių lenkiant ryšys [25]. Tyrime naudota 20 realių matmenų sijų bandinių. Nurodoma, jog pati klijuota sija tėra pavienių, skirtingų ilgių elementų (lentjuosčių) kombinacija. Lentjuostės – reikšmingų ydų neturintys elementai. Pašalinus šakas ar kitus netobulumus, jos sujungiamos, tuomet suklijuojamos į siją. Nustatyti šių elementų tampros moduliai.

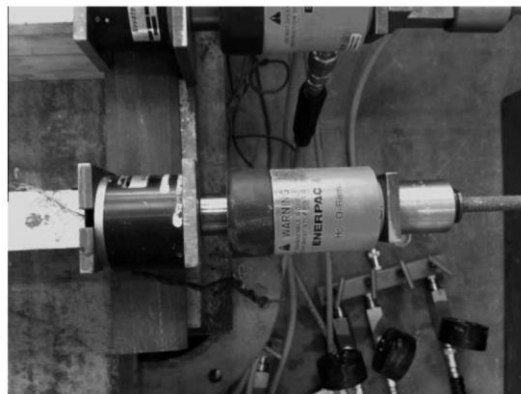
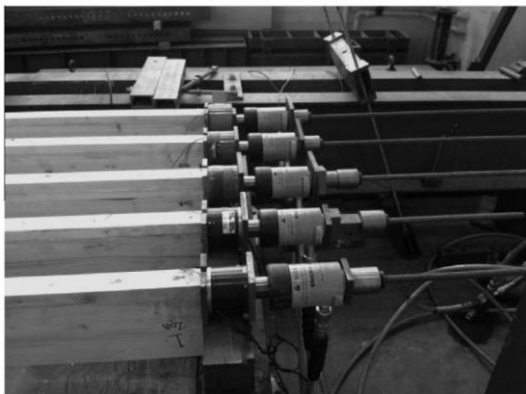
Tyrimas vykdytas kiekvienam sijos segmentui priskiriant Jungo modulį, priklausantį nuo tankio.

Nedestrukciniais metodais nustatyta, jog pluošto kryptis turi didelės įtakos gaminio įlinkiams atliekant keturių taškų lenkimo bandymą, tačiau dėl sijos išilginių sujungimų, šie įlinkiai gali pasiskirstyti ganėtinai atsitiktinai.

Šiuo straipsniu pateikiamas gan naujas požiūris į klijuotos medienos tyrimus, apimantis pavienių elementų, sijos segmentų tikėtinas savybes. Lokalus tampros modulis derinamas su globaliu. Autoriai nurodo, jog šis metodas labiau tiktų ekstremalioms situacijoms, kai medienos savybės sijos struktūroje gali skirtis kardinaliai [25].

Klijuota sluoksninė mediena dažnai naudojama išorinėms konstrukcijoms, kur veikia klimatiniai veiksniai, tokie kaip drėgnio bei temperatūros pokyčiai. Straipsnyje [26] aptariami sijos atsparumo šlyčiai bandymai, esant žemoms temperatūroms bei skirtingiems drėgnumams. Bandymai atlikti naudojant 12 pilno dydžio bandinių, po du bandinius $+20^{\circ}\text{C}$, 0°C bei -40°C temperatūrai, esant 12% bei 28% drėgnumui. Sijos buvo lenkiamos iki jų lūžimo, naudojant keturių taškų lenkimo metodą. Bandymais nustatyta, jog temperatūra įtakoja klijuotų gaminių suirimo charakteristikas. Nors visi šlyties įtempių sukelti lūžiai įvyko šalia lentjuosčių suklijavimo vietos, teigiama, jog bandiniai suiro ne per pačią klijų siūlę. Nurodoma, jog esant teigiamai bei nulinei temperatūrai, bandiniai lūžo dėl šlyties įtempių, tuo tarpu prie -40°C temperatūros – dėl tempimo. Temperatūrai krentant, medienos stipris bei standumas didėjo, tai ypač gerai matyti esant 28% drėgnumui. Darbo autoriai siekė pateikti projektuotojams bendrą supratimą, kaip klijuotos medienos elementus veikia žemos temperatūros bei drėgmė, kas leistų saugesnius bei ekonomiškesnius konstrukcinius sprendimus. Autoriai rekomenduoja tolimesnius šios sferos tyrimus, bandant elementus įvairesnėse temperatūrose, didesniame drėgnumų diapazone [26].

Klijuotos medienos konstrukcijos gali būti stiprinamos armatūromis, iš anksto įtemptais strypais. Nagrinėtame straipsnyje [27] aprašomas nesustiprintų, sustiprintų bei sustiprintų iš anksto įtemptu strypu medinių klijuotųjų sijų tyrimas. Bandymuose naudota GL 28 klasės mediena. Bandinių matmenys – $45 \times 155 \times 3000 \text{mm}$. Dalis elementų tirti neatlikus jokio sustiprinimo, tačiau bandiniai, kurie buvo sustiprinti metaliniu strypu dar perpjauti pusiau, viename jų krašte padaryta pusapvalė išdroža, tuomet dalys suklijuotos. Taip gautas elementas su 16mm diametro ertme per vidurį. Nustačius drėgnį ir atlikus vizualinę apžiūrą, bandiniai suskirstyti į tiriamąsias grupes: nesutvirtintus (kontrolinė grupė), sutvirtintus neįtemptu strypu, sutvirtintus įtemptu, neįtvirtintu strypu, bei įtemptu ir įtvirtintu strypu (Pav. 1.6). Sijų tvirtinimui naudoti 12mm skersmens plieniniai strypai.

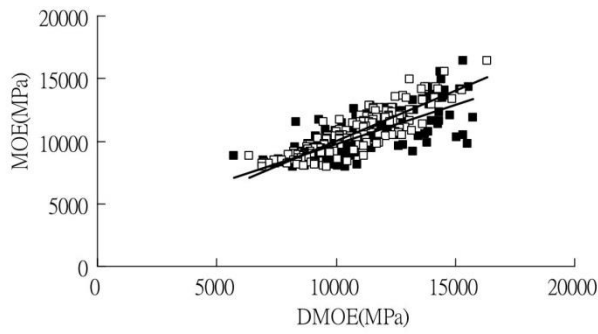


Pav. 1.6 Įtemptais strypais sustiprintos klijuotos medienos sijos

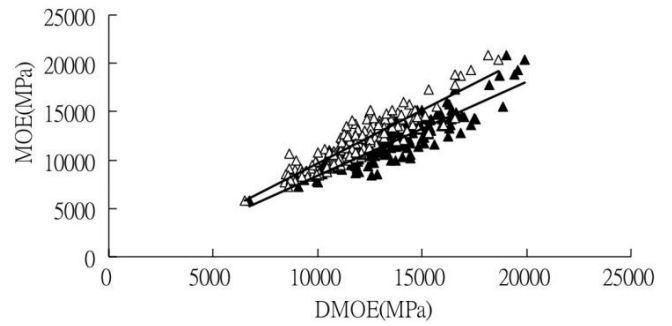
Sijos bandytos atliekant keturių taškų lenkimo tyrimą. Išmatuotas ryšys tarp naudotos jėgos ir įlinkio, sijos perlaužtos. Nustatyta, jog sijos, sustiprintos neįtemptu įtvirtintu metaliniu strypu buvo 29% stipresnės bei 28% standesnės, neįtvirtintu strypu – atitinkamai 18% ir 8%, lyginant su kontroliniais bandiniais. Naudojant iš anksto įtemptus strypus rezultatai buvo geresni – stiprumas padidėjo 40%, o standumas – 30%. Taip pat visi sustiprinti bandiniai suiro dėl lenkimo įtempių, plastiškai, o kontroliniai bandiniai – trapiai. Apkrovos sukelti poslinkiai sustiprintose sijose buvo panašūs. Kiekvienu atveju jie buvo apie 10% mažesni, nei nesustiprintose sijose.

Šiuo tyrimu pabrėžiama klijuotų medinių konstrukcijų sustiprinimo nauda. Ne tik padidėjęs stipris, tačiau ir elemento lūžio charakteristikos pasikeitimas iš trapiaus į plastišką suirimą, kuris yra lengviau prognozuojamas ir lengviau pastebimas iki galimos avarijos. Tyrimai nėra galutiniai, autoriai teigia atliekantys ilgalaikių apkrovų poveikio bandymus [27].

Taivano universitete atliktas kėnio (angl. *Douglas fir*) bei Japoninio kedro (angl. *Japanese cedar*) medienos, bei iš jų pagamintos klijuotos sluoksninės medienos mechaninių savybių vertinimas [28]. Bandymų metu naudota 138 kedro bei 150 kėnio bandinių. Iš ore džiovintų lentų išpjauti 38mm storio, 89mm pločio bei 3600mm ilgio elementai, kurių tankis atitinkamai buvo $\sim 520\text{kg/m}^3$ kedrui ir $\sim 530\text{kg/m}^3$ kėniui. Bandinių drėgnis po džiovinimo buvo 12 – 13%. Elementai vizualiai suskirstyti į tris klases: A klasė – statybinė mediena, B klasė – standartinė mediena, C klasė – pagalbinė mediena. Dinaminis tampros modulis nustatytas „Sylvatest“ įranga, sklaidžiančia 16kHz dažnio ultragarso bangas. Naudojantis dviem pjezoelektriniais davikliais (siūstuvu ir imtuvu skirtinguose lentos galuose) išmatuotas bangos sklaidimo greitis. Skersinių vibracijų tyrimas atliktas naudojant „Metriguard“ įrangą. Statinio tampros modulio nustatymui pasitelktas trijų taškų lenkimo bandymas. Tampros modulis apskaičiuotas pagal jėgos – įlinkio kreivę [28].



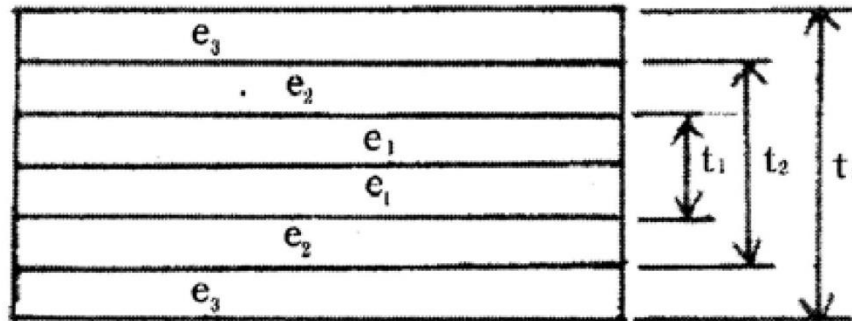
Pav. 1.7 Statinio ir dinaminio tampros modulio ryšys (Kedras) [n7]



Pav. 1.8 Statinio ir dinaminio tampros modulio ryšys (Kėnis) [n7]

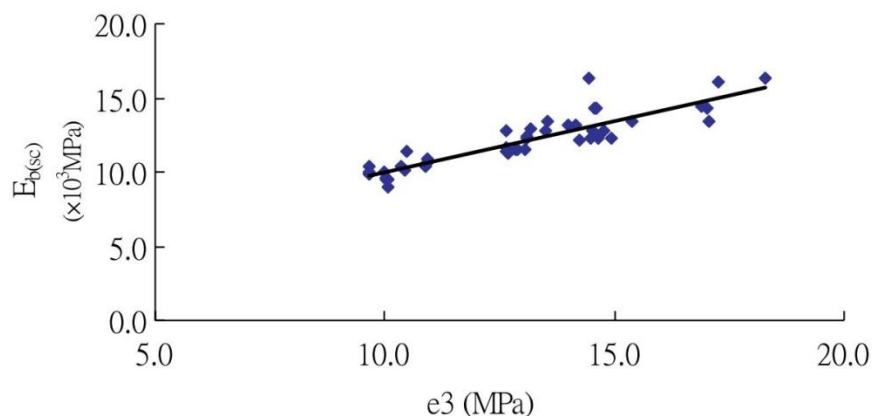
Paveikslėliuose 1.7 ir 1.8 vaizduojama statinio bei dinaminio tampros modulio koreliacija (pilnavidurės figūros vaizduoja tampros modulį, nustatytą ultragarso tyrimais, o tuščiavidurės – vibracijų metodu).

Kombinuojant klijuotos sluoksninės medienos sijas, stipriausi elementai buvo dedami kraštiniuose sluoksniuose (Pav. 1.9). Elementai suklijuoti ir supresuoti karštuoju būdu. Naudojantis tuo pačiu ultragarsiniu įrenginiu nustatytas bangos sklidimo lentjuostėmis greitis. Taip pat atliktas ir trijų taškų lenkimo bandymas.



Pav. 1.9 Klijuotos sluoksninės medienos elementų kombinacijos schema [28]

Tyrimais nustatyta, jog didinant išorinių elementų tampros modulį, didėja visos sijos tampros modulis. Ryšys pateikiamas 1.10 paveikslėlyje.

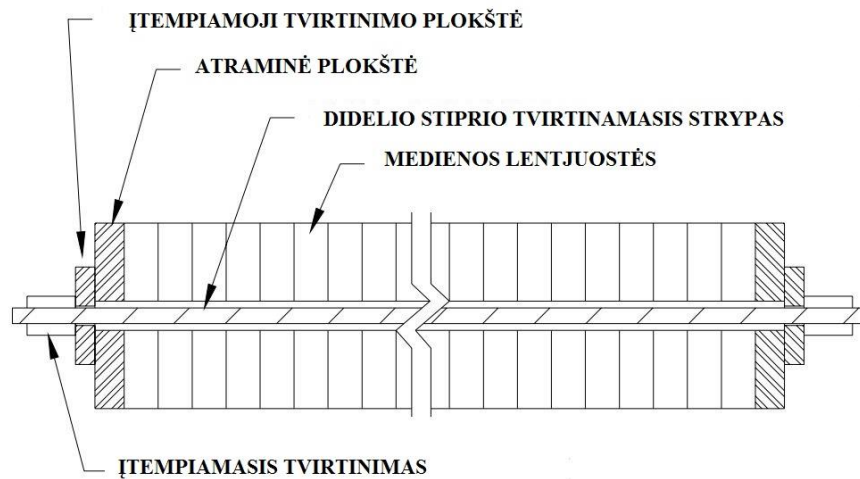


Pav. 1.10 Ryšys tarp išorinių sluoksnių ir bendro sijos tampros modulio [28]

Čia E (didžiąja) raide žymimas sijos tampros modulis, e_3 (mažąja) – sijos kraštinių sluoksnių tampros modulis.

Tyrimo rezultatai rodo, jog vizualinė gradacija yra ganėtinai patikima, kadangi aukštesnės klasės bandiniams ultragarso metodu nustatytas didesnis tamprumo modulis. Visgi pastaruoju metodu gauti rezultatai buvo didesni už tampros modulį gautą vibracijų ar lenkimo būdais, todėl autoriai teigia, jog nedestrukciniams medienos tyrimams labiau tinka vibracinis metodas. Numatomas klijuotos sijos tampros modulis apie 6% mažesnis už realų, o derinant skirtingų klasių lentjuostes galima išgauti pakankamai aukštos kokybės galutinį produktą [28].

Medines sijas tarpusavyje suveržiant metaliniais strypais (SLT – angl. *stress laminated timber*) galima pagaminti didelio ploto ar tarpatramio pagrindus. Tokio tipo inžineriniai medienos gaminiai naudojami terasų ar tiltų gamyboje, jiems nereikia klijavimo. Roberto Crocetti [34] atliktame pristatyme aptariami medinių tiltų tipai, jų privalumai bei trūkumai. Taip pat aprašomi minėtu principu pagaminti tiltai ir jų paklotai.

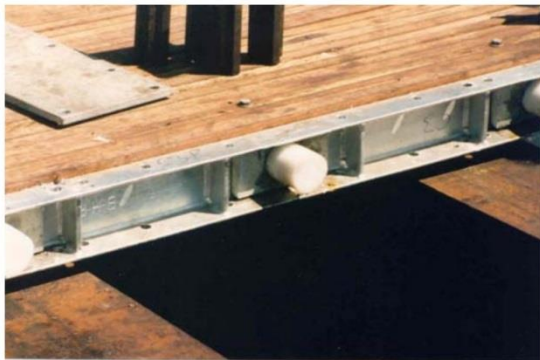


Pav. 1.11 SLT sistema [30]

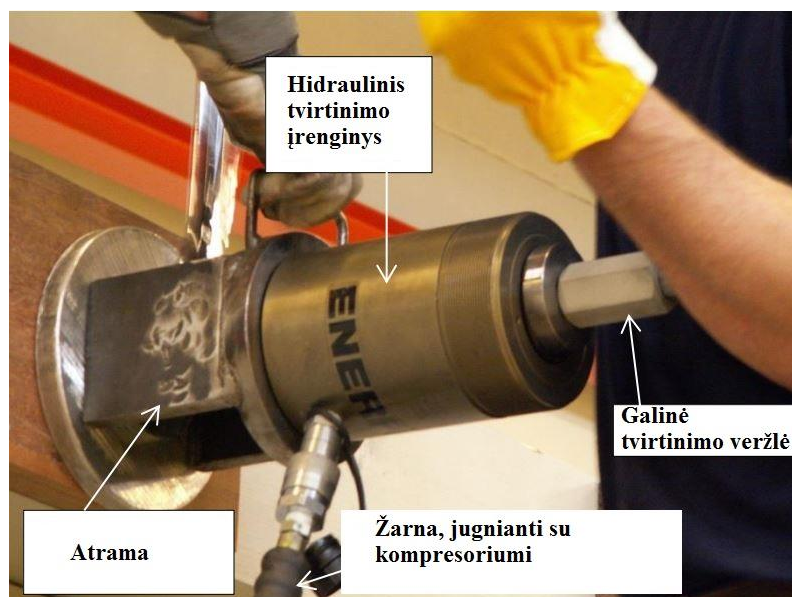
Paklotai montuojami tarp atramų. Ant jų gali būti tiesiama kelio danga, betonuojama. Gamybai naudojama lapuočių ir spygliuočių mediena [30].

Tiltų gamyboje lentjuostės dažniausiai orientuojamos išilgai, tačiau šiuo būdu sutvirtinti elementai gali būti dedami ir statmenai tilto ilgiui.

Visą sistemą sudaro lapuočių ar spygliuočių mediena, apsauginės priemonės, metalinės įtempiamosios detalės, užbaigiamosios detalės. Sistema turi būti apsaugota nuo tiesioginės drėgmės patekimo, tam puikiai tinka bituminė danga. Įrengiami specialūs drenazai. Užbaigiamosios detalės – įvairios metalinės plokštės ar rėmai (Pav. 1.12). Įtempimas vykdomas didelio stiprio varžtais (Pav. 1.13) arba hidrauliniiais domkratais.



Pav. 1.12 Tvirtinimo sistemos detalės [30]



Pav. 1.13 SLT įtempimas hidrauliniu domkratu [34]

Tokio tipo tiltai nereikalauja nuolatinės priežiūros – pakanka kartą į metus atlikti tam tikrus patikrinimus ir eksploatacinius darbus. Privalu stebėti ir kontroliuoti drėgmės lygį, taip pat prižiūrėti įtempiamosios sistemos lygį, jei reikia – pakartotinai priveržti elementus [30].

Vertinant tiltą kaip vientisą sistemą nustatyta, jog asfalto danga perima dalį medinių elementų rezonansinių virpesių. Šis tyrimas atliktas CLT (angl. *Cross laminated timber*) ir SLT (angl. *Stess laminated timber*) konstrukcijos tipų tiltams [31].

Inžineriniai medienos produktai pamažu išstumia masyviąją medieną iš rinkos, todėl tyrimai šia tema yra itin svarbūs. Nagrinėtuose straipsniuose aptariamos įtempiais laminuotos sijos – didelį potencialą turintis inžinerinis sprendimas, dėl savo teigiamų savybių tam tikrose sferose gali pakeisti klijuotą sluoksninę medieną.

2. BANDYMŲ METODIKA BEI PROGRAMA

2.1 Naudotos medžiagos

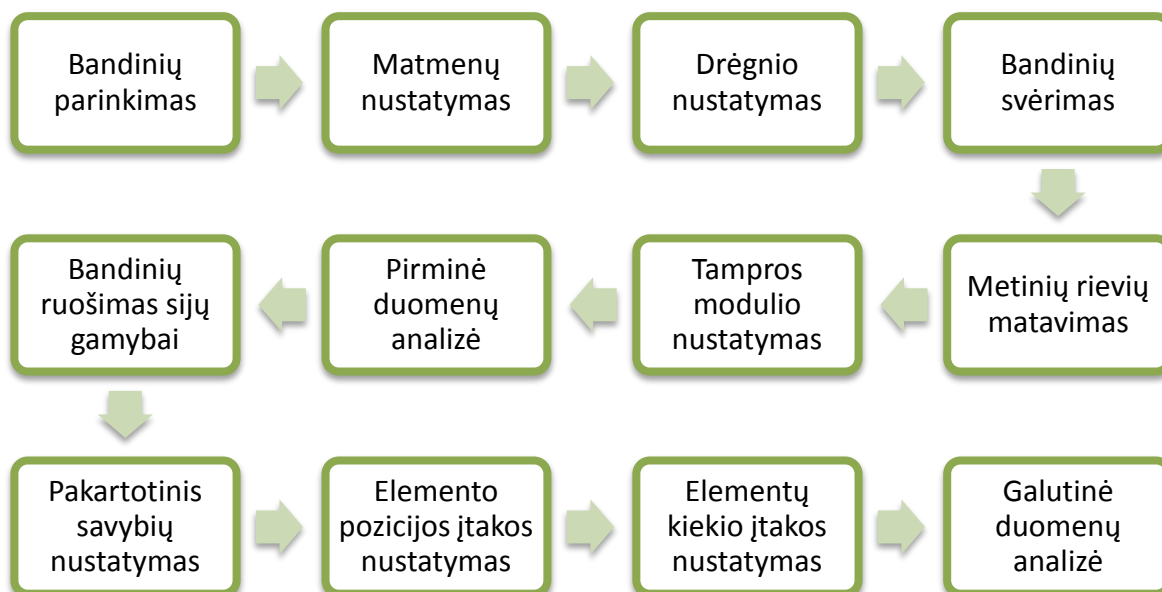
Tyrimuose naudotos sąlyginai nedidelių matmenų pušies (lot. *Pinus sylvestris*) medienos bandiniai: Atrankos principai:

Lentelė 2.1 Tyrimuose naudoti bandiniai

Tyrimas	Bandinio matmenys (bxhxl) mm	Bandinio matmenys (bxhxl) mm	Bandinio matmenys (bxhxl) mm
	20x60x750	35x88x950	45x170x1010
Fizikinių savybių bei tampros modulio nustatymas	+	+	+
Elemento pozicijos įtakos nustatymas	+		
Elementų kiekio įtakos nustatymas		+	+
Klijuotos sijos tyrimas			+
Keturių taškų lenkimo bandymas		+	

2.2 Bandymų seka ir naudota įranga

Bandymų eigos schema nurodoma 2.1 paveikslėlyje.



Pav. 2.1 Principinė bandymų eigos schema

Matmenų nustatymas. Bandinių skerspjūvis nustatytas naudojantis slankmačiu, kurio paklaida ($\pm 0,02\text{mm}$).

Drėgniui nustatyti naudoti drėgmėmačiai „Hydromette H35“ bei „Mastech MS6900“ (pav. 2.2) (tikslumas $\pm 0,1\%$).



Pav. 2.2 Bandymuose naudoti drėgmėmačiai

Naudotos „KERN DE 60K20N“ svarstyklės (Sveriamoji geba – iki 60kg, tikslumas $\pm 20\text{g}$).
Metinių rėvių matavimas pavaizduotas 2.3 paveikslėlyje.



Pav. 2.3 Metinių rėvių pločio nustatymas

Tampros modulio bei stiprio klasės nustatymui naudotas įrenginys „Timber Grader MTG“ (Pav. 2.4). Gamintojų teigimu, aparatas tampros modulį nustato $\pm 0,5\%$ tikslumu.



Pav. 2.4 „Timber Grader MTG“ įrenginys

Šis įrankis išmatuoja medienos rezonansinį dažnį, o programinė įranga pagal pateiktus duomenis apskaičiuoja medienos stiprį bei standumą, ir priskiria jai klasę (C18...C50 ar D30...D70). Pagal „LST EN 338-2004“ standartus. Įrenginys pagamintas Olandijoje (Brookhuis Micro-Electronics, Enschede).

Bandymai buvo atliekami lentas atremiant dviejuose taškuose (Pav 2.5).



Pav. 2.5 Tampros modulio nustatymo darbo vieta

Atliekant pirminę duomenų analizę susisteminti pavienių elementų duomenys, sudaryti tampros modulio priklausomybės grafikai nuo atskirų fizikinių medienos savybių

Po pirminės duomenų analizės atrinkti charakteringi bandiniai sijų gamybai. Elementai išrūšiuoti pagal matmenis, tankį bei tampros modulį. Nemaža dalis lentų nebuvo tinkamos varžyti į sudėtines sijas. Nuo ilgo buvimo sausoje aplinkoje jos išlinko (Pav. 2.6.), suskilinėjo.



Pav. 2.6 Dėl nuodžiūvio išlinkusi lenta

Elementai buvo kalibruojami, ko pasekoje pakito jų matmenys, todėl iš naujo nustatyti jų parametrai, kuriais remiantis atlikti tolimesni bandymai.

Sijos kombinuotos jas tarpusavyje suveržiant confirmatoriais (Pav.2.7) arba srieginiais 8mm skersmens strypais su veržlėmis abejuose galuose. Siekiant išvengti didelio lokalaus gniuždymo, tarp veržlės ir medienos dėta poveržlė (Pav. 2.8).



Pav. 2.7 Suvaržymas confirmatoriais



Pav 2.8 Suvaržymas srieginiais strypais



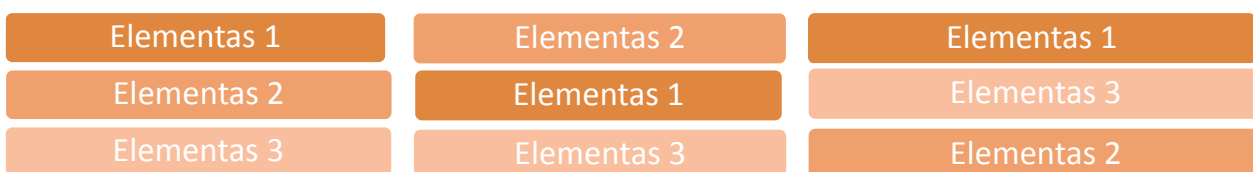
Pav. 2.9 Suvaržymas srieginiais strypais



Pav. 2.10 Suvaržymo metodas nurodytas literatūroje [33]

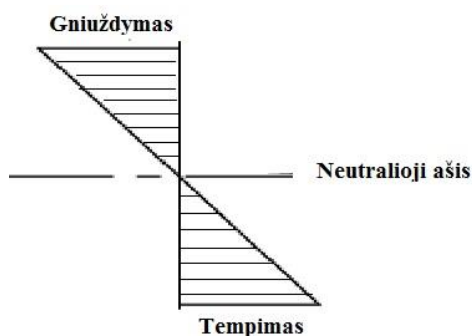
Paveikslėlyje 2.10 nurodoma „Fibre-gen“ taikytas varžymo metodas [33]. Nurodoma, jog į tarpus lengvai telpa popieriaus lapas. Mano pasirinktu metodu bandiniai (Pav. 2.7 – 2.9) suveržti glaudžiau, nors ir buvo pažeistas jų skerspjūvis. Minėtoje medžiagoje [33] taip pat nurodoma, jog šie defektai, kaip ir šakos, žemo dažnio akustinėms bangoms yra praktiškai nematomi. Jei bangos ilgis didesnis už kliūtį (šiuo atveju tai metalinis strypas), tai ji ją tiesiog aplenkia.

Nustatinėta elemento pozicijos sijoje įtaka jos tampriaplastiškosioms savybėms. Šiam tyrimui naudoti mažiausių matmenų bandiniai, sijas kombinuojant iš trijų elementų, pastaruosius keičiant vietomis (Pav. 2.11).



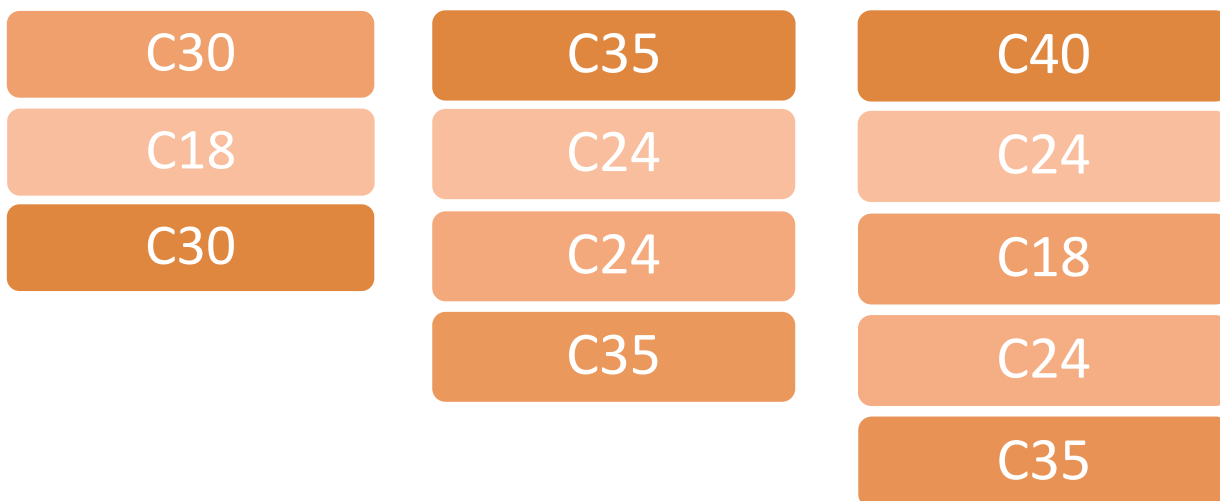
Pav. 2.11 Elementų kombinacijų derinių pavyzdinė schema

Kitame bandyme sijos kombinuotos didinant jų elementų kiekį. Siekta nustatyti pavienių elementų ir visos sijos savybių sąsajas. Gaminant statybines konstrukcijas (klijuotą medieną, dvitėjas sijas), koncentruojamasi į išorinius sluoksnius. Taip yra todėl, kad sijos dirba lenkimui, kurio metu viršutiniai sluoksniai yra gniuždomi, o apatiniai – tempiami, taigi įtempiai pasiskirsto kraštiniuose sluoksniuose (Pav. 2.12)



Pav. 2.12 Lenkiamos sijos įtempių diagrama

Dėl šios priežasties, sudarant derinius bandymams, išoriniuose sluoksniuose buvo dedamos stipriausios lentjuostės, o vidiniuose – silpnesnės (Pav.2.13).



Pav. 2.13 Elementų skaičiaus ir stiprio klasių kombinacijų pavyzdinė schema

Analogiškas sijų kombinavimo būdas (Pav. 1.6) buvo pritaikytas Taivano universiteto mokslininkų, gaminant klijuotos sluoksninės medienos sijas [28]. Platesnė informacija pateikiama literatūros apžvalgoje.

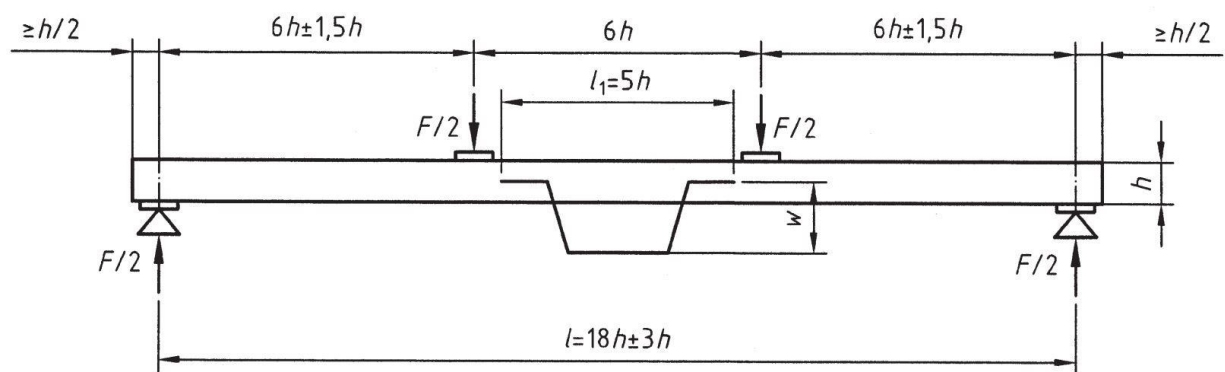
Srieginiais strypais suveržtų sijų bandymai atlikti kelių skirtingų matmenų bandiniams.

Kitam bandymui atrinkti 24 vnt. nepažeisto skerspjūvio bandiniai. Remiantis aukščiau aprašyta kombinavimo schema elementai suklijuoti. Klijavimui naudoti dvikomponenčiai polivinilo acetato klijai „Lipalas D4“ [37]. Klijais padengti abiejų klijuojamų elementų paviršiai. Bandiniai suspausti ir palikti kietėti.



Pav. 2.14 Klijuoti elementai

Nedestrukcinį tyrimų verifikavimas. Remiantis EN 408 [29] standartu atlikti lentjuosčių keturių taškų lenkimo bandymai. Bandymo schema pavaizduota 2.15 paveikslėlyje.



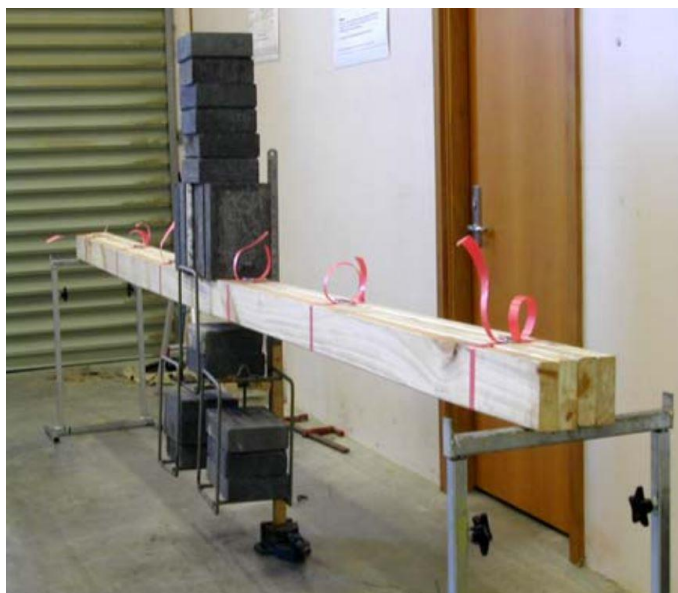
Pav. 2.15 keturių taškų lenkimo bandymo schema

Bandymui naudota universali lenkimo mašina „SMB BP-16“ (Pav. 2.16). Maksimali įrenginio jėga – 164kN. Lentos buvo apkraunamos jėga, lygia 0,1 ir 0,4 maksimalaus bandinio stiprio. Esant šioms apkrovoms matuotas įlinkis.



Pav. 2.16 Keturių taškų lenkimo bandymas

Darbe, išleistame „Fibre-gen“ įlinkiams matuoti pasirinktas paprastesnis metodas [33]. Elementai buvo apkraunami plytomis, įstatytomis į metalinius rėmus (Pav. 2.17).



Pav. 2.17 Statinio tampros modulio nustatymas SLT sijai [33]

Bandymų metu nustatytas globalus lenkimo momentas. Jis apskaičiuotas pagal formulę (2.1):

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad 2.1$$

Čia:

$E_{m,g}$ – globalus tampros modulis, N/mm²;

l – atstumas tarp atramų, mm;

$F_2 - F_1$ – apkrovos padidėjimas, N;

b – bandinio skerspjūvio plotis, mm;

h – bandinio skerspjūvio aukštis, m;

$w_1 - w_2$ – įlinkio padidėjimas atsiradęs lenkimo jėgą padidinus nuo F_1 iki F_2 , mm;

a – atstumas tarp apkrovos ir artimiausio suporto, mm.

Taip pat pagal formulę (2.2) nustatytas bandinių stipris lenkiant:

$$f_m = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad 2.2$$

Čia:

f_m – bandinio stipris lenkiant, MPa;

F – lūžio jėga, N;

L – atstumas tarp atramų, mm;

b – bandinio skerspjūvio plotis, mm;

h – bandinio skerspjūvio aukštis, mm.

2.3 Statistinis duomenų įvertinimas

Atsitiktinių dydžių pasiskirstymas dažniausiai charakterizuojamas Gauso dėsnio. Darbe atlikta statistinė duomenų analizė naudojantis šiomis formulėmis:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x - \bar{X}}{2\sigma^2}}; \quad (2.4)$$

Čia:

x – atsitiktinio dydžio galima reikšmė;

y – atsitiktinio dydžio galimos reikšmės tikimybės tankis;

\bar{X} – atsitiktinio dydžio vidurkis;

σ – atsitiktinio dydžio vidutinis kvadratinis nuokrypis;

e – natūralių logaritmų pagrindas.

Aritmetinis vidurkis: \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.5)$$

Dispersija s^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}; \quad (2.6)$$

Vidutinis kvadratinis nuokrypis s :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}; \quad (2.7)$$

Variacijos koeficientas V :

$$V = \frac{s}{\bar{x}} 100\%; \quad (2.6)$$

Pastarasis dydis nusako duomenų sklaidos dydį.

Atsitiktinė paklaida Δ :

$$\Delta = t_{\beta} \frac{s}{\sqrt{n}}; \quad (2.8)$$

Čia:

t_{β} – koeficientas (Stjudento kriterijus), priklausantis nuo užduotos pasiklovimo tikimybės β ir nuo laisvės laipsnių skaičiaus $\varphi = n - 1$, randamas literatūroje.

Pasikliautinis intervalas I_{β} :

$$I_{\beta} = (\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta); \quad (2.9)$$

Santykinė atsitiktinė paklaida δ_{ats} :

$$\delta_{ats} = \frac{\Delta}{\bar{x}} 100\%; \quad (2.10)$$

Bendroji matavimų rezultato paklaida δ_b :

$$\delta_b = \sqrt{\delta_{ats}^2 + \delta^2}; \quad (2.11)$$

3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1 Nedestrukciniai sijų ir elementų tyrimai

3.1.1 Medienos savybių nustatymas ir komplektų sijoms parinkimas

Natūralu, jog visų tirtų bandinių drėgnis buvo skirtingas (tirtų bandinių drėgnis svyravo nuo 8,6 iki 11,5%) (Išmatuoti ir perskaičiuoti tankiai pateikiami lentelėje, priede Nr.1), todėl medienos tankis perskaičiuotas, esant 12% drėgniui. Naudota formulė:

$$\rho_{12} = \frac{\rho_{\omega}}{K_{12}^{\omega}} \quad (3.1)$$

Čia:

ρ_{ω} – esamas tankis;

K_{12}^{ω} – perskaičiavimo koeficientas, priklausantis nuo išbandyto bandinio drėgnio [21].

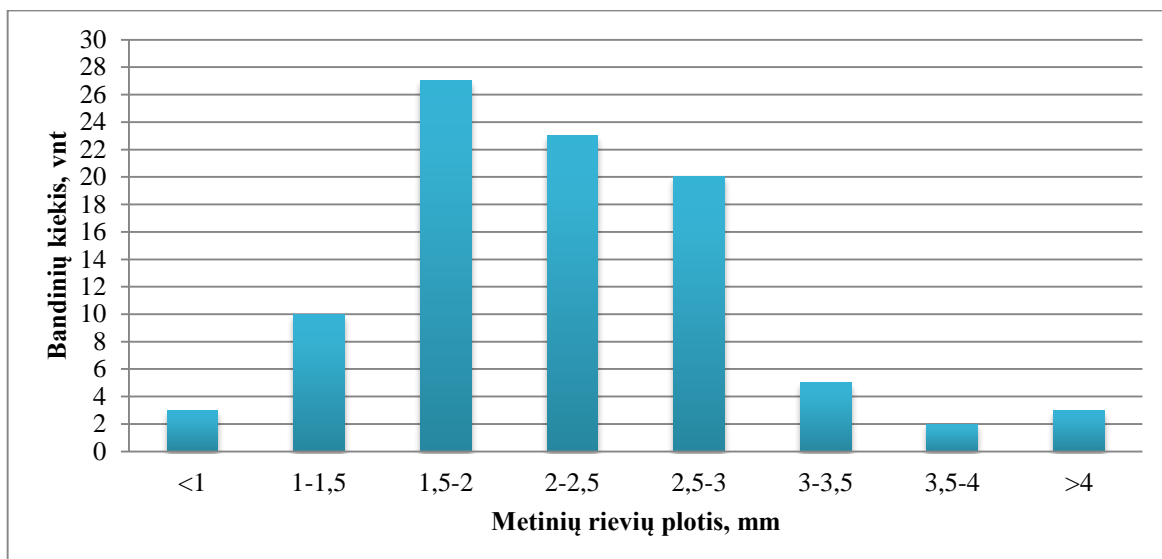
Lentelė 3.1 Bandinių tankių statistiniai rezultatai

Vidurkis	480,484
Standartinė paklaida	4,903
Mediana	479,513
Moda	444,263
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	53,260
Imties dispersija	2836,601
Ekscesas	0,935
Asimetrijos koeficientas	0,460
Mažiausia reikšmė	338,782
Didžiausia reikšmė	655,248

Nustatytas vidutinis bandinių metinių rėvių plotis. Rezultatai svyravo nuo 0,95mm iki 4,54mm.

Lentelė 3.2 Metinių rėvių statistiniai rezultatai

Vidurkis	2,214
Standartinė paklaida	0,076
Mediana	2,118
Moda	2,500
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	0,733
Imties dispersija	0,537
Ekscesas	1,065
Asimetrijos koeficientas	0,764
Mažiausia reikšmė	0,954
Didžiausia reikšmė	4,538



Pav. 3.1 Vidutinio metinių rėvių pločio pasiskirstymas

Nustatyti bandinių tampros moduliai bei stiprio klasės (3.1 lentelė). Likę duomenys pateikiami pirmame 1 priede.

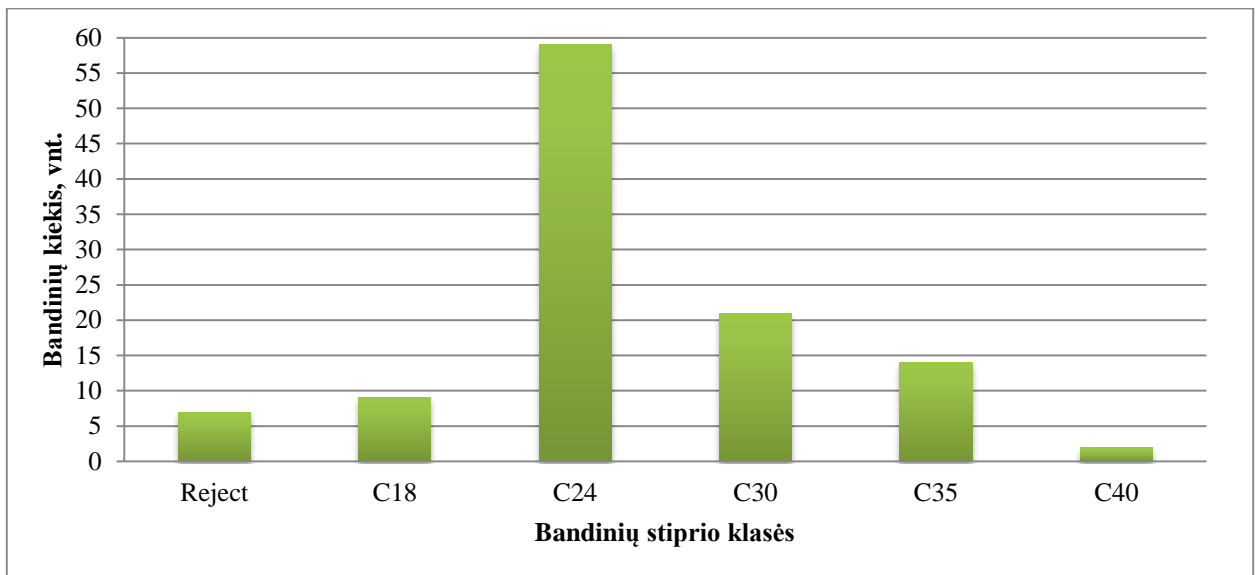
Lentelė 3.3 Bandinių duomenys

Tampros modulis, MPa	Stiprio klasė	Bandinių kiekis, vnt.
3035 – 8782	<i>Reject</i> (nekonstrukcinė mediena)	7
7754 – 9905	C18	9
9579 – 13114	C24	59
11479 – 15420	C30	21
13074 – 17399	C35	14
18487 – 19673	C40	2

Lentelė 3.4 Tampros modulių statistiniai rezultatai

Vidurkis	11892,455
Standartinė paklaida	269,502
Mediana	11826,000
Moda	15420,000
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	2852,143
Imties dispersija	8134721,259
Ekscesas	1,777
Asimetrijos koeficientas	-0,484
Mažiausia reikšmė	3035,000
Didžiausia reikšmė	19673,000

Stiprio klasių pasiskirstymas grafiškai vaizduojamas 3.2 paveikslėlyje



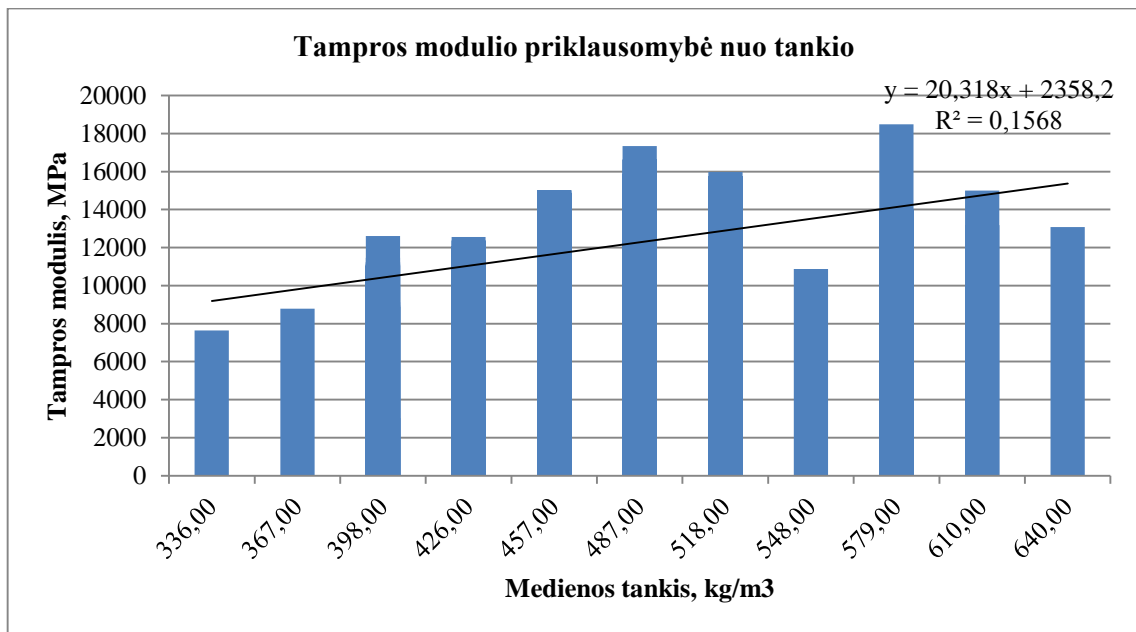
Pav. 3.2 Bandinių stiprumo klasių pasiskirstymas

Nors įrenginiu galima tirti lentas nuo 750mm ilgio, tačiau realiai jis skirtas didesnių matmenų lentoms, statybinei medienai.

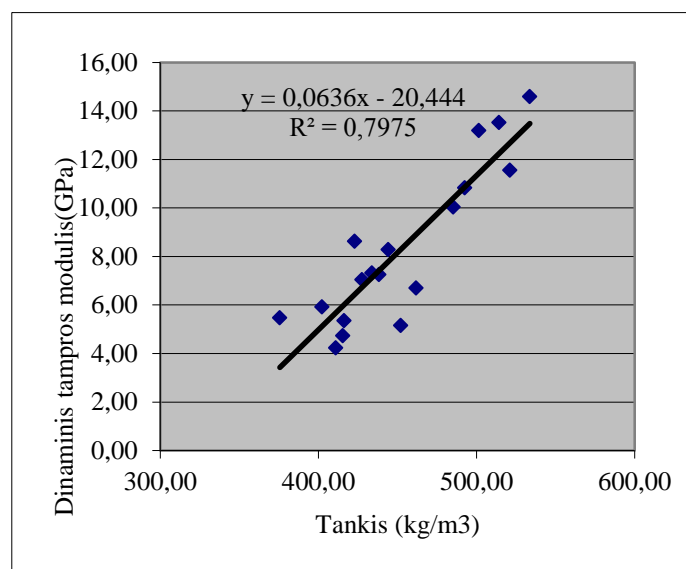
Atlikus pradinių duomenų analizę, atrinkti bandiniai tolimesniems tyrimams. Elementų pozicijos įtakai sijos tampriaplastiškosios savybėms (3.1.3 dalis) nustatyti pasirinkti 750x60x20mm bandiniai. Elementų kiekio įtakos nustatymui (3.1.4 dalis) atrinkti bandiniai, kurių tampros modulių vertės leido juos kombinuoti pagal 2.12 pav. [7] pateiktą schemą.

3.1.2 Tampros modulio priklausomybė nuo fizikinių medienos savybių

Tirtas ryšys tarp medienos tankio ir jos tampros modulio. Rezultatai pateikiami 3.3 paveikslėlyje.



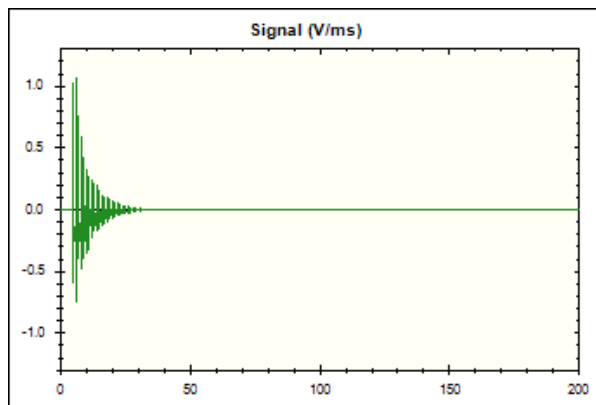
Pav. 3.3 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio



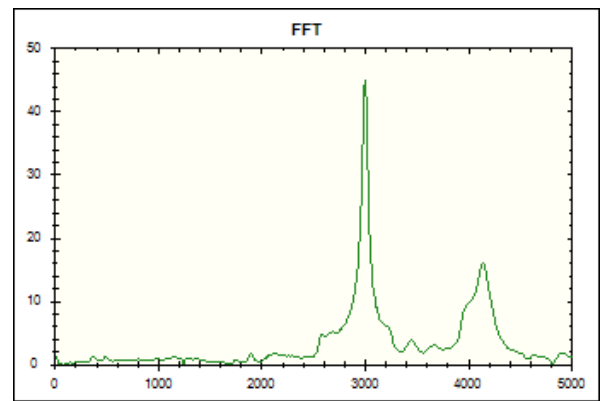
Pav. 3.4 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio (Naujosios Zelandijos tyrimai) [33]

Determinacijos koeficientas, gautas Naujosios Zelandijos mokslininkų gerokai aukštesnis už gautą mano atliktais tyrimais. Regis Pommier ir kt tyrimo, atlikto su 18% drėgnio pušies bandiniais, šių dydžių koreliacija buvo 0,68 [6]. Tame pačiame straipsnyje cituojamų darbų rezultatai buvo mažesni.

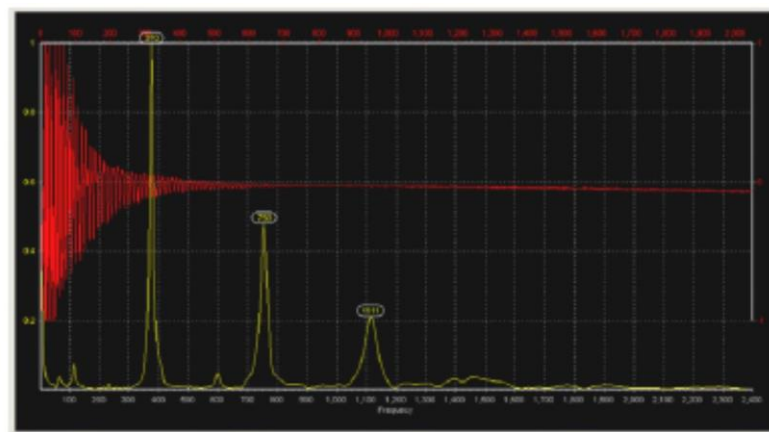
Pateikiamas akustinės bangos elgsenos kompiuterinės programos atvaizdavimas (Pav. 3.5)



a



b

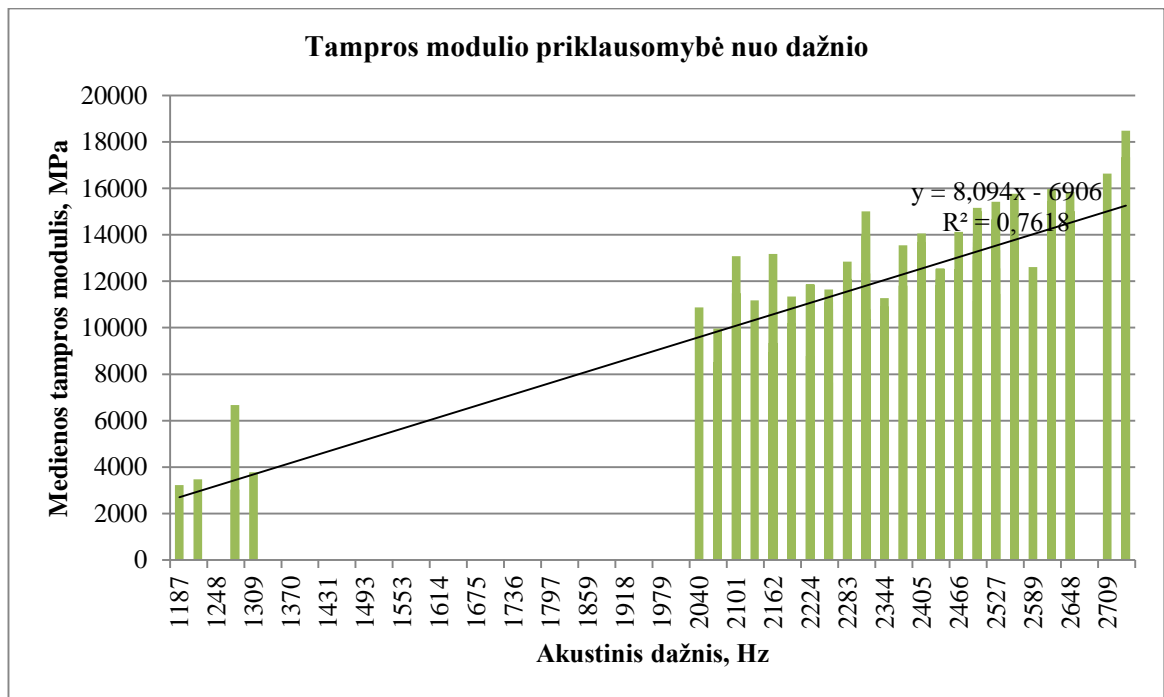


c

Pav. 3.5 Bangos parametrai

Nurodomas rezonansinės bangos slopimas. Paveikslėliai a ir b – tipiniai duomenys (p3 bandinys) gauti „Timber Grader MTG“ įrenginiu. Paveikslėlis C [33] pavyzdiniai aparato „Director HM200“, naudoto „Fibre-gen“ bandymuose duomenys.

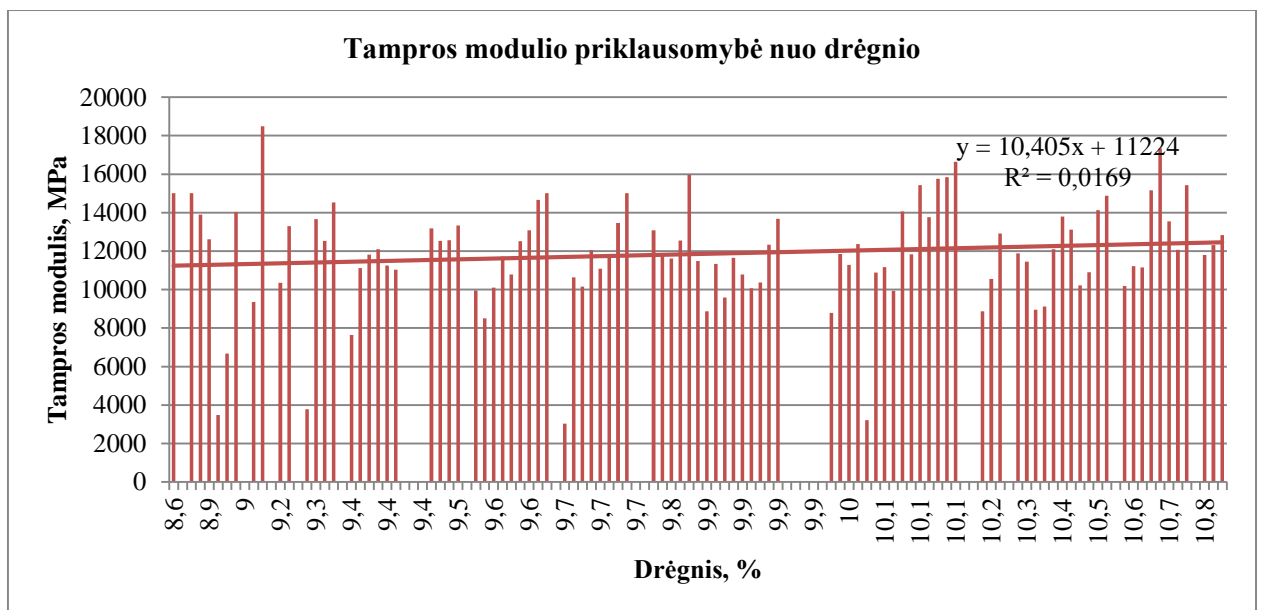
Medienos rezonansinio dažnio bei tampros modulio priklausomybė (Pav. 3.6).



Pav. 3.6 Tampros modulio priklausomybė nuo dažnio

Determinacijos koeficientas 0,76. Naujojoje Zelandijoje atliktuose tyrimuose nustatyta, jog šis koeficientas tarp tampros modulio ir bangos greičio yra 0,95 [33] (6 priedas).

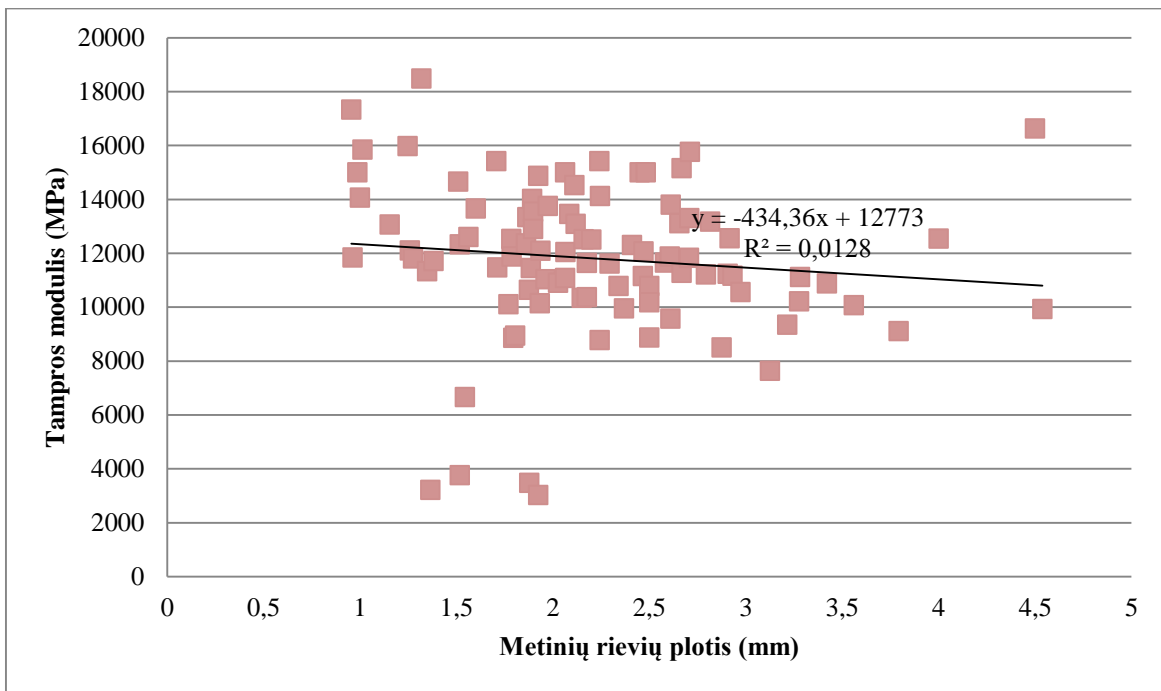
Taip pat pateikiama tampros modulio priklausomybė nuo medienos drėgčio (Pav. 3.7).



Pav. 3.7 Tampros modulio priklausomybė nuo drėgčio

Bandinių drėgnis svyravo nuo 8,6 iki 11,5%. Kaip ir tikėtasi, šiose ribose drėgnis beveik neturi įtakos medienos tampros moduliui.

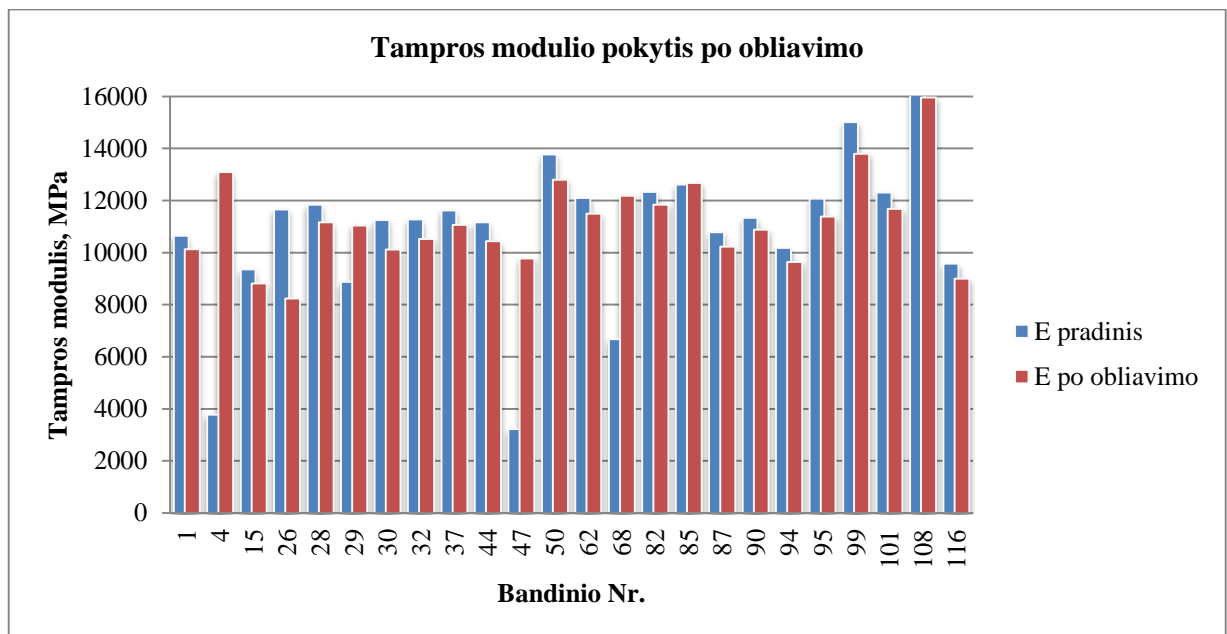
Metinių rievių pločio įtaka medienos tampros moduliui pateikiama 3.8. paveikslėlyje.



Pav. 3.8 Tampros modulio priklausomybė nuo metinių rievių pločio

Kaip matyti iš grafiko, sąsaja tarp šių dviejų savybių nėra stipri.

Prieš gaminant sijas, dalis elementų buvo nuobliuoti. Pateikiamas sijų tampros modulio pokytis po obliavimo.



Pav. 3.9 Tampros modulio pokytis po obliavimo

Tampros modulis, išskiriant kelias išimtis, daugeliu atvejų kito nežymiai. Visgi, net nedidelis matmenų pokytis gali keisti tampriąsias savybes.

3.1.3 Elementų pozicijos įtaka tampriaplastiškosios sijos savybėms.

Pagal nurodytą schemą (Pav. 1.9) sumontuotos sijos buvo tiriamos įrenginiu „Timber Grader MTG“. Fiksuoti kiekvienos lentjuostės duomenys, tuomet pakeičiama išdėstymo tvarka ir kartojamas duomenų užrašymas. Remiantis gautais rezultatais, nenustatyta, jog elemento padėtis stipriai įtakotų sijos savybes (3.5 Lentelė). Daugeliu atvejų, pakeitus lentjuostės poziciją nenustatytas joks galutinio tampros modulio pokytis.

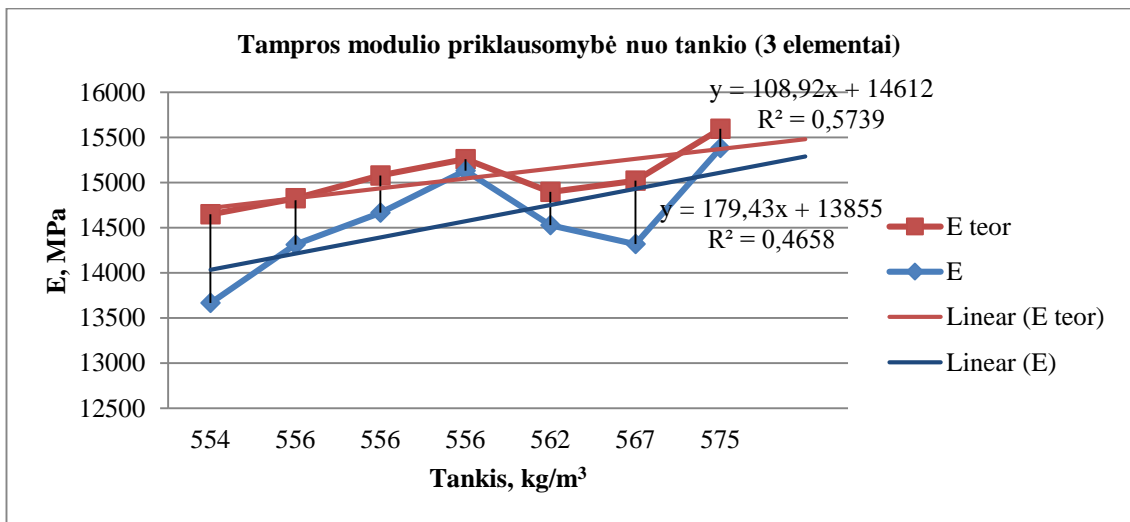
Lentelė 3.5 Sijos elementų tampros moduliai

Derinys	Klasė	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)	E (dominuojantis) (MPa)
M 2	C24	11478	11339	11408	11478
M 8		11478	11441	11478	
M 9		11441	11478	11478	
M 8	C24	11408	11441	11408	11408
M 2		11408	11441	11408	
M 9		11408	11441	11515	
M 2	C24	11408	11515	11478	11478
M 9		11408	11441	11478	
M 8		11478	11441	11478	
M 9	C24	11515	11478	11515	11515
M 8		11682	11478	11547	
M 7		11515	11515	11547	
M 9	C24	11441	11478	11441	11515
M 7		11408	11515	11478	
M 8		12548	11515	12548	
M 7	C24	11408	11515	11408	11515
M 9		11515	11408	11441	
M 8		11408	11515	11441	

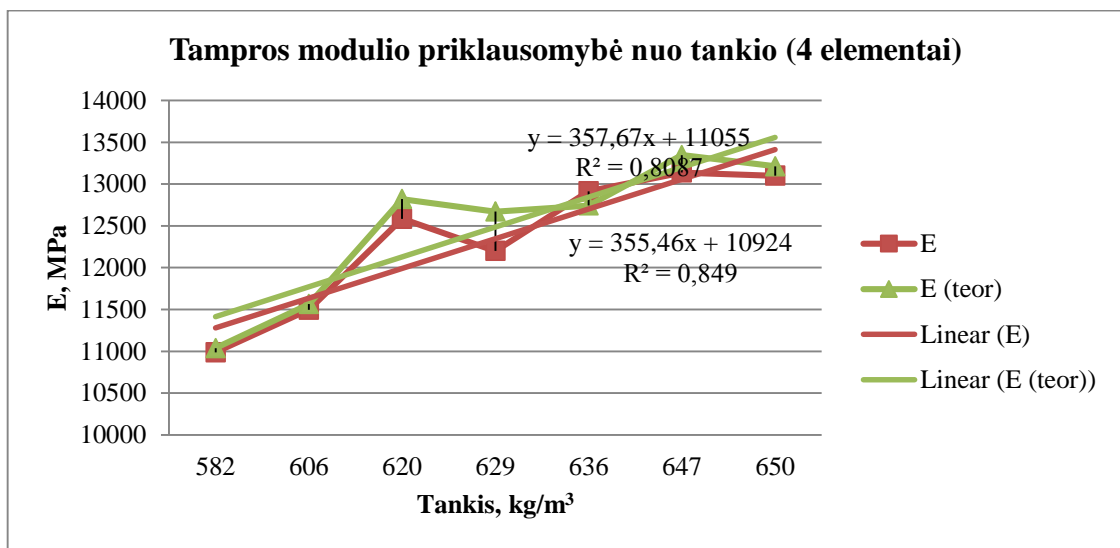
Bandymai kartoti tris kartus, iš priekio (E₁), iš galo (E₂) ir apvertus siją (E₃). Dominuojantis tampros modulis – dažniausiai pasitaikęs rezultatas derinio bandymų metu. Daugiau šio tyrimo rezultatų pateikiama lentelėje priede Nr.2.

3.1.4 Elementų kiekio įtaka sijos savybėms

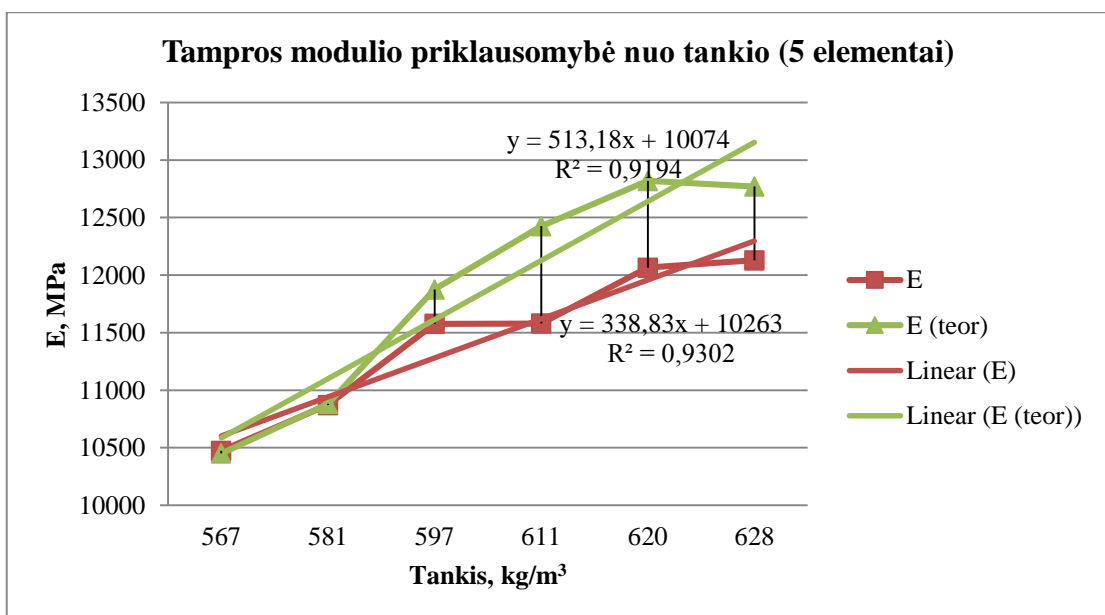
Šiuo bandymu tirta elementų kiekio (3, 4 ir 5) įtaka galutinėms sijos savybėms. Atsižvelgiant į anksčiau gautus rezultatus, elementų pozicija keičiama nebuvo. Bandymai atlikti su 42mm storio (gauti nuobliavus 45mm storio elementus), 1010mm ilgio ir 38mm storio, 950mm ilgio bandiniais. Sijos komplektuotos išoriniuose sluoksniuose dedant stipriausius elementus, o vidiniuose – silpniausius.



Pav. 3.10 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (3 elementai)



Pav. 3.11 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (4 elementai)



Pav. 3.12 Sijos tampros modulio priklausomybė nuo tankio (5 elementai)

Čia E – sijos bandymų metu dominuojanti tampros modulio vertė. E (teor.) – lentjuosčių tampros modulio vidurkis.

Iš grafikų matyti, jog didėjant elementų skerspjūviui, gerėja koreliacija tarp tankio bei tampros modulio.

Visais atvejais atskirų lentjuosčių vidurkis (teorinis dydis) buvo mažesnis už realiai nustatytą. Skirtumas tarp šių reikšmių – $\pm 5\%$.

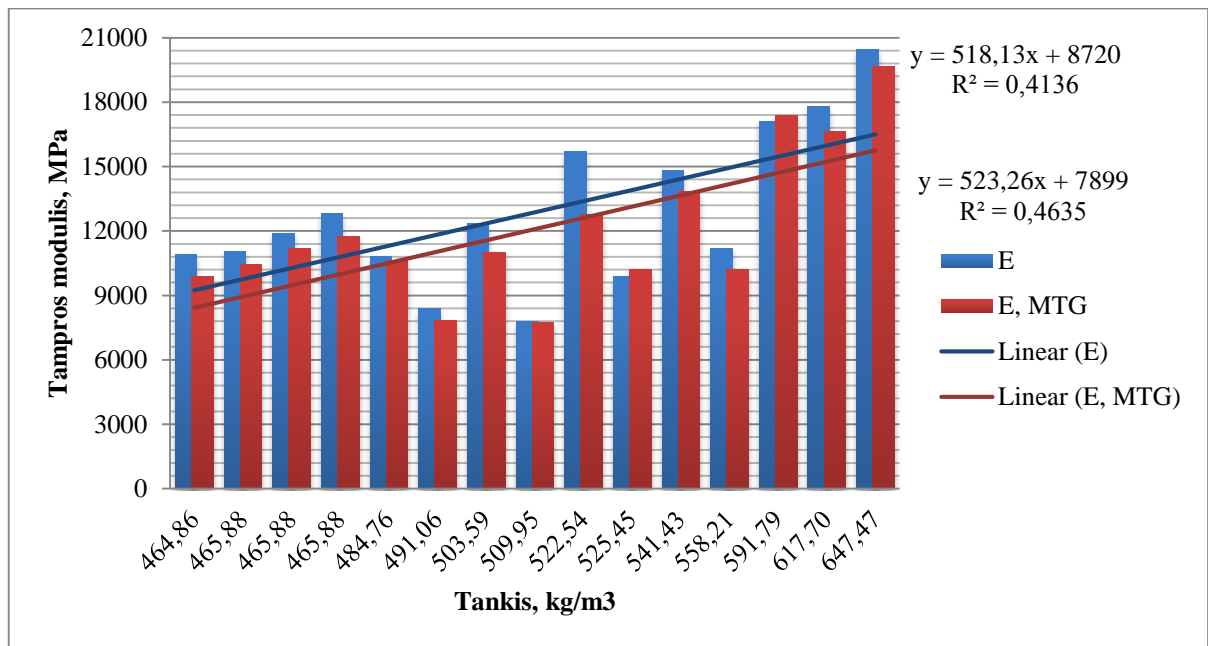
3.2 Statinis nedestrukcinis tyrimų verifikavimas

Lentelėje 3.6 pateikiami keturių taškų lenkimo bandymo metu bei „Timber Grader MTG“ įrenginiu gauti rezultatai. Pilna lentelė pateikiama priede Nr.1.

Lentelė 3.6 Keturių taškų lenkimo bandymo rezultatai

Bandinio Nr.	Tankis, kg/m ³	Tampros modulis E, MPa	Stipris f_m Mpa	Tampros modulis E_{MTG} , MPa
p1	525,4516	9869	54,68	10220
p2	503,5889	12325	58,10	11021
p3	647,4714	20458	103,78	19673
p4	509,9471	7802	51,24	7754
p5	558,2137	11163	55,28	10207
p6	617,6967	17793	95,23	16643
p7	541,4253	14833	58,67	13835
p8	464,8645	10913	50,96	9905
p9	465,8776	11064	56,68	10438
p10	591,7905	17113	83,22	17399
p11	465,8776	11893	43,49	11197
p12	484,7645	10809	64,16	10651
p13	491,0602	8389	49,09	7845
p14	465,8776	12831	75,84	11740
p15	522,5384	15694	65,08	12748

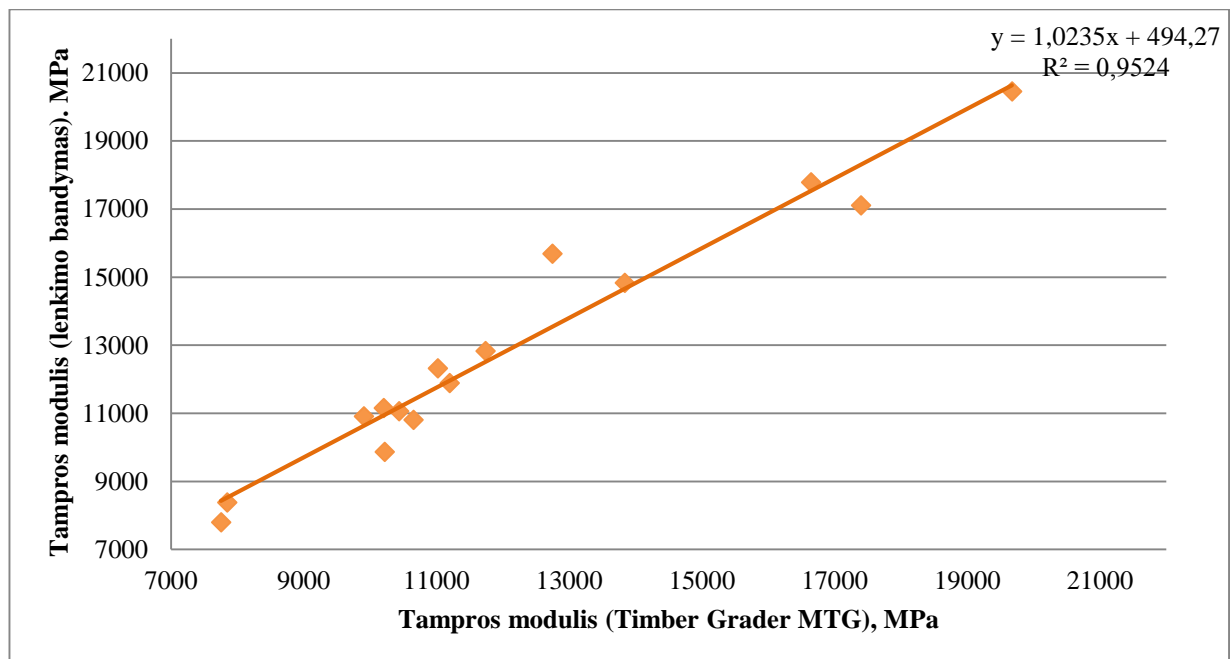
Grafike (Pav. 3.13) nurodoma tampros modulio priklausomybė nuo tankio.



Pav. 3.13 Tampros modulio priklausomybė nuo tankio

Iš duomenų matyti, jog lenkimo bandymais gautos tampros modulio vertės daugeliu atvejų šiek tiek didesnės (7%) nei išmatuotos aparatu „Timber Grader MTG“.

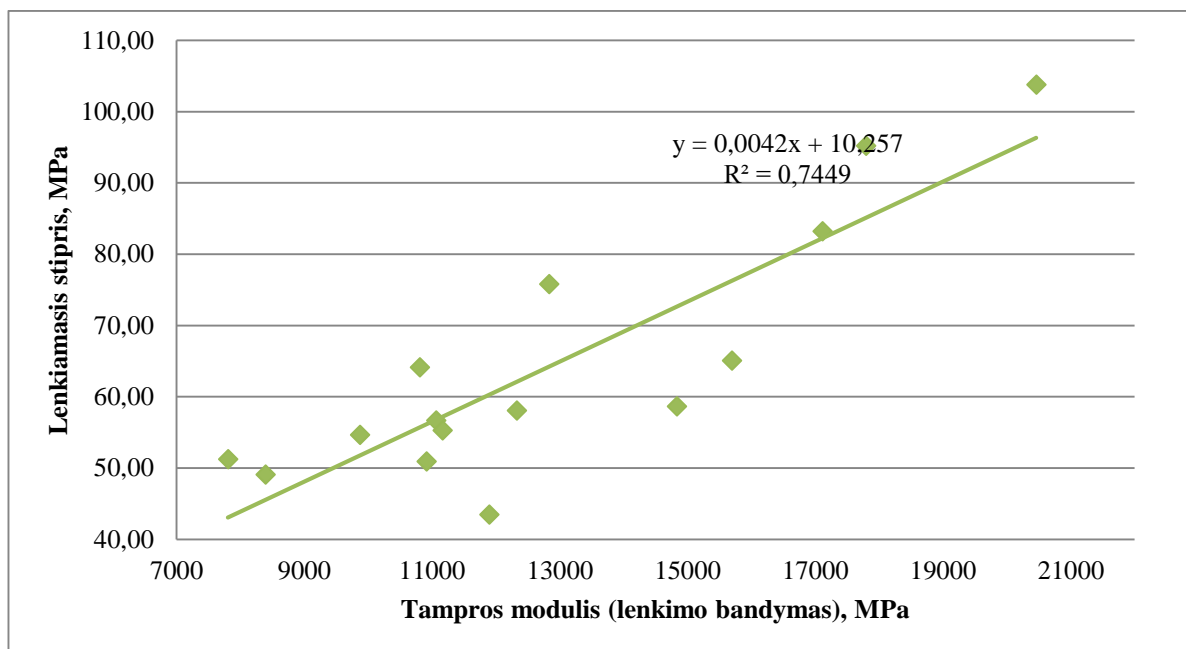
Kitame grafike (Pav. 3.14) palyginamos skirtingais metodais gautos tampros modulių vertės.



Pav. 3.14 Tampros modulių (keturių taškų lenkimo bandymas, „Timber Grader MTG“) tarpusavio koreliacija

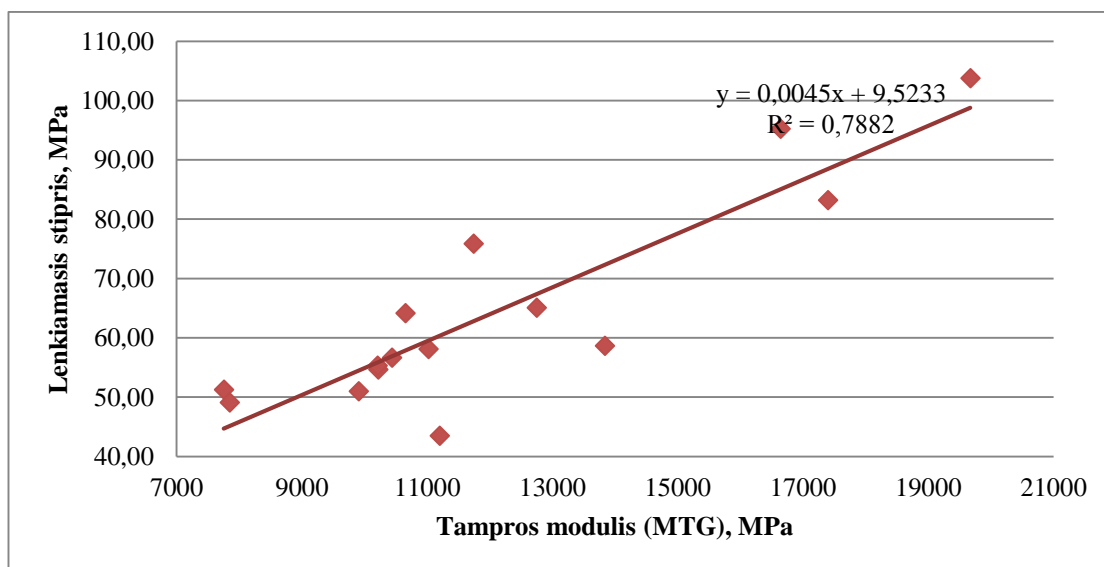
Grafike (Pav. 3.15) pateikiama lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo tampros modulio (lenkimo bandymas). Mano atlikto bandymo metu gautas determinacijos koeficientas (0,95)

didesnis nei Regis Pommier paskelbtame straipsnyje. Nurodoma, jog šis dydis tarp tampros modulio lenkiant ir nustatyto įrenginiu „Timber Grader MTG“ yra 0,85 [4].



Pav. 3.15 Tampros modulio ir lenkiamojo stiprio koreliacija

Iš grafikų matyti, jog lenkiamojo stiprio koreliacija su tampros moduliū nėra tokia aukšta, kaip tampros moduliū, gautū lenkiant ir įrenginiu „Timber Grader MTG“. Panašus dėsningumas nurodomas ir prieš tai minėtame straipsnyje [4]. R^2 tarp pastarųjų dydžių – 0,45.

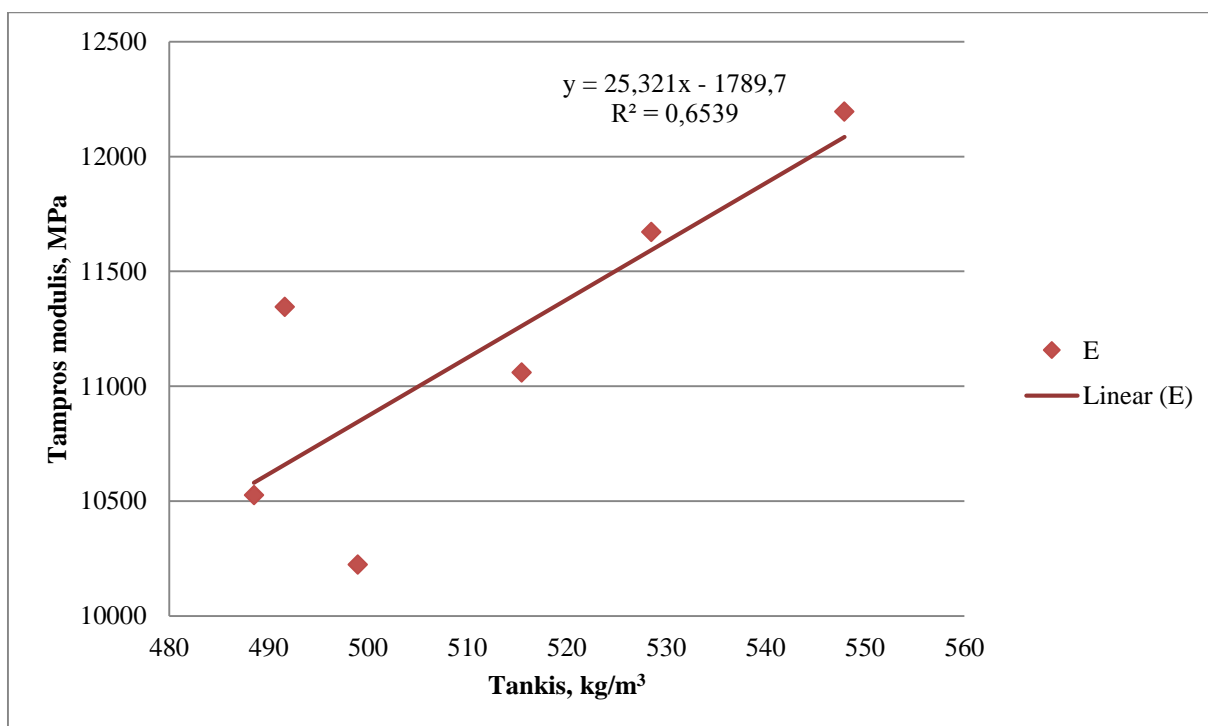


Pav. 3.16 Tampros modulio (MTG) ir stiprio lenkiant koreliacija

Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo tampros modulio, nustatyto „Timber Grader MTG“ yra kiek aukštesnė. Determinacijos koeficientas čia 0,79. R^2 , pateikiamas Regis Pommier yra 0,69 [4].

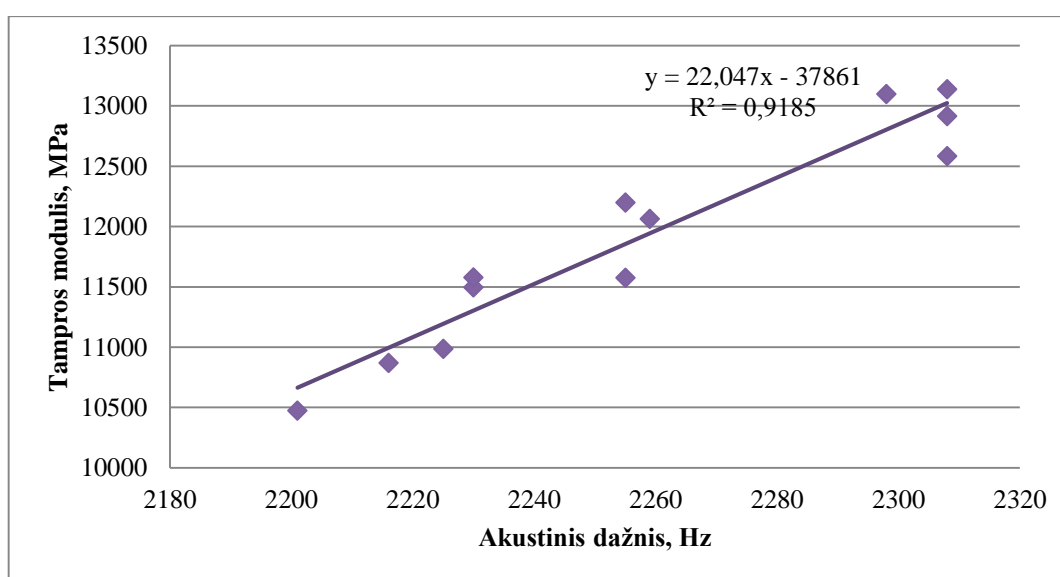
3.3 Pradinio įtempio metodu surinktų ir klijuotų sijų savybių palyginimas

Nuobliuotos ir išanalizuotos lentjuostės suklijuotos į sijas iš trijų, keturių ir penkių elementų. Grafike (Pav. 3.17) nurodoma šių sijų tampros modulio priklausomybė nuo tankio.

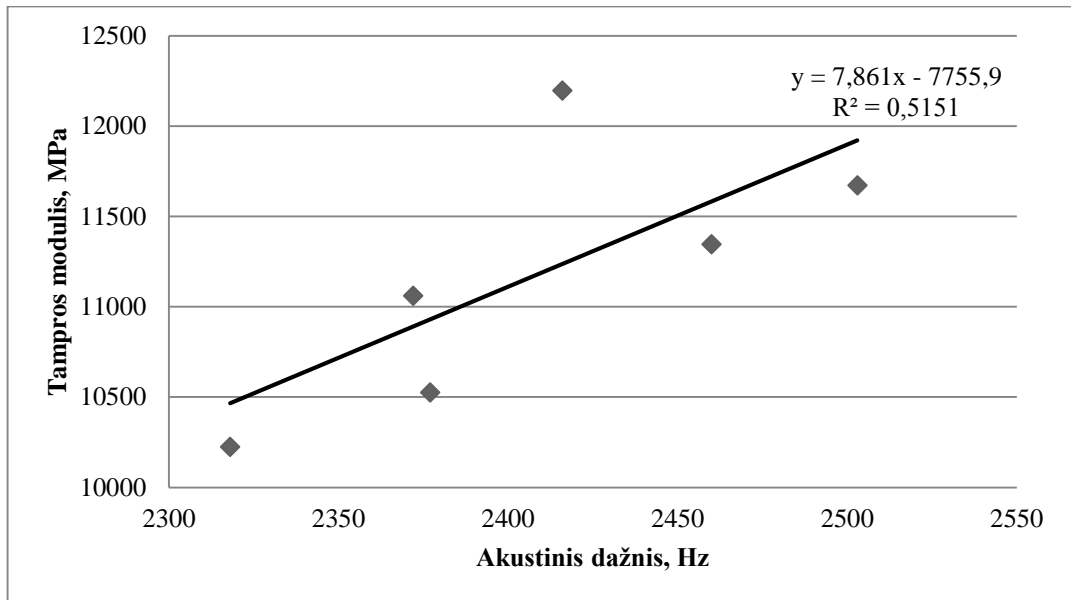


Pav. 3.17 Klijuotų sijų tampros modulio priklausomybė nuo tankio

Koreliacija tarp tankio ir tampros modulio klijuotoms sijoms yra didesnė nei srieginiais strypais suvaržytoms trijų elementų sijoms. Lyginant su sijomis iš keturių ar penkių elementų – pastarųjų dydžių priklausomybė aukštesnė pradinio įtempimo metodu surinktiems bandiniams.



Pav. 3.18 Tampros modulio priklausomybė nuo akustinio dažnio (pradinio įtempimo metodu)



Pav. 3.19 Klijuotos sijos tampros modulio priklausomybė nuo akustinio dažnio

Tampros modulio priklausomybė nuo akustinio dažnio klijuotai sijai pastebimai sumažėjo. Determinacijos koeficientas atskiriems elementams buvo 0,76, pradinio įtempimo metodu suvaržytoms sijoms – 0,92, o klijuotoms sijoms – 0,52.

4. IŠVADOS

1. Literatūroje pateikiama nemažai nedestrukcinų medienos stiprumo ir standumo prognozavimo metodų, kurių didžioji dalis remiasi akustiniais virpesiais. Taip pat nuolat pabrėžiama šių metodų tobulinimo svarba.

2. Atliekant pradinius bandinių tyrimus pastebėta, jog įrenginys labiau pritaikytas didesnių matmenų lentoms, tačiau pakankamai gerai prognozuoja ir trumpesnius elementus.

3. Tyrimo metu daugiausiai bandinių buvo priskirta C24 klasei. Tai Lietuvoje atliekamiems tyrimams būdinga rezultatų tendencija.

4. Sąryšis tarp pavienių fizikinių medienos savybių (tankio, akustinio dažnio, metinių rievų pločio) ir jos tampros modulio nėra itin glaudus, tačiau derinant kelis dydžius galima pasiekti ganėtinai aukštas koreliacijas.

5. Praktikoje nustatyta, jog net ir nežymaus sortimentų perkalibravimo metu galimas tampriaplastiškujų savybių pakitimas. Daugumos nuobliuotų lentjuosčių tampros modulis pakito nežymiai, tačiau keletu atvejų pokytis siekė iki 5-8 %.

6. Taikant keturių taškų lenkimo būdą nustatytas tikrasis statinis tampros modulis bei lenkiamasis stipris. Šių dydžių koreliacija su gautaisiais nedestrukcinio būdu yra pakankamai aukšta. Tampros modulio lenkiant ir išmatuoto įrenginiu „Timber Grader MTG“ priklausomybės determinacijos koeficientas siekia 0,95. Lenkiamojo stiprio koreliacija su tampros moduli (MTG) – 0,79. Gauti rezultatai ir dėsningumai panašūs į nurodytus literatūroje.

7. Varžant lentjuostas konfirmatoriais nenustatyta, jog elemento padėtis turėtų įtakos tampros moduliui, gautam nedestrukcinio metodu. Didinant elementų kiekį pastebėta stabilesnė koreliacija su sijos tankiu. Suklijuotų elementų elgsena buvo panaši į strypais suvaržytą. Koreliacija tarp tampros modulio ir tankio buvo didesnė suvaržytoms sijoms. Taip pat ir ryšys tarp tampros modulio bei akustinio dažnio.

Apibendrinant atliktus tyrimus nustatyta, kad varžymas srieginiais strypais pasirodė esąs patogus ir greitas būdas ištirti sijų iš skirtingų elementų kombinacijų tampros modulius. Tikėtina, kad šis naujas metodas (SLT) yra gera alternatyva klijuotoms sluoksniinėms sijoms ir turi perspektyvas gaminti jas Lietuvoje. Rekomenduojami tolimesni šios srities tyrimai, varijuojant bandinių biologine rūšimi, matmenimis, varžomąja technika bei tiriamąja įranga.

5. LITERATŪROS ŠARAŠAS

Moksliniai straipsniai

1. Wang, X. Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis / *Wood Sci Technol* 2013, 47, p. 965 – 975;
2. Zhou, Z., M.C. Zhao, Z. Wang, B. J. Wang, X. Guan. Acoustic Testing and Sorting of Chinese Poplar Logs for Structural LVL Products / *BioResources* 2013, p. 4101-4116;
3. Goncalves, R., C. B. Pedroso, M. V. Massak. Acoustic and bending properties in *Pinus elliottii* beams obtained from trees of different ages / *J Wood Sci* 2013, 59, p.127–132;
4. Guntekin, E., Z. G. Emiroglu, T. Yilmaz. Prediction of Bending Properties for Turkish Red Pine (*Pinus brutia* Ten.) Lumber using Stress Wave Method / *BioResources* 2013, 8(1), p. 231-237;
5. Hassan, K. T. S., P. Horaček, J. Tippner. Evaluation of stiffness and Strength of Scots Pine Wood Using Resonance Frequency and Ultrasonic Techniques / *BioResources* 2013, 8(2), p. 1634 – 1645;
6. Pommier, R., D. Breysse, J. F. Dumail. Non-destructive grading of green Maritime pine using the vibration method / *Eur. J. Wood Prod* 2013, 71, p. 663–673;
7. Rais, A., H. Pretzsch, J. W. G. van de Kuilen. Roundwood pre-grading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards / *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* 2013;
8. Wanga, S. Y, J. H. Chena, M. J. Tsaia, C. J. Linb, T. H. Yanga. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques / *Journal of materials processing technology* 2008, 208, p. 149–158;
9. Cavalli, A., M. Togni. How to improve the on-site MOE assessment of old timber beams combining NDT and visual strength grading / *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2013, Vol. 28, No. 3, p. 252–262;
10. Olsson, A., J. Oscarsson, E. Serrano, B. Kallsner, M. Johansson, B. Enquist. Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation / *Eur. J. Wood Prod* 2013, 71, p. 319–333;
11. Del Menezzi, C., L. Mendes, M. de Souza, G. Bortoletto Jr. Effect of Nondestructive Evaluation of Veneers on the Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) from a Tropical Species / *Forests* 2013, 4, p. 270-278;

12. Olsson, A., J. Oscarsson., M. Johansson, B. Kallsner. Prediction of timber bending strength on basis of bending stiffness and material homogeneity assessed from dynamic excitation / *Wood Sci Technol* 2012, 46, p. 667–683;
13. Dundar, T., S. Kurt, N. As, B. Uysal. Nondestructive Evaluation of Wood Strength Using Thermal Conductivity / *BioResources* 2012, 7(3), p. 3306-3316;
14. Branco, J.M., M. Piazza, P.J.S. Cruz. Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests / *Construction and Building Materials* 2010, 24, p. 371–383;
15. Hein, P.R.G., J.T. Lima, J. Gril, A.M. Rosado, L. Brancheriau. Resonance of scantlings indicates the stiffness even of small specimens of Eucalyptus from plantations / *Wood Sci Technol* 2012, 46, p. 621–635;
16. Niemz, P., D. Mannesb. Non-destructive testing of wood and wood-based materials / *Journal of Cultural Heritage* 2012, p. 26–S34;
17. Kloiber, M., J. Tippner, J. Hrivnak. Mechanical properties of wood examined by semi-destructive devices / *Materials and Structures* 2013;
18. Noguchi, T., E. Obataya, K. Ando. Effects of aging on the vibrational properties of wood / *Journal of Cultural Heritage* 2012, p 21–25;
19. Bacher, M. Comparison of different machine strength grading principles. Conference COST E53, 2008, Delft, The Netherlands;
20. Edlund, J., H. Lindstrom, F. Nilsson, M. Reale. Modulus of elasticity of Norway spruce saw logs vs. structural lumber grade / *Holz als Roh- und Werkstoff* 2006, 64, p. 273–279;
21. Medienotyra; vadovėlis / Č. Jakimavičius. Kaunas, Technologija, 2002;
22. Standartas BS EN 386:2001. Glued laminated timber — Performance requirements and minimum production requirements
23. Rammer, D.R. Shear Strength of Glued-Laminated Timber Beams and Panels. National conference on wood transportation structures, 1996.
24. Wang, V.Z., J.D. Ginger, K. Narayan. Intralaminar and interlaminar fracture characterization in glued-laminated timber members using image analysis / *Engineering Fracture Mechanics* 2012, 82, p. 73–84.
25. Melzerová, L., P. Kuklík. Non-destructive tests of modulus of elasticity for the glued laminated timber beams / *Procedia Engineering* 2012, 48, p. 409 – 412.
26. Drake, G., M. Berry, D. Schroeder. Effect of cold temperatures on the shear behavior of glued laminated beams / *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 112, p. 45–50.

27. McConnell, E., D. McPolin, S. Taylor. Post-tensioning of glulam timber with steel tendon / *Construction and Building Materials*, 2014, 73, p. 426–433.
28. Yang, T.H., S.Y. Wang, C.J. Lin, M.J. Tsai. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques / *Construction and Building Materials*, 2008, 22, p. 487–493.
29. Standartas DIN EN 408: 2003. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties
30. Timber bridge manual. Section five. Stress laminated timber systems. Edition 1, revision 0. 2008.
31. Schubert, S., D. Gsell, R. Steiger, G. Feltrin. Influence of asphalt pavement on damping ratio and resonance frequencies of timber bridges / *Engineering Structures*, 2010, 32 p. 3122–3129.
32. Medienos inžinerija; mokomoji knyga / D. Albrektas, A. Baltrušaitis, I. Juodeikienė, G. Keturakis, D. Minelga, V. Norvydas, V. Pranckevičienė, K. Ukvalbergienė. Kaunas, Technologija, 2011, 264p.
33. Assessment of MoE using Acoustic Speed in Wood Director HM200 – Student projects.

Prieigos per internetą

34. Timber bridges. Roberto Crocetti. Division of Structural Engineering Lund University. Žiūrėta 2015-05-17
http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/1.%20timber%20bridge_an%20overview_Crocetti.pdf
35. Timber Grader MTG. Žiūrėta 2015-05-17
<http://www.brookhuis.com/timber-grader-mtg.html>
36. UAB „Jūrės medis“ gaminamų klijuotos medienos konstrukcijų vizualinės kokybės klasės. Žiūrėta 2015-05-17
<http://juresmedis.lt/lt/produktai/vizualines-kokybes-klases.html>
37. Lipalas D4
<http://www.achema.lt/lipalas-d4>
38. Klijuotos medienos stiprio klasės. Žiūrėta 2015-05-17
http://www.hess-timber.com/en/technische_infos/festigkeitsklassen/
39. Lietuvos Respublikos Aplinkos Ministerija. Nuoroda į Statybos techninius reglamentus. Žiūrėta 2015-05-17
http://www.am.lt/VI/article.php3?article_id=2986

6. PRIEDAI