



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Mantas Šukys
Projekto autorius

lekt. dr. Dainius Vaičiulis
Vadovas

Panevėžys, 2024



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas
Integruotas projektavimo ir statybos valdymas (6211EX076)

Mantas Šukys

Projekto autorius

lekt. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2024



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Mantas Šukys

Kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Mantas Šukys

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU

TVKC vadovė

Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Mantui Šukiui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	Kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	Investigation of Vibration Resistance of Composite Wood-Concrete Slabs

Patvirtinta 2023 m. lapkričio 15 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-28

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2024 m. sausio 2 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Atlikti kompozitinių (medžio ir betono) perdangų atsparumo virpesiams tyrimą. Ištirti ne mažiau kaip 5-ias skirtingų tarpatramių perdangas. Tyrime panaudoti analitinę (pvz. STR) skaičiavimo metodiką ir skaitinius inžinerijos metodus (pvz. BEM). Palyginti skirtingais metodais gautus rezultatus.

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

- Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su kompozitinėmis perdangomis ir jų virpesiais.
- Prieš atliekant atsparumo virpesiams tyrimą patikrinti, ar perdangos tenkina saugos ir tinkamumo ribinius būvius.
- Nustatyti sijų išdėstymo žingsnio ir betoninės plokštės storio bei svorio įtaką perdangų atsparumui virpesiams.

Vadovas

lekt. dr. Dainius Vaičiulis

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau

Mantas Šukys

(studento vardas, pavardė, parašas)

2023 m. lapkričio 24 d.

Šukys, Mantas. Kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. 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: kompozitinė perdanga, virpesiai, įlinkis, įtempiai, BEM.

Panevėžys, 2024. 71 p.

Santrauka

Pasaulinės klimato problemos ir jų sprendimo būdų paieškos statybos sektorių verčia ieškoti alternatyvių aplinką tausojančių sprendimų ir medžiagų projektuojant bei statant daugiaaukščius ir ne tik gyvenamuosius pastatus.

Šio darbo pirmojoje dalyje apžvelgiamos kompozitinių konstrukcijų, kurių viena sudedamųjų dalių – mediena, pasirinkimo galimybės. Analizuojami mokslininkų atliekami tyrimai tokių elementų stiprumo, standumo ir atsparumo virpesiams srityse. Atkreipiamas dėmesys į kompozitinių medžiagų tarpusavio jungčių svarbą.

Antrojoje ir trečiojoje dalyse pateikiama tyrimo metodika ir atliekamas kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimas. Naudojami du skaičiavimo būdai: analitinis, paremtas Lietuvoje galiojančių Europos standartų (Eurokodų) pateiktomis rekomendacijomis, ir skaitinis inžinerinis modeliavimas programiniu paketu „SolidWorks“. Tyrimų rezultatai palyginami tarpusavyje. Taip pat atliekamas trumpas tyrimas siekiant nustatyti sijų išdėstymo žingsnio ir betoninės plokštės storio bei svorio įtaką perdangų atsparumui virpesiams.

Šukys, Mantas. Investigation of Vibration Resistance of Composite Wood-Concrete Slabs. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: composite slab, vibration, deflection, stress, FEM.

Panevėžys, 2024. 71 pages.

Summary

Global climate problems and the search for their solutions force the construction sector to look for alternative, environmentally friendly solutions and materials in the design and construction of high-rise and not only residential buildings.

The first part of this work reviews the options for composite structures, one of the components of which is wood. Research conducted by scientists in the areas of strength, stiffness and vibration resistance of such elements is analyzed. Attention is drawn to the importance of the interconnections of composite materials.

In the second and third parts, the research methodology is presented and the vibration resistance of composite floors made of wood and concrete is investigated. Two calculation methods are used: analytical, based on the recommendations provided by the European standards (Eurocodes) valid in Lithuania, and numerical engineering modeling with the SolidWorks software package. The obtained research results are compared with each other. A short study is also carried out to determine the influence of the spacing of the beams and the thickness and weight of the concrete slab on the vibration resistance of the slabs.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1. Mokslinių publikacijų apžvalga	15
1.1. Medinės konstrukcijos pastatų statyboje	15
1.1.1. Trumpa istorija	15
1.1.2. Medienos gamyba ir panaudojimas	15
1.2. Statybų sektoriaus įtaka aplinkai ir alternatyvūs statybos produktai, gamtos apsauga	16
1.2.1. Aplinkos tarša statybų sektoriuje.....	16
1.2.2. Mediena – tvari statybinė medžiaga	17
1.2.3. Aplinkosauga.....	18
1.3. Medinių konstrukcijų perdangos	19
1.3.1. Perdangos konstrukcijos iš medienos (TTC).....	19
1.3.2. Medžio ir betono kompozitinės perdangos (TCC)	23
1.3.3. Plieno ir medžio kompozitinės perdangos (STC).....	28
1.4. Pastatų perdangų virpesiai	32
2. Metodologinė dalis.....	36
2.1. Apkrovų deriniai.....	36
2.2. Transformuotų pjūvių metodas.....	36
2.3. Lenkimo įtempiai ir lenkiamojo elemento stiprumo sąlygos tikrinimas	37
2.4. Šlyties įtempiai ir stiprumo sąlygos tikrinimas	38
2.5. Gniuždymo įtempiai atraminėje zonoje ir stiprumo sąlygos tikrinimas.....	38
2.6. Įlinkiai ir standumo sąlygos tikrinimas	39
2.7. Perdangų savieji svyravimų dažniai ir atitikimo virpesių apribojimams tikrinimas	40
2.8. Perdangų tyrimas taikant skaitinius inžinerijos metodus	41
3. Tiriamoji dalis.....	42
3.1. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimas taikant analitinę skaičiavimo metodiką	42
3.1.1. Perdangų modeliai	42
3.1.2. Perdangų sudedamųjų dalių fizikinės ir mechaninės savybės.....	44
3.1.3. Perdangas veikiančios apkrovos.....	44
3.1.4. Apkrovų deriniai.....	44
3.1.5. Perdangos skaičiuojamoji schema	45
3.1.6. Perdangos skerspjūvio geometriniai rodikliai	45
3.1.7. Įrašų ir atraminių reakcijų perdangos sijose skaičiavimas	46
3.1.8. Lenkimo įtempiai ir lenkiamojo elemento stiprumo sąlygos tikrinimas	47
3.1.9. Šlyties įtempiai ir stiprumo sąlygos tikrinimas	48
3.1.10. Gniuždymo įtempiai atraminėje zonoje ir stiprumo sąlygos tikrinimas.....	49
3.1.11. Įlinkiai ir standumo sąlygos tikrinimas	50
3.1.12. Perdangų savieji svyravimų dažniai ir atitikimo virpesių apribojimams tikrinimas	51
3.1.13. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimo, taikant analitinę skaičiavimo metodiką, rezultatai	52
3.2. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimas taikant skaitinius inžinerijos metodus... ..	54
3.2.1. BEM perdangų modeliai.....	54

3.2.2. Baigtinių elementų tinklelio parinkimas	57
3.2.3. Apkrovos ir apkrovų deriniai.....	57
3.2.4. Skaičiuojamieji perdangų modeliai	58
3.2.5. Lenkimo įtempių patikrinimas	59
3.2.6. Akimirkinių įlinkių patikrinimas.....	60
3.2.7. Pagrindinis perdangos konstrukcijos svyravimų dažnis nustatytas taikant skaitinius inžinerijos metodus.....	61
3.3. Skirtingų skaičiavimo metodikų rezultatų palyginimas	62
3.4. Sijų išdėstymo žingsnio įtaka perdangų atsparumui virpesiams.	63
3.5. Betoninės plokštės storio bei svorio įtaka perdangų atsparumui virpesiams.	64
Išvados	66
Literatūros sąrašas	67

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pasaulinė miško gėrybių gamyba 2020 m. [2]	15
2 lentelė. Tipinių medinių perdangų sistemų palyginimas (duomenys ir iliustracijos [10]).....	20
3 lentelė. Eksperimento ir Eurokodo 5 rezultatų palyginimas [33]	27
4 lentelė. Medžio ir betono perdangų geometrinės savybės	43
5 lentelė. Medinių (LVL) sijų fizikinės ir mechaninės savybės.....	44
6 lentelė. Gelžbetoninių plokščių fizikinės ir mechaninės savybės	44
7 lentelė. Perdangas veikiančios apkrovos.....	44
8 lentelė. Visų perdangų įrašų ir atraminių reakcijų skaičiavimo rezultatai.....	47
9 lentelė. Visų perdangų lenkimo įtempiai	48
10 lentelė. Visų perdangų šlyties įtempiai	49
11 lentelė. Visų perdangų gniuždymo įtempiai	50
12 lentelė. Visų perdangų įlinkiai	51
13 lentelė. Visų perdangų pagrindiniai savieji svyravimų dažniai	52
14 lentelė. Inžinerinės medienos fizikinės ir mechaninės savybės įvestos į modeliavimo sistemą..	55
15 lentelė. Betono fizikinės ir mechaninės savybės įvestos į modeliavimo sistemą	55
16 lentelė. Įtempiai skerspjūvyje pagal skirtingus baigtinių elementų kiekius.....	57
17 lentelė. Tiriamų perdangų modelių žymenys ir skaičiuojamieji ilgiai.....	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija. Statistiniai duomenys [4]	16
2 pav. Pasatų gyvavimo ciklo vertinimo rezultatai (poveikis aplinkai, kg CO ₂ ekv./m ²) [26]	17
3 pav. Inžinerinės medienos produktai: a) CLT; b) LVL, c) NLT [10]	19
4 pav. Pavienių sijų jungtis su kolona [27]	21
5 pav. Medžio kompozito sijų (perdangų) jungtis su kolona [27]: a) TTC matmenys ir detalės ir b) TTC sijos ir plieninės kolonos mazgas, c) TTC su kolonos įsiskverbimu į CLT plokštę ir įsiskverbimo geometrija, d) be kolonos įsiskverbimo į CLT plokštę.	21
6 pav. Nie ir Valipour'o eksperimento bandinio schema [28]	22
7 pav. Modelio skaičiavimų ir testo rezultatų palyginimas (kartu su EMC grafiku) [29]	23
8 pav. Tipinė medienos ir betono grindų sistema [13]	23
9 pav. Medžio ir betono kompozicinių grindų su dantytomis jungtimis bandinys [15]	24
10 pav. Siūlomas metodas medienos plokštei ir betonui suklijuoti [16]	25
11 pav. Mažo mastelio bandymai [30]	25
12 pav. Tirtų bandinių praslydimo nuo apkrovos grafikas [31]	26
13 pav. Haotian'o ir kt. vertinimo bandiniai [32]	26
14 pav. Taazounto, Amziane ir Molard'o tyrimo bandinys [33]	27
15 pav. Siūloma perdangos konstrukcija [34]	28
16 pav. CLT-CFS kompozitas [17]	28
17 pav. Pagrindiniai Flo-S-1 (a, c) ir Flo-S-2 (b, d) grindų pavyzdžių surinkimo etapai [18]	29
18 pav. Hassanieh ir kt. eksperimento bandinys [35]	30
19 pav. STC sijos bandymo sąranka [36]	30
20 pav. Varžtinė kirpimo jungtis [37]	31
21 pav. A.A. Chiniforush ir kt. tyrime išbandyti varžtai [38]	31
22 pav. Xie ir kt. bandymo objektas [23]	33
23 pav. Chiniforush'o ir kt. bandymo objektas [24]	34
24 pav. Tiriamų TTC sijų skerspjūvis ir konfigūracijos [40]	34
25 pav. Rezultatų palyginimas (TTC ir TTC+MD konfigūracija) [40]	35
26 pav. Transformuojamo skerspjūvio geometriniai rodikliai. Šiame paveiksle pavaizduota 2-o (viršutinio) sluoksnio transformacija į 1-ą (apatinį) sluoksnį	37
27 pav. Rekomenduojamasis a ir b ribinių reikšmių intervalas ir tarpusavio sąryšis [52]	40
28 pav. Analizuojamos perdangos erdvinis vaizdas	42
29 pav. perdangų konstrukcijų bendrieji išilginiai ir skersiniai pjūviai	43
30 pav. Perdangos skaičiuojamoji schema	45
31 pav. Kompozitinio skerspjūvio geometriniai rodikliai prieš ir po transformacijos	46
32 pav. Saugos ribinio būvio išnaudojimo rodikliai (LILTZ – lenkimo įtempiai labiausiai tempiamoje zonoje; LILGZ – lenkimo įtempiai labiausiai gniuždomoje zonoje)	53
33 pav. Tinkamumo ribinio būvio išnaudojimo rodikliai.	53
34 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (EK)	54
35 pav. LVL sijos modelis ir medžiagos aprašas sistemoje	54
36 pav. Betoninės plokštės modelis ir medžiagos aprašas sistemoje	55
37 pav. Perdangos modelio vaizdas „SolidWorks“ aplinkoje	56
38 pav. Perdangos sijų įtvirtinimai	56
39 pav. Baigtiniais elementais sudalintų perdangos modelių vaizdas	57
40 pav. Skaičiuojamasis perdangos modelis ir apkrovų deriniai	58

41 pav. Lenkimo įtempių verčių pasiskirstymas perdangoje MBK7(BEM) (viršuje – pilnas pasiskirstymas, apačioje – kritinių zonų atvaizdavimas).....	59
42 pav. Lenkimo įtempiai labiausiai tempiamoje skerspjūvio dalyje (EK) ir (BEM) atvejais	59
43 pav. Lenkimo įtempiai labiausiai gniuždomoje skerspjūvio dalyje (EK) ir (BEM) atvejais	60
44 pav. Akimirkinių perdangos konstrukcijos įlinkių erdvinė diagrama perdangai MBK7(BEM)..	60
45 pav. Akimirkinis įlinkis (EK) ir (BEM) atvejais.....	61
46 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (BEM).....	61
47 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (EK) ir (BEM) atvejais	62
48 pav. MBK3(BEM) pagrindinis svyravimų dažnis. 1 svyravimo amplitudė.....	62
49 pav. Pagrindinio konstrukcijos svyravimų dažnio priklausomybė nuo sijų išdėstymo žingsnio 9 metrų tarpatramio ilgio perdangai MBK9(EK)	63
50 pav. MBK9(BEM) 1-asis (viršuje) ir 2-asis (apačioje) svyravimų dažniai, kai sijų žingsnis 250 mm.....	63
51 pav. Pagrindinio perdangos konstrukcijos svyravimų dažnio priklausomybė nuo betoninės plokštės storio 9 metrų ilgio perdangos konstrukcijai	64
52 pav. MBK9(BEM) Svyravimų dažnis, kai plokštės storis 300 mm.....	64

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

TTC – medienos ir medienos kompozitas (angl. *timber-timber composite*);

TCC – medienos ir betono kompozitas (angl. *timber-concrete composite*);

STC – plieno ir medienos kompozitas (angl. *steel-timber composite*);

LVL – laminuoto lukšto mediena (angl. *laminated veneer lumber*);

GLT – klijuota sluoksninė mediena (angl. *glued laminated timber*);

CLT – kryžmiškai laminuota mediena (angl. *cross-laminated timber*);

NLT – vinimis laminuota mediena (angl. *nail laminated timber*);

OSB – orientuotų skiedrų plokštė (angl. *oriented strand board*);

BEM – baigtinių elementų metodas (angl. *finite element method*).

Įvadas

Medinės konstrukcijos pastatų statyboje naudojamos jau seniai. Tai daugiausiai mažaaukščiai gyvenamieji pastatai, kurių populiarumas didelis. Tačiau pasaulinės klimato problemos ir jų sprendimo būdų paieškos statybos sektorių verčia ieškoti alternatyvių aplinką tausojančių sprendimų ir medžiagų projektuojant bei statant daugiaaukščius ir ne tik gyvenamuosius pastatus. Statybų sektorius daro didelę įtaką pasaulinės taršos statistikai. Jis sudaro trečdalį pasaulinių šiltnamio efektą sukeliančių dujų ir iki 40 proc. visos energijos suvartojimo. Statybos sektoriuje suvartojama 40–50 proc. viso pasaulio natūralių žaliavų ir 12 proc. esamų vandens išteklių. Atsiradus inžinerinės medienos gaminiams, tokiems kaip klijuotos medienos sijos ir kolonos, CLT (kryžmiškai sluoksniuota mediena) plokštės, fanera, OSB (orientuotų skiedrų plokštės) atsirado galimybė plačiau panaudoti medines konstrukcijas didesnio aukštingumo pastatuose ir didesnio tarpatramio konstrukcijose. Siekiama integruoti medines konstrukcijas, kaip tvarią statybinę medžiagą, į naujai projektuojamus ir statomus pastatus. Mokslininkai didelį dėmesį skiria kompozitinių konstrukcijų, pagamintų iš medžio ir kitų statybinių medžiagų (pvz., medžio ir plieno, medžio ir gelžbetonio), tyrimams. Sujungiant skirtingas medžiagas į bendrą skerspjūvį pasiekiamas optimalus šių medžiagų mechaninių savybių išnaudojimas. Siekiant pagrįsti medinių konstrukcijų naudojimo poreikį, šiame darbe trumpai apžvelgiamos statybos sektoriaus taršos problemos ir galimybės jas spręsti prisidedant prie bendros klimato kaitos kontrolės. Nagrinėjamas, ypač perdangoms svarbus, atsparumas virpesiams, nes lengvinant konstrukcijas būtina užtikrinti ne tik jų stiprumą ir (arba) standumą, bet ir tinkamą savąjį virpėjimo dažnį, kad eksploatuojant pastatą jis atitiktų žmogaus patogumo ribas.

Tyrimo objektas – kompozitinės perdangos iš medžio ir betono .

Darbo tikslas – atlikti kompozitinių perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimą.

Darbo uždaviniai:

1. išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su kompozitinėmis perdangomis ir jų virpesiais;
2. ištirti ne mažiau kaip 5-ias skirtingų tarpatramių perdangas; tyrime panaudoti analitinę skaičiavimo metodiką ir skaitinius inžinerijos metodus; palyginti skirtingais metodais gautus rezultatus;
3. prieš atliekant atsparumo virpesiams tyrimą patikrinti, ar perdangos tenkina saugos ir tinkamumo ribinius būvius;
4. nustatyti sijų išdėstymo žingsnio ir betoninės plokštės storio bei svorio įtaką perdangų atsparumui virpesiams.

Baigiamojo projekto sandara ir apimtis. Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, lentelių, paveikslų ir santrumpų sąrašas, įvadas, 3 skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Aiškinamojo rašto apimtis 71 p., kuriuose yra 52 paveikslai ir 17 lentelių.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

Šukys, Mantas. Perdangų kompozitinių sijų ribinių būvių tyrimas taikant transformuotą pjūvių metodą. Technologijų ir verslo aktualijos - 2023: studentų mokslinės konferencijos pranešimų medžiaga. Panevėžys, 2023 m. lapkričio 24 d.

Autoriaus konferencijose skaitytų pranešimų sąrašas:

Šukys, Mantas. Perdangų kompozitinių sijų ribinių būvių tyrimas taikant transformuotų pjūvių metodą. Studentų mokslinė konferencija „Technologijų ir verslo aktualijos - 2023“. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas, 2023 m. lapkričio 24 d.

1. Mokslinių publikacijų apžvalga

1.1. Medinės konstrukcijos pastatų statyboje

Medinės konstrukcijos gyvenamųjų namų statybai naudojamos seniai. Tai tvirta ir ilgaamžė statybinė medžiaga. Medis naudojamas kaip laikančioji pastato konstrukcija, apdailinė, dekoratyvinė detalė arba abi vienu metu, kai medinės laikančiosios pastato konstrukcijos paliekamos atviros.

1.1.1. Trumpa istorija

Mediena kaip pagrindinė konstrukcinė medžiaga naudota seniau nei prieš 10 000 metų. Jos panaudojimą statybose galima atsekti iki 100 m. pr. Kr. Stogo konstrukcijose medieną naudojo Senovės Romos ir Egipto civilizacijos, o anglosaksų klestėjimo laikotarpiu įrenginėta medžio apkala. Mediena buvo svarbiausias gamtos išteklius iki civilizacijos. Šiuolaikinis medinis karkasas buvo sukurtas 9–10 amžiuje ir šiandien vertinamas kaip „išskirtinis statybos įgūdis“. Medinio karkaso technologijos išsivystė visoje Azijoje, Afrikoje ir tada dar neatrastuose Amerikos žemynuose [1].

1.1.2. Medienos gamyba ir panaudojimas

Medienos panaudojimas labai platus – tai gali būti medžiaga popieriui gaminti, kurui, pastatų ir statinių statybai. Statybos sektoriuje ypač gausus medienos gaminių asortimentas: nuo apvalios neapdorotos medienos, naudojamos poliams ar kolonom, iki pjautinės medienos konstrukcijoms ar apdailai ir naujausių inžinerinių medienos gaminių, tokių kaip: klijuotos medienos sijos ir kolonos, kryžmiškai sluoksniuota mediena CLT), fanera, orientuotų skiedrų plokštės (OSB) ir kt.

Pasaulinė medienos panaudojimo gamyboje statistika pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Pasaulinė miško gėrybių gamyba 2020 m. [2]

Produktas	Vienetas	Gamyba			
		2020	Pokytis (%), palyginti su:		
			2019	2000	1980
Apvalioji mediena	mln. m³	3 912	-1	12	25
Medienos kuras	mln. m ³	1 928	-1	7	15
Pramoninė apvalioji mediena	mln. m ³	1 984	-2	17	37
Medienos granulės ir kiti aglomeratai	mln. tonų	50	3		
Pjautinė mediena	mln. m³	473	-3	23	12
Medienos pagrindu pagamintos plokštės	mln. m³	367	-1	107	280
Fanera	mln. m ³	118	2	103	200
Medienos drožlių plokštės, OSB ir medienos plaušų plokštės	mln. m ³	250	-2	109	335
Medienos masė	mln. tonų	186	-2	9	48
Plaušiena iš kitų pluoštų nei mediena	mln. tonų	11	-1	-26	55
Atgautas popierius	mln. tonų	229	-1	59	352
Popierius ir kartonas	mln. tonų	401	-1	24	137

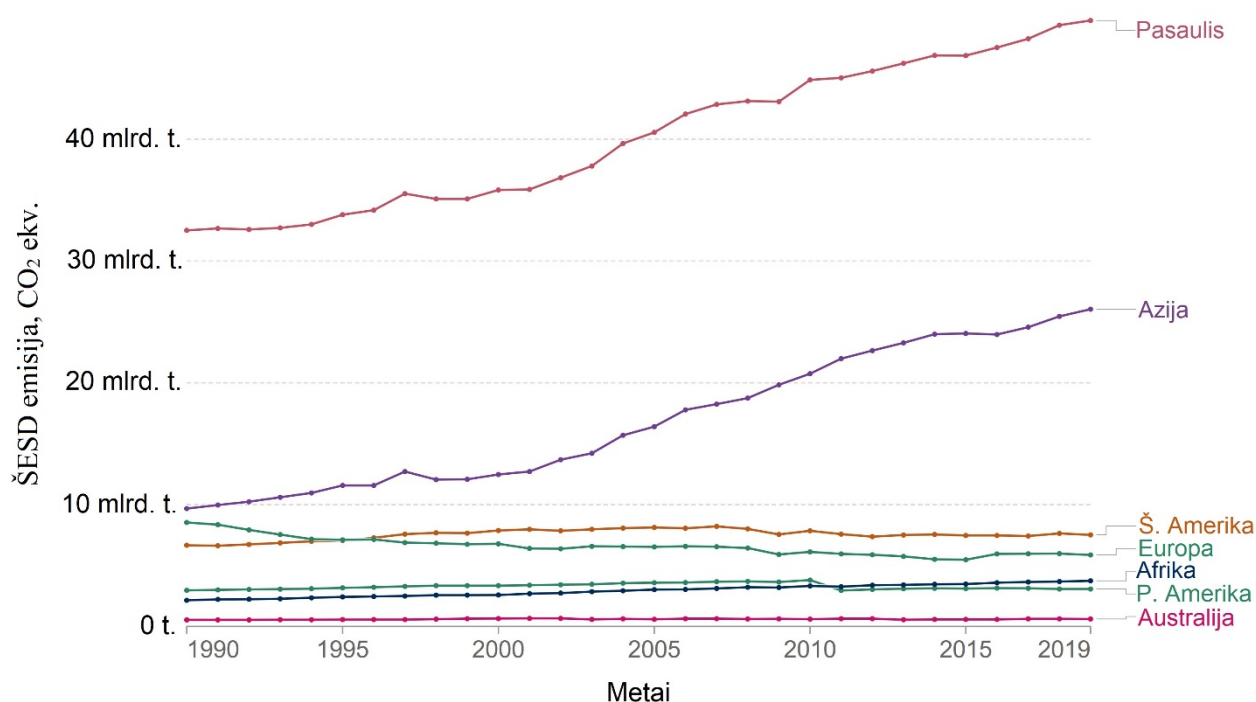
Remiantis Jungtinių Tautų maisto ir žemės ūkio organizacijos 2020 m. duomenimis, medienos panaudojimas pramonėje užima apie 50 proc. visos nukertamos medienos pasaulyje. Nuo 2000-ųjų metų pastebimas ryškus, 107 proc., augimas medienos pagrindu pagamintų plokščių sektoriuje.

1.2. Statybų sektoriaus įtaka aplinkai ir alternatyvūs statybos produktai, gamtos apsauga

Siekiant pagrįsti medinių konstrukcijų naudojimo poreikį trumpai apžvelgiamos statybos sektoriaus taršos problemos ir galimybės jas spręsti prisidedant prie bendros klimato kaitos kontrolės.

1.2.1. Aplinkos tarša statybų sektoriuje

Statistiniai duomenys apie šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) išmetimą pasaulyje pateikti 1 pav. Pavaizduotame grafike matoma bendra pasaulio žemynų statistika.



1 pav. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija. Statistiniai duomenys [4]

Bendra pasaulio ŠESD emisija 2019 m. duomenimis buvo 49,76 mlrd. t. CO₂ ekv.

Statybų sektorius prisideda prie trečdaliao pasaulinio ŠESD išskyrimo ir iki 40 proc. visos energijos suvartojimo. Sektorius taip pat išnaudoja 40–50 proc. viso pasaulio natūralių žaliavų ir 12 proc. vandens išteklių [3].

Didelę įtaką ŠESD emisijai turi statybinių konstrukcijų medžiagų pasirinkimas. Daugiaaukščių pastatų statybai daugiausiai naudojamos plieninės ir gelžbetoninės konstrukcijos, kurios gamybos proceso metu ir eksploatuojant į aplinką išskiria didelius kiekius ŠESD: cemento pramonė – trečia pagal dydį pramoninės energijos vartotoja, į aplinką išmetanti 7 proc. visų pasaulio šiltnamio efektą sukeliančių dujų. 77 proc. betono išmetamų teršalų susidaro vien gaminant cementą [5]. Remiantis Azadi [41] straipsnyje pateiktu įvertinimu, 2018 m. bendras pasaulinis išmetamas ŠESD kiekis, susidaręs pirminės mineralų ir metalų gamybos metu, buvo 3,6 mlrd. t. CO₂ ekv., o tai daugiau nei 10 proc. visų su energija susijusių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų tais pačiais metais [6].

Siekiant sumažinti taršą, stengiamasi statyboje naudojamas medžiagas perdirbti ar pakartotinai panaudoti. Taip pat vis dažniau atsigrežiama į medines konstrukcijas, kurios galėtų pastatuose pakeisti dalį plieninių ar gelžbetoninių konstrukcijų arba būti pagrindine statybine medžiaga.

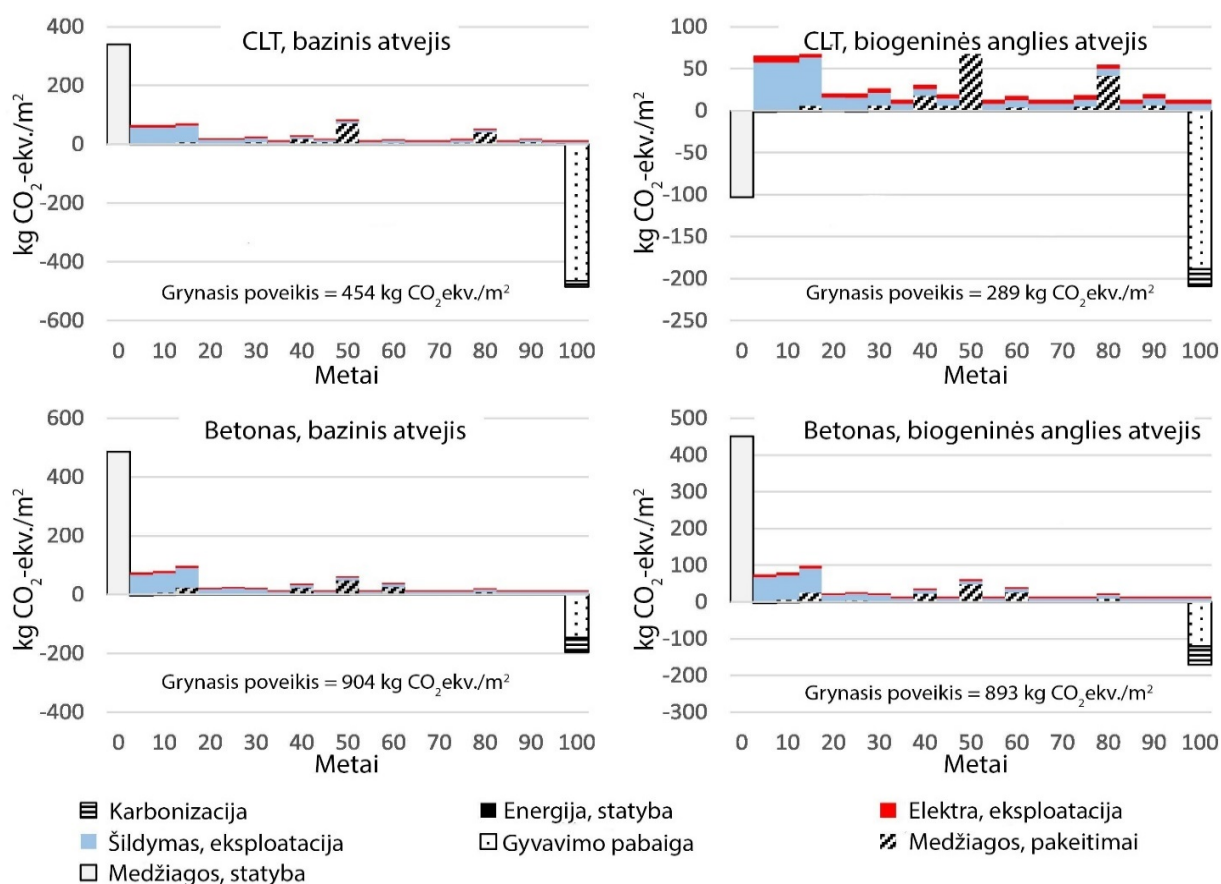
1.2.2. Mediena – tvari statybinė medžiaga

Galimas medinių pastatų atgimimas ir jų teigiamų fizinių bei mechaninių savybių įvertinimas gali būti paaiškinamas unikaliomis medienos gaminių aplinkosauginėmis savybėmis ir jų universalumu. Padidėjus visuomenės supratimui apie tvarumą statybų sektoriuje mediena tarp tvarių produktų tampa prioritetine statybine medžiaga [3].

Danijos mokslininkai atliko dviejų, Norvegijoje esančių, vidutinio aukščio daugiabučių namų gyvavimo ciklo vertinimą [26]. Vienas iš pastatų pastatytas naudojant betono ir plieno sistemą, kito pastato konstrukcinei sistemai buvo naudoti kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) elementai. Tyrime buvo vertinamas ir biogeninės anglies poveikis aplinkai, susijęs su visuotiniu atšilimu.

Pastatai palyginimui buvo pasirinkti dėl panašaus aukšto plano ir butų konfigūracijos, kurių kambarių skaičius nuo 1 iki 4. Betono-plieno konstrukcijų pastatas 5 aukštų, jo šildomas plotas 2 449 m². Kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) pastatą sudaro 8 aukštai ir jo šildomas plotas 3 973 m². Abu pastatai turi bendrą nešildomą gelžbetoninių konstrukcijų rūsį, kurio bendras plotas 1 395 m², ir atitinkamai padalintas 700 m² ir 695 m² betoninio ir kryžmiškai sluoksniuotos medienos konstrukcijų pastatams.

Susisteminti tyrimų rezultatai pateikti 2 pav. diagramose.



2 pav. Pasatų gyvavimo ciklo vertinimo rezultatai (poveikis aplinkai, kg CO₂ ekv./m²) [26]

Šio tyrimo [26] rezultatai rodo, kad kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) konstrukcijų pastato poveikis aplinkai mažesnis – 11-oje iš 18 poveikio kategorijų. Bendras grynasis gelžbetoninių konstrukcijų pastato poveikis 904 kg CO₂ ekv./m², palyginti su 454 kg CO₂ ekv./m² CLT konstrukcijų pastato baziniu atveju. Atitinkamai biogeninės anglies atveju: 893 kg CO₂ ekv./m² gelžbetoninių ir 289 kg CO₂ ekv./m² CLT konstrukcijų pastato bendras grynasis poveikis.

Nė vienas iš pastatų nėra geriausias visose poveikio kategorijose, tačiau tai, kad CLT elementų pastatas buvo geriausias daugumoje kategorijų, rodo, kad tokių konstrukcijų naudojimas pastatų statybai gali padėti sušvelninti klimato kaitą.

Leszczyszyn ir kt. [7] straipsnyje teigiama, kad medienos paklausa pastaraisiais metais išaugo dėl naujų techninių galimybių ir aplinkosaugos srityje kylančių problemų. Ir nors mažas ekonominis konkurencingumas dažnai įvardijamas kaip didžiausias daugiaaukščių namų iš medžio statybos trūkumas, naujausi tyrimai rodo, kad šį iššūkį galima įveikti pasitelkus technologinę pažangą ir inovatyvias statybos praktikas.

Himes'as ir Busby [20] remdamiesi 18-os pastatų palyginimu keturiuose žemynuose (tyrimą apribodami palyginimu pastato statybos stadijoje) nustatė, kad pakeitus įprastas statybines medžiagas masyviaja mediena, statybos etapo emisija gali būti sumažinta 69 proc., o tai vidutiniškai 216 kg CO₂ ekv./m² grindų ploto. Tyrimai parodė, kad statant iš masyviosios medienos, palyginti su įprastomis statybinėmis medžiagomis, sumažėja išmetamų teršalų kiekis. Mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančių statybų mastas, darant prielaidą, kad pusė numatomos naujos miesto statybos medžiagų bus pakeista masyviaja mediena, galėtų įtakoti pasaulinio išmetamųjų teršalų kiekio sumažinimą net 9 proc., kurio reikia norint iki 2030 m. pasiekti tikslą, kad pasaulinis atšilimas būtų mažesnis nei 1,5 °C.

1.2.3. Aplinkosauga

Siekiant vis daugiau pastatų statyti iš medinių konstrukcijų, svarbu užtikrinti miškų apsaugą ir atsinaujinimą.

Darnaus miškų valdymo (tvarios miškotvarkos) tikslas – užtikrinti iš miškų gaunamų prekių ir paslaugų tiekimą; patenkinti tiek dabartinius, tiek ateities poreikius ir prisidėti prie darnaus bendruomenių vystymosi [8]. 2007 m. Jungtinių Tautų Generalinė Asamblėja pripažino tvarią miškotvarką kaip dinamišką ir besivystančią koncepciją, kuria siekiama išlaikyti ir didinti visų tipų miškų ekonomines, socialines ir aplinkosaugines vertybes dabartinių ir būsimų kartų labui, atsižvelgiant į šiuos septynis teminius elementus kaip orientacinę sistemą:

1. miško išteklių apimtis;
2. miškų biologinė įvairovė;
3. miško sveikata ir gyvybingumas;
4. gamybinės miško išteklių funkcijos;
5. miško išteklių apsaugos funkcijos;
6. socialines ir ekonomines miškų funkcijas;
7. teisinė, politinė ir institucinė sistema.

Tvarus miškų valdymas, kaip apibrėžė *Forest Europe* (ministrų konferencija dėl miškų apsaugos Europoje) ir patvirtino Jungtinių Tautų maisto ir žemės ūkio organizacija – „miškų ir miško žemių

valdymas ir naudojimas tokiu būdu ir tokiu greičiu, kad būtų išlaikyta jų biologinė įvairovė, produktyvumas, atsinaujinimo pajėgumas, gyvybingumas ir jų potencialas dabar ir ateityje atlikti atitinkamas ekologines, ekonomines ir socialines funkcijas, vietiniu, nacionaliniu ir pasauliniu lygiu, ir taip kad šis valdymas nedarytų žalos kitoms ekosistemoms“ [25].

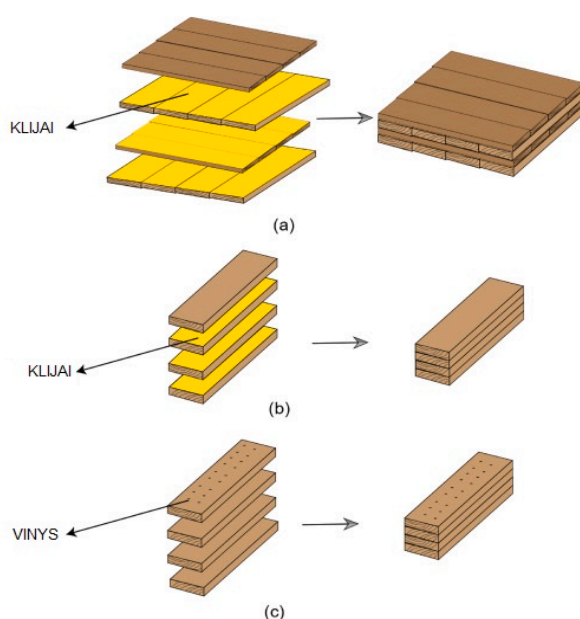
Shono ir Jonsson'as savo straipsnyje [9] analizavo pažangą siekiant tvaraus miškų valdymo. Jų analizė atskleidė teigiamą tvaraus miškų valdymo rodiklių plėtros tendenciją visame pasaulyje. Tačiau ši pažanga buvo netolygi, miškų valdymas blogėja atogrąžų šalyse gaunančiose mažas pajamas.

1.3. Medinių konstrukcijų perdangos

Medinės kompozitinės konstrukcijos pateikiamos kaip tvari alternatyva įprastoms plieno ir armuoto betono konstrukcijoms. Medienos ir inžinerinių medienos gaminių naudojimas taip pat pritaikytas pastatų statybai iš surenkamųjų elementų, kurie žymiai padidina statybos greitį ir sumažina triukšmą ir taršą statybos vietoje. Pastaruosius kelis dešimtmečius buvo bandoma skatinti medienos naudojimą konstrukcinėse sistemose kuriant, išbandant ir modeliuojant medienos ir betono kompozito (TCC), plieno ir medienos kompozito (STC) ir medienos ir medienos kompozito (TTC) jungtis ir grindis, kurios gerai išnaudoja skirtingų inžinerinių medienos gaminių (pvz., LVL, GLT ir CLT) pranašumus kartu su kitomis statybinėmis medžiagomis [14].

1.3.1. Perdangos konstrukcijos iš medienos (TTC)

Medinių grindų sistemos buvo įprastos prieš atsirandant tvirtesnėms medžiagoms, tokioms kaip plienas ir betonas. Iš pradžių medienos naudojimas konstrukcijose apsiribodavo gyvenamųjų namų srityje, tačiau atsiradus inžineriniams medienos gaminiams, pvz., laminuota fanera ir mediena (LVL), vinimis laminuota mediena (NLT) ir kryžminė laminuota mediena (CLT) (žr. 3 pav.), pasižymintiems geresnėmis mechaninėmis savybėmis, pradėta pagaminti didesnių skerspjūvių ir didesnio tarpatramio ilgio elementus. Inžinerinės medienos gaminiai paprastai yra tvirtesni už masyvios medienos elementus ir gali būti pagaminti taip, kad atitiktų konkrečius eksploatacinių savybių reikalavimus [10].



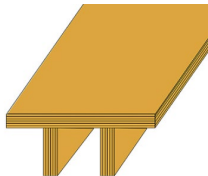
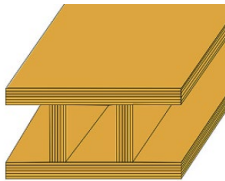
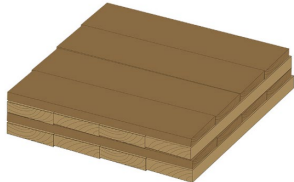
3 pav. Inžinerinės medienos produktai: a) CLT; b) LVL, c) NLT [10]

Medinės perdangos gali būti suskirstytos į grupes pagal konstrukcijos tipą:

- sijinė perdanga;
- sijų ir įtemptų lakštų kompozitinė perdanga (angl. *stressed skin panel*);
- inžinerinės medienos plokščių perdanga.

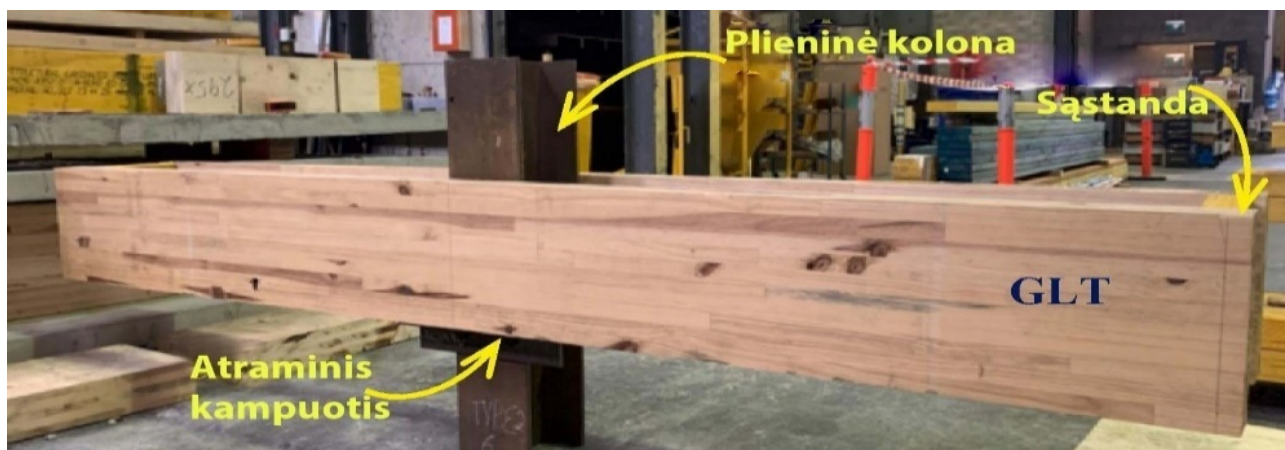
Bazli, Heitzmann‘as ir Ashrafi savo darbe [10] pateikia šių tipinių perdangų palyginimą, išskirdami jų privalumus ir trūkumus (žr. 2 lentelėje).

2 lentelė. Tipinių medinių perdangų sistemų palyginimas (duomenys ir iliustracijos [10])

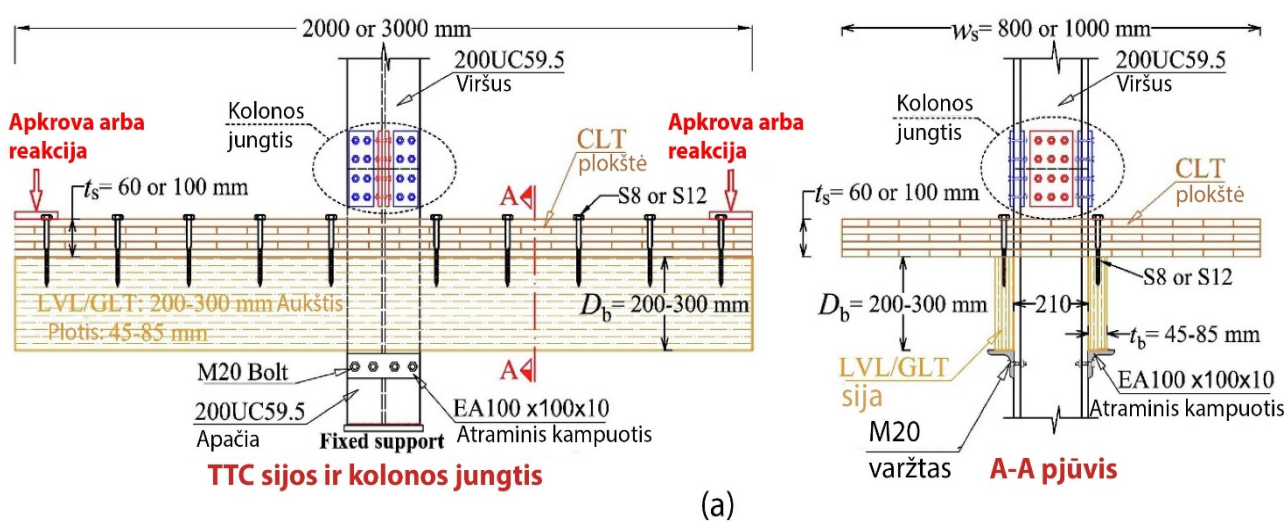
					
Sijinė perdanga		Sijų ir įtemptų lakštų kompozitinė perdanga		Inžinerinės medienos plokščių perdanga	
Privalumai	Trūkumai	Privalumai	Trūkumai	Privalumai	Trūkumai
Lengva konstrukcija	Ribota laikomoji galia	Efektyvi konstrukcija	Didelių tarpatramių grindų konstrukcijose per daug deformuojasi	Greita statyba	Sunaudojama daug medienos (neefektyvu kainos atžvilgiu)
Paprastas įrengimas	Riboti dydžiai ir kokybė	Patikima konstrukcija	Didelių tarpatramių grindų konstrukcijose neatitinka vibracijai keliamų reikalavimų	Geras atsparumas tinkamumo ribiniame būvyje (SLS), jei naudojama pakankamo storio plokštė	Laikomoji galia vidutiniška
Paprastas pritaikymas įvairioms projektinėms situacijoms	Prastas atsparumas tinkamumo ribiniame būvyje (SLS)	Didesnio standumo ir laikomosios galios nei sijinė perdanga			Didelės susitraukimo ir išbrinkimo deformacijos
	Prastos akustinės savybės	Įvairi surenkamoji gamyba			

Pagrindinis šių perdangų sistemų privalumas – jų lengvumas ir paprastas montavimas. Pagrindinis trūkumas – laikomoji galia tinkamumo ribiniame būvyje. Taip pat dėl savo lengvumo šios perdangos dažnai neatitinka savajam virpesių dažniui keliamų reikalavimų.

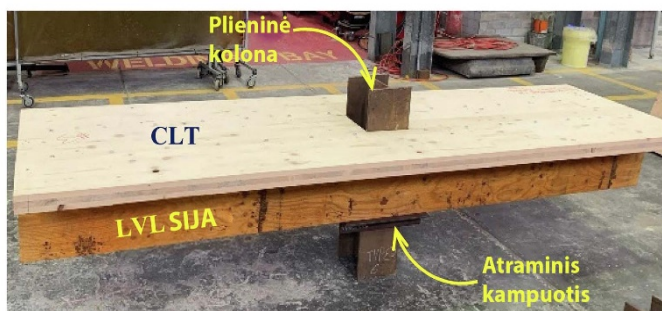
Australijos ir Belgijos mokslininkai atliko medžio kompozito konstrukcijų tyrimą, siekdami iširti medienos ir medienos kompozitų (TTC) sistemų struktūrinį atsparumą, juos veikiant neigiamais lenkimo momentams iki suirimo [27]. Jie sukonstravo ir išbandė 6 pavienių medinių sijų mazgus su kolona (žr. 4 pav.) ir 31 medžio kompozito siją (perdangą) (žr. 5 pav.). Kad nustatytų medžio kompozito sijų (perdangų) laikomąją galią ir standumą veikiant neigiamam lenkimo momentui atramos, mokslininkai analitiniam modeliui pritaikė Timošenko sijų teoriją.



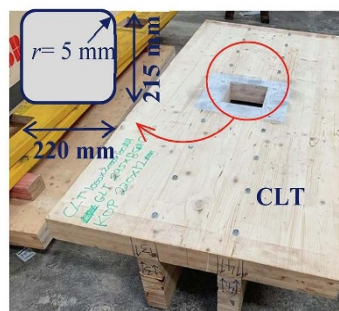
4 pav. Pavienių sijų jungtis su kolona [27]



(a)



(b)



(c)



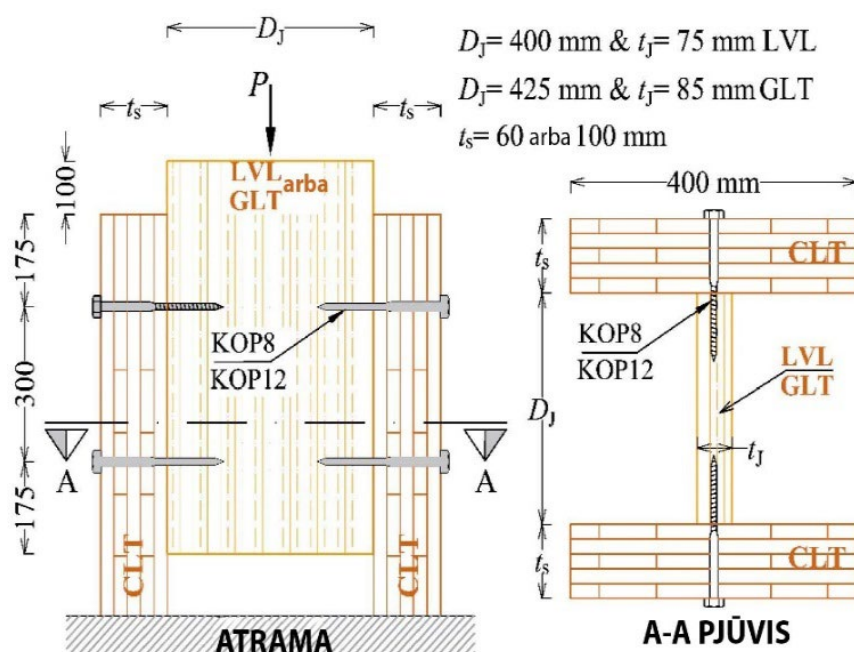
(d)

5 pav. Medžio kompozito sijų (perdangų) jungtis su kolona [27]: a) TTC matmenys ir detalės ir b) TTC sijos ir plieninės kolonos mazgas, c) TTC su kolonos išsiskverbimu į CLT plokštę ir išsiskverbimo geometrija, d) be kolonos išsiskverbimo į CLT plokštę.

Tyrimo išvadose teigiama, kad CLT plokščių orientacija turėjo tam tikros įtakos sijų standumui ir laikomajai galiai. Tirtuose gaminiuose išilgai apkrautose CLT sijose nustatyti iki 20 proc. didesni standumo ir laikomosios galios rodikliai nei apkrautose skersine kryptimi. Vidutinį reikšmingumą (iki 18 proc.) TTC sijų standumui ir laikomajai galiai turėjo varžtinių jungčių dydis. Taip pat šiuo eksperimentu nustatyta, kad kartu su varžtais naudojant epoksidinius klijus žymiai padidėjo TTC sijų standumas ir stiprumas: bandinio laikomoji galia ir standumas naudojant varžtus ir klijus buvo atitinkamai 26 proc. ir 79 proc. didesni, nei bandinio naudojant tik varžtus [27].

Medžio kompozito kaip ir kitų medžiagų kompozitų sistemose kritinis vaidmuo tenka šių medžiagų jungtims tarpusavyje. Tą galima matyti ir Hammad'o tyrimo ataskaitoje [27]. Ne mažiau svarbus ir šių jungčių ilgalaikis gebėjimas išlaikyti mechanines savybes.

Tokių TTC jungčių ilgalaikio atsparumo eksperimentinius ir skaitmeninius tyrimus atliko Nie ir Valipour'as [28]. Jų tyrimo objektas – TTC jungtis, pagamintos sujungiant laminuoto lukšto medienos (LVL) arba klijuotos laminuotos medienos (GLT) sijas su kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) plokštėmis (žr. 6 pav.). Pagrindiniai eksperimento kintamieji: sijų tipas, varžtinių jungčių dydis, sijos su plokšte jungties tipas (varžtai su klijais ar be jų), taip pat CLT plokštės storis ir kryptis apkrovos atžvilgiu. Su šiais bandiniais vidaus patalpose atlikti nuolatinės apkrovos (ilgalaikiai) bandymai nekontroliuojamose aplinkos sąlygose.



6 pav. Nie ir Valipour'o eksperimento bandinio schema [28]

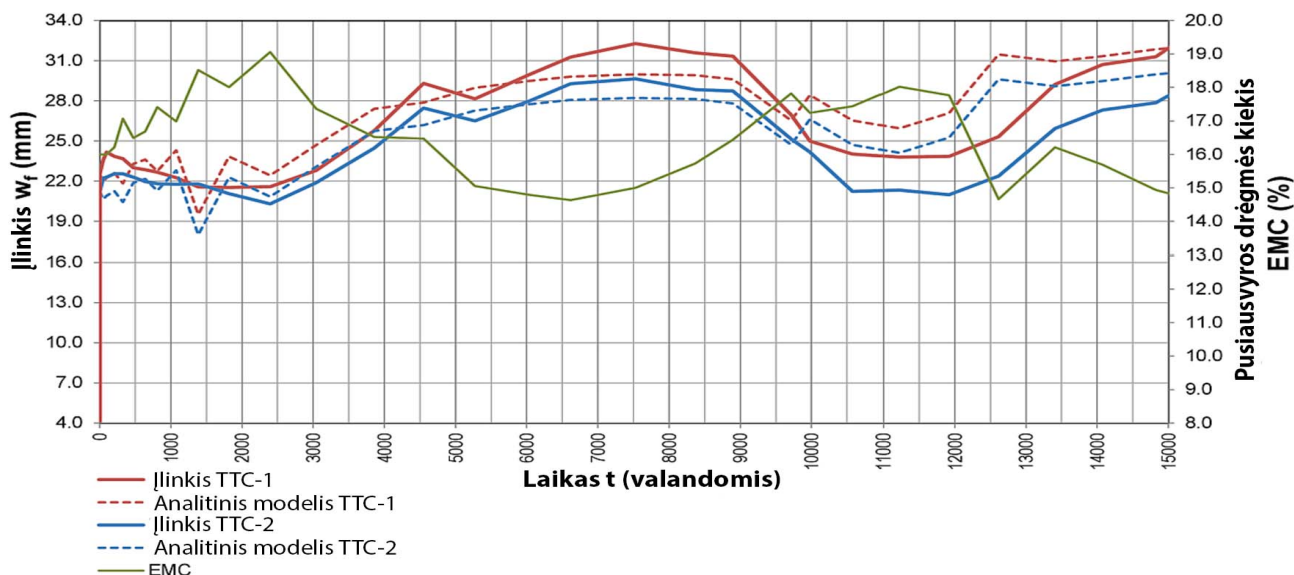
Aukščiau aprašytomis sąlygomis bandiniai buvo testuojami 420 dienų. Tyrimo rezultatai parodė, kad TTC jungtyse santykinis praslydimas per pirmąsias 30 dienų buvo staigus, o po to truputį lėtėjo, kol po 150 dienų pasiekė stabilią būseną. Valkšnumo koeficientai TTC jungtyse veikiant nuolatinėi apkrovai po 420 bandymo dienų pasiskirstė nuo 1,05 iki 3,90 [28].

Dalį šio tyrimo išvadų galima paliginti su Hammad'o eksperimentu [27]. Pastarojo tyrimo rezultatai atskleidė, kad išilgai apkrautos CLT plokštės parodė 20 proc. didesnę standumą ir laikomąją galią, nei skersai apkrautos. Nie ir Valipour'o [28] tyrimo rezultatai rodo 3-4 kartus didesnius ilgalaikius jungties praslydimus esant skersiniam apkrovimui, palyginti su išilgai apkrauta CLT plokšte.

Galima daryti išvadą, kad tiek bendra laikomoji TTC galia ir standumas, tiek jungties stiprumas priklauso nuo jėgos pridėjimo krypties. Projektuojant pastato perdangas iš šių kompozitų, svarbu atsižvelgti į jų išdėstymo orientaciją apkrovos atžvilgiu.

Medienos fizikinių ir mechaninių savybių nepastovumas reikalauja, kad ilgalaikio atsparumo analizėje būtų atsižvelgiama į visus veiksnius, galinčius įtakoti šias savybes. Aplinkos drėgmė ir temperatūra turi kritinę reikšmę lenkiamųjų konstrukcijų atveju [29].

Suarez'as-Riestra ir kt. pateikia analitinio skaičiavimo metodą, kuris įvertina aplinkos įtaką medžio kompozito konstrukcijų savybėms. Skerspjūvio standumas nagrinėjamas nuo pirminės apkrovos sukeltos momentinės deformacijos, atsižvelgiant į medienos savybių pasikeitimus, įtakotus aplinkos sąlygų (įvertinant tūrinį susitraukimą, priklausantį nuo medienos rūšies) [29]. Eksperimentinio ir analitinio tyrimų rezultatų palyginimas pateiktas grafike (žr. 7 pav.).



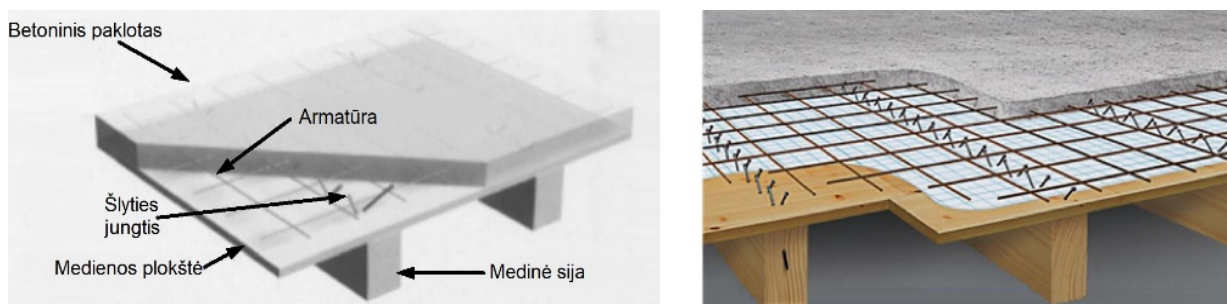
7 pav. Modelio skaičiavimų ir testo rezultatų palyginimas (kartu su EMC grafiku) [29]

Kaip matyti iš ataskaitos grafiko, pasiūlyto analitinio skaičiavimo rezultatai labai artimi (iki 10 proc. skirtumu) praktinio bandymo rezultatams. Skaičiavimo metodas galėtų būti naudojamas modeliuojant TTC sijas (perdangas), įvertinant ilgalaikį atsparumą atsižvelgiant į medžiagų savybių pasikeitimus dėl oro sąlygų.

1.3.2. Medžio ir betono kompozitinės perdangos (TCC)

Kompozitiniai konstrukciniai elementai susilaukia daug dėmesio dėl savo našumo ir patikimumo. Medienos ir betono kompozitas – tai dar vienas gerai žinomas inžinerinis gaminytis [11].

Khai Quang'as Mai ir kt. [12] atliko tokių kompozitinių plokščių tyrimą, kurio tikslas buvo visapusiškai įvertinti šios kompozitinės medžiagos galimybes tiek dinaminėmis, tiek statinėmis apkrovimo sąlygomis. Bandymų rezultatai parodė, kad CLT ir betono kompozito grindų konstrukcijos laikomoji galia pagal stiprumo ribą yra 3-5 kartus didesnė nei įprastų CLT grindų. Taip pat akcentuojamos geresnės šių kompozicinių grindų virpesių savybės. Tipinis tokių grindų pavyzdys pateiktas 8 pav.



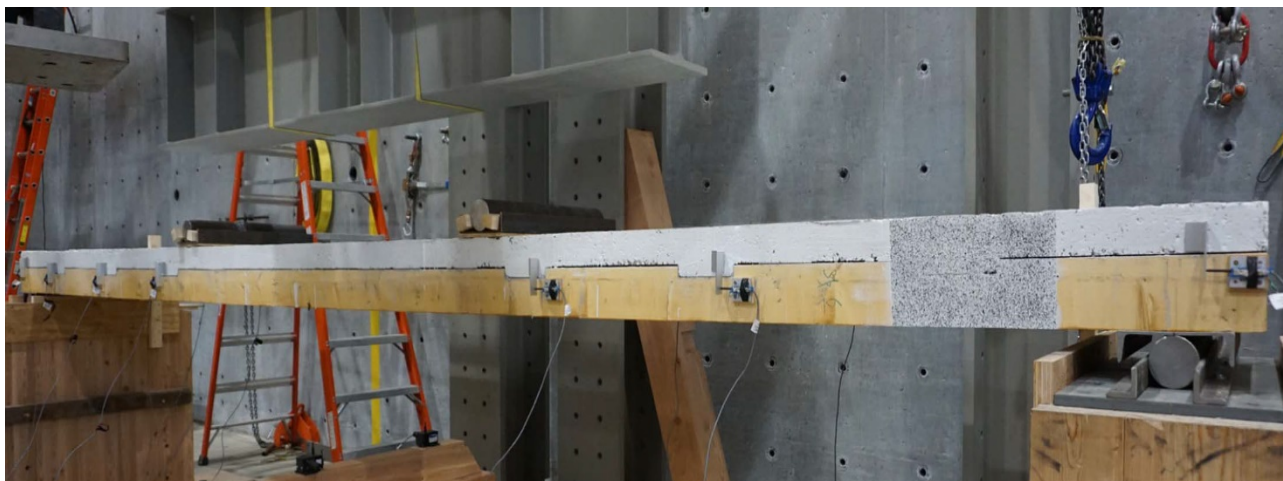
8 pav. Tipinė medienos ir betono grindų sistema [13]

Šiose medžio ir betono kompozito konstrukcijose didelę įtaką turi jungtys tarp šių dviejų medžiagų. Kad dvi medžiagos dirbtų kaip viena, svarbu užtikrinti šių medžiagų sukibimo stiprumą ir standumą. Betono ir medžio sukibimo eksperimentinius tyrimus atliko Zhang'as ir kt. [15]. Jų teigimu, tarp įvairių medienos ir betono sujungimo būdų, dantytos jungtys, padarytos išpjaunant griovelius ant medienos ir užpildant juos betonu, laikomos vienu struktūriškai efektyviausių ir ekonomiškiausių sujungimo sprendimų.

Atliktame eksperimente Zhang'as ir kt. [15] suprojektavo ir išbandė lenkimo momento veikiamus devynis medžio ir betono kompozito grindų bandinius (žr. 9 pav.) su skirtingais tarpatramiais, jungčių skaičiumi, įpjovų gyliais, betono storiu ir skirtinga apkrovos veikimo kryptimi. Buvo ištirtas ir aptartas bandinių lenkiamasis standumas, laikomoji galia, plastiškumas ir suirimo variantai. Bandymų rezultatai parodė, kad jungčių skaičius, įpjovos gylis ir betono storis padidino grindų lenkiamąjį standumą ir stiprumą. Bandiniai su vienodo pločio (180 mm) ir vienodu atstumu (500 mm) išdėstytomis įpjovomis parodė skirtingą laikomąją galią ir lenkiamąjį standumą: su 13 mm įpjova 88,1 kN ir 4,356 kNm², su 25 mm įpjova 115,6 kN ir 5,437 kNm². Bandinių, kurie turėjo vienodas įpjovas ir skyrėsi tik betono sluoksnio storis, rezultatai: esant 60 mm betono sluoksnio storiui laikomoji galia ir lenkiamasis standumas buvo 100,6 kN ir 3,975 kNm², bandinio su 80 mm betono sluoksniu – 115,6 kN ir 5,473 kNm². Grindų tarpatramio didinimas pablogino grindų eksploatacines savybes, o savisriegių kiekio įpjovoje įtaka pasirodė nereikšminga: bandinio su savisriegiais išbandyta laikomoji galia 115,6 kN, bandinio be savisriegių – 112,2 kN. Tyrimas taip pat parodė, kad medžio ir betono kompozicinių grindų stiprumas, standumas ir lankstumas, gali būti pasiekiami optimizuojant dantytų jungčių dizainą: bandinio su mažėjančiais įpjovų gyliais nuo sijos kraštų link centro (25 mm – 20 mm – 15 mm) parodė nežymiai geresnius (apie 1 proc.) laikomosios galios ir lenkiamojo standumo rodiklius.

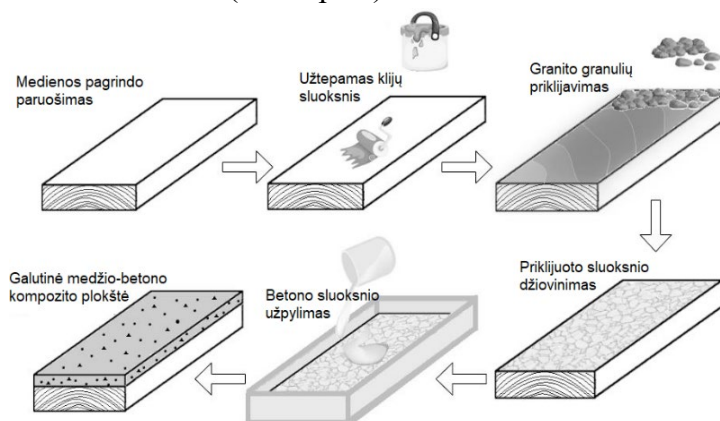
Kitas medienos ir betono sujungimo būdas – šias medžiagas suklijuoti.

Standi medienos ir betono jungtis yra efektyviausias sprendimas medienos ir betono kompozitiniams elementams veikiamiems lenkimo momento, kuris užtikrina bendrą skirtingų medžiagų sąveiką ir didesnę struktūrinę atsparumą. Viena iš dažniausiai naudojamų technologijų suklijuoti medienos ir betono kompozito gaminius – „sausasis“ metodas (medienai ir surenkamojo gelžbetonio plokštei suklijuoti). Taikant šią techniką išlieka didelė rizika, kad medienos ir betono kompozite susidarys prastos kokybės standi jungtis, be to, kyla sunkumų kontroliuojant klijuotos jungties kokybę [16].



9 pav. Medžio ir betono kompozicinių grindų su dantytomis jungtimis bandinys [15]

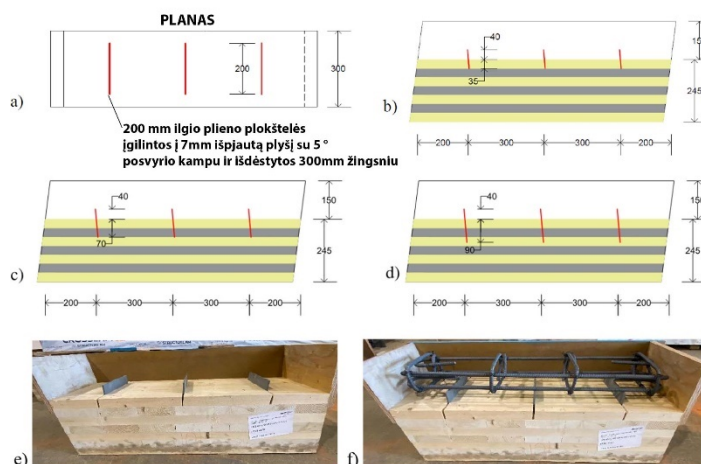
Buka-Vaivade ir Serdjuks'as [16] atliko tokios jungties teorinį ir eksperimentinį tyrimą. Eksperimento bandiniai: „sausuoju“ būdu suklijuotos kryžmiškai laminuota medienos plokštė ir surenkamojo gelžbetonio plokštė, kiti du bandiniai – siūlomas jungimo būdas medienos ir betono kokybinį ryšį užtikrinant granito drožlėmis, kurios klijuojamos ant kryžmiškai laminuotos medienos paviršiaus epoksidine derva, o po to užpilamas šlapias betonas. Susmulkinto granito gabalėlių frakcijos dydis nuo 16 mm iki 25 mm (žr. 10 pav.).



10 pav. Siūlomas metodas medienos plokštei ir betonui suklijuoti [16]

Atlikę eksperimentus Buka-Vaivade ir Serdjuks'as [16] išvadose pateikia vertinimą, kad medienai ir betonui suklijuoti sukurta technologija, paremta granito drožlių naudojimu, užtikrina aukštos kokybės medienos ir betono sluoksnių ryšį.

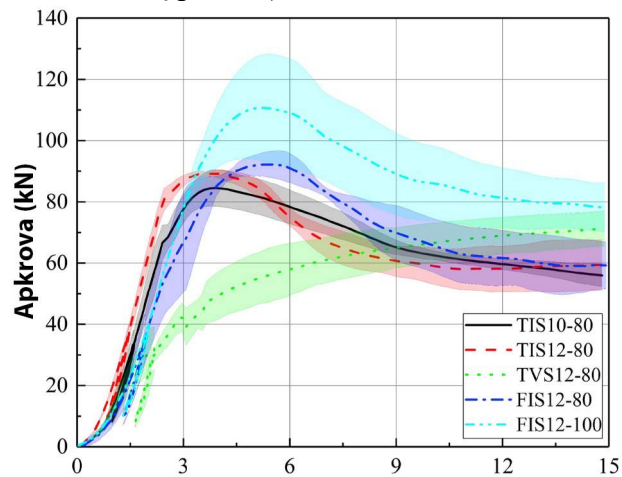
Kito tipo jungtį tarp kryžmiškai sluoksniuotos medienos plokščių ir betono nagrinėjo Kanados mokslininkai Shahnewaz'as, Jackson'as ir Tannert'as [30]. Jų straipsnyje pateikiami eksperimentiniai medžio ir betono kompozicinių (TCC) grindų tyrimai, kai šlyties jungčiai tarp medienos plokštės ir betono panaudotos plieninės plokštelės. Tyrimo objektas – TCC sistema sudaryta iš 245 mm storio, 7 sluoksnių kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) plokštės su 150 mm storio betono danga. Tiriant vertinti trys plieno plokštelių įgilinimo į CLT plokštės gyliai: 35 mm, 70 mm ir 90 mm [30]. Bandinių schemas ir vaizdai pateikti 11 pav.: (a) planas su plieninėmis plokštelėmis; (b) S1-A bandinys su 35 mm plieno įgilinimu į CLT; c) S1-B su 70 mm plieno įgilinimu į CLT; d) S1-C su 90 mm plieno įgilinimu į CLT; CLT plokštės fotofiksacija su: e) plieno plokštelėmis, ir f) plieno plokštelėmis ir armatūra prieš užpilant betono sluoksnį [30].



11 pav. Mažo mastelio bandymai [30]

Tyrimu nustatyta, kad mėginiai, kurių plieninės plokštės buvo įterptos išilgai kryžmiškai sluoksniuotos plokštės sluoksnių nutrūko betono šlyties metu, o įterptų skersai sluoksnių sukėlė tarppluoštinius įtrūkimus dėl šlyties įtempimų plokštumoje, statmenoje išilginei medienos plaušų ašiai. Tyrimo rezultatai taip pat parodė, kad plieninių plokštelių įgilinimas 35 mm užtikrino geriausią jungties veikimą plastiškume ir deformacijose.

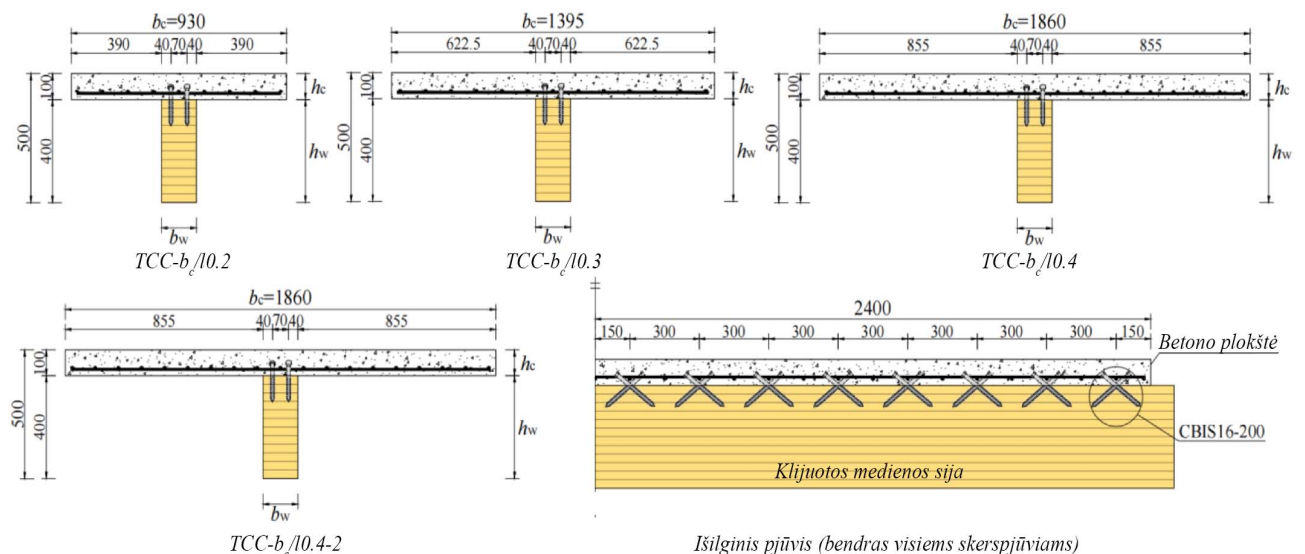
Su kampu įsuktais savisriegiais CLT ir betono kompozitinių grindų jungčiai konstrukcines savybes tyrė Kinijos mokslininkai Yingwei ir kt. [31]. Jie atliko išstūmimo bandymus siekdami įvertinti jungties su šiais savisriegiais atsparumą šlyčiai. Šio tyrimo rezultatų apkrovos ir praslydimo sąryšio grafikas pateiktas 12 pav. (žymuo TIS10-80 – tai trijų sluoksnių CLT plokštė su kampu įsuktais 10 skersmens savisriegiais, įgilintais 80 mm į CLT plokštę; TVS – trijų sluoksnių plokštė su vertikaliai įsuktais savisriegiais; FIS – 5 sluoksnių plokštė).



12 pav. Tirtų bandinių praslydimo nuo apkrovos grafikas [31]

Rezultatai parodė reikšmingą į kryžmiškai sluoksniuotą plokštę pasvirusiu kampu įsukto varžto įgilinimo įtaką jungčių šlyties charakteristikoms.

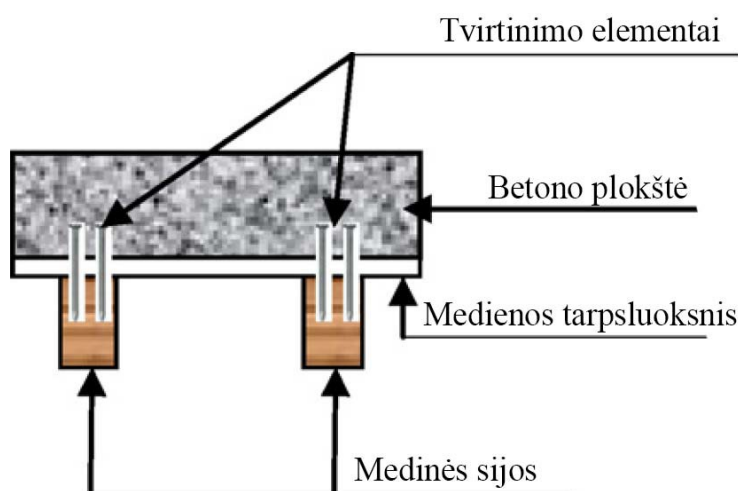
Haotian'as ir kt. straipsnyje [32] vertino medžio ir betono kompozitinių sijų efektyvų plotį tinkamumo ribiniame būvyje, kai medžiagos tarpusavyje sujungtos kampu įsuktais kryžmiškai išdėstytais varžtais (žr. 13 pav.).



13 pav. Haotian'o ir kt. vertinimo bandiniai [32]

Su 13 pav. pavaizduotais bandiniais buvo atlikti lenkimo bandymai. Tyrimų rezultatai parodė, kad medžio ir betono sijų lenkiamasis standumas didėja didėjant sijos pločiui. Sijų bandinių TCC-b_c/10.2, TCC-b_c/10.3, TCC-b_c/10.4 ir TCC-b_c/10.4-2 įlinkai sijų viduryje buvo atitinkamai 9,3 mm, 8,5 mm, 8,3 mm ir 7,1 mm. Tyrimo išvadose taip pat teigiama, kad pagrindiniai veiksniai medžio ir betono sijų efektyviajam pločiui yra apkrovos tipas, sijos pločio ir tarpatramio santykis, betoninės plokštės storis ir jungties standumas, o kiti parametrai, įskaitant tarpus tarp jungčių, medinių sijų aukštį, armatūros santykį ir medžiagų savybes, turėjo nereikšmingą poveikį [32].

Taazount'as, Amziane ir Molard'as straipsnyje pateikia perdangų, sudarytų iš medinių sijų ir lengvojo betono plokščių, atsparumo šlyčiai tyrimo rezultatus. Jungtis tarp abiejų medžiagų užtikrinama sijose įtvirtintomis vinimis. Darbe pateikiamas palyginimas tarp skaitinio projektavimo metodo ir eksperimentinio tyrimo rezultatų [33]. Bandinio schema pateikta 14 pav.



14 pav. Taazounto, Amziane ir Molard'o tyrimo bandinys [33]

Eksperimentiniai šlyties stiprumo bandymai parodė didesnę efektyvumą nei gaunamos projekcinės vertės naudojant Eurokodo 5 skaičiavimų metodiką. Eksperimento rezultatų suvestinė pateikta 3 lentelėje.

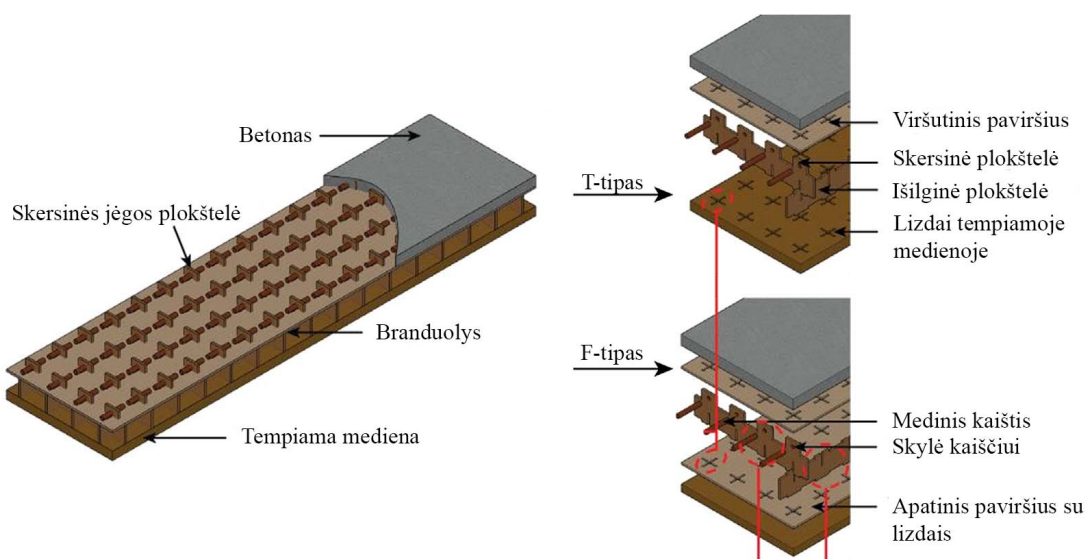
3 lentelė. Eksperimento ir Eurokodo 5 rezultatų palyginimas [33]

Bandymas	Eksperimentas			Eurokodas 5	
	F _{max} , kN	K _u , kN/mm	K _{ser} , kN/mm	K _u , kN/mm	K _{ser} , kN/mm
1	90,5	32,1	48,1	58,34	87,51
2	86,8	36,8	55,2		
3	63,5	27,9	41,80		
Vidurkis	80,3	32,2	48,4		
Santykinis skirtumas				45 proc.	

Šie tyrimų rezultatai parodė, kad Eurokodas 5 maždaug 45 proc. neįvertina tikrojo jungties stiprumo.

Ieškoma ir inovatyvių būdų sujungti medį ir betoną į vientisą perdangos konstrukciją. Viena iš tokių variantų savo straipsnyje pristato Ya, Dilum'as ir Gattas'as [34]. Jų siūlomos konstrukcijos

sprendinys – lengvojo betono ir medžio grindų plokščių sistema su pluoštu sustiprinta polimerine mediena (korio formos šerdis tarp betono ir medienos sluoksnių) (žr. 15 pav.).

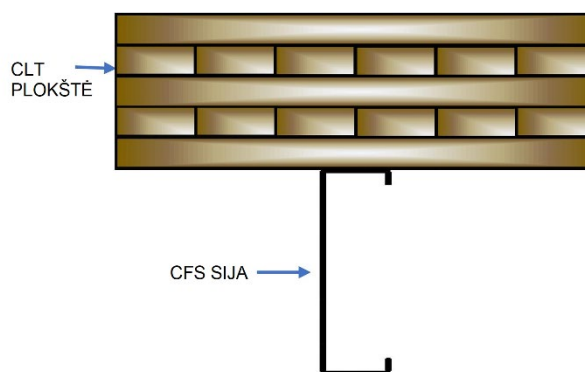


15 pav. Siūloma perdangos konstrukcija [34]

Straipsnio išvadose teigiama, kad tyrimas parodė efektyvų ryšį tarp plokščių sluoksnių nenaudojant plieninių jungčių. Buvo pasiektas didelis medžiagų išnaudojimo efektyvumas [34]: šios konstrukcijos specifinė laikomoji galia pagal svorį $491,4 \cdot 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$. Palyginimui, šis rodiklis gelžbetoninei perdangai $340,7 \cdot 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$, kitoms hibridinėms medžio ir betono kompozitinėms konstrukcijoms naudotoms šiame eksperimente nuo $381,8 \cdot 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$ iki $444,3 \cdot 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$.

1.3.3. Plieno ir medžio kompozitinės perdangos (STC)

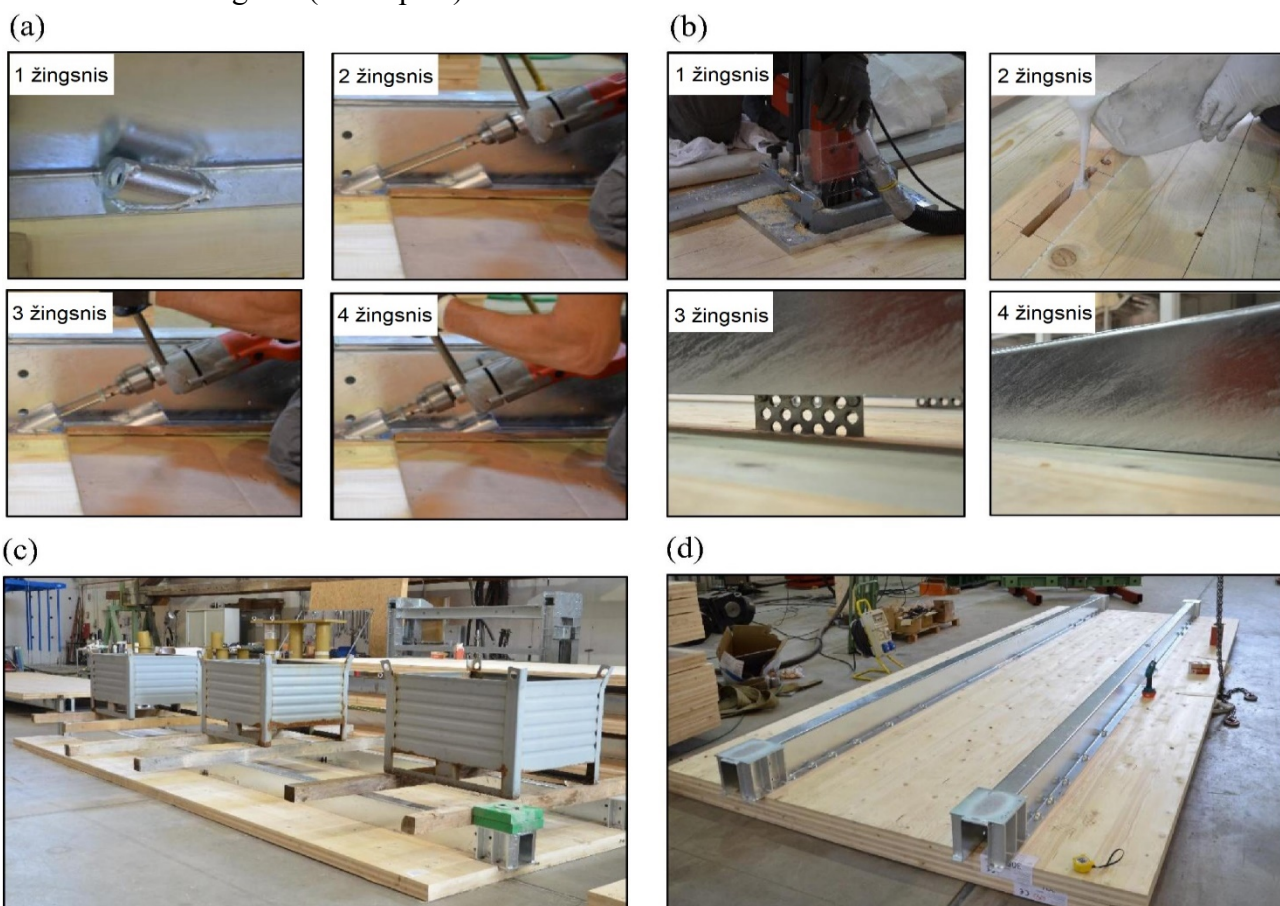
Plieno ir medžio kompozito pavyzdys – šaltai formuoto plieno (CFS) ir kryžmiškai klijuotos medienos (CLT) konstrukciniai komponentai, naudojami mažo (iki 4 aukštų) ir vidutinio (4–8 aukštų arba 25 m) aukščio bei modulinėse pastatų konstrukcijose. Šios dvi medžiagos lengvos ir turi santykinai didesnes stiprumo charakteristikas. Dėl šių pranašumų kompozitiniai CLT ir CFS skerspjuviai kaip konstrukciniai elementai gali būti naudojami modulinuose pastatuose [17]. Skerspjuvio pavyzdys pateiktas 16 pav.



16 pav. CLT-CFS kompozitas [17]

Navaratnam'as ir kt. [17] tyrimo išvadose teigia, kad baigtinių elementų analizės rezultatai parodė apie 20 proc. nagrinėjamos sistemos atsparumo lenkimui padidėjimą, lyginant su atskirai veikiančių CFS sijų ir CLT plokščių atsparumu. Nustatyta, kad siūlomai CLT ir CFS kompozitinei grindų sistemai skirta sija turėjo geresnes konstrukcines savybes.

Inovatyvią medienos ir plieno grindų konstrukciją analizavo Loss'as ir Davison'as [18]. Savo straipsnyje jie pristatė naujoviškas plieno ir medienos kompozitines grindis, skirtas naudoti daugiaaukščiuose gyvenamuosiuose namuose. Tyrimas parodė šių plieno ir medienos kompozitinių sistemų laikomosios galios, standumo ir konstravimo metodo potencialą. Loss'o ir Davison'o teigimu, tokie inžineriniai sprendimai turėtų būti tvarūs, nes juose veiksmingiausiu būdu derinamos perdirbamos medžiagos. Grindys sudarytos iš surenkamų itin lengvų modulinį komponentų su kryžmiškai klijuotos medienos plokštė, sujungtos ir su pagrindine konstrukcine sistema naudojant tik varžtus ir medsraigčius (žr. 17 pav.).

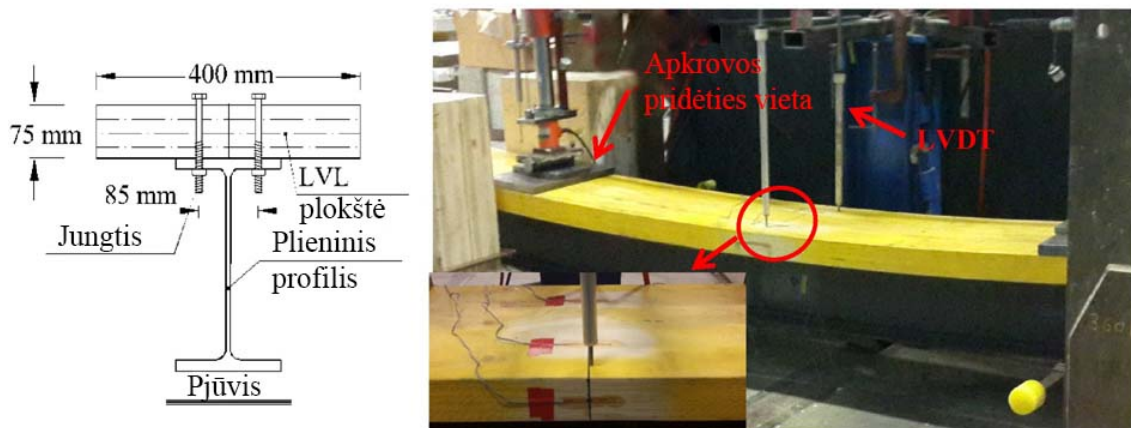


17 pav. Pagrindiniai Flo-S-1 (a, c) ir Flo-S-2 (b, d) grindų pavyzdžių surinkimo etapai [18]

Loss'as ir Frangi [19] taip pat pristatė eksperimentinį tikro dydžio grindų sistemos tyrimą. Pastato elementai sukurti taip, kad juos būtų galima greitai sujungti statybos vietoje, naudojant tik varžtus. Straipsnyje nagrinėjamas eksperimentinis hibridinių grindų reakcijos į horizontalias apkrovas tyrimas. Bandymų rezultatai parodė, kad pagrindinės perdangos deformacijos buvo lokalizuotos plieninėse jungtyse tarp sijų, o hibridiniai plieno ir medienos elementai reagavo elastingai ir be suirimo. Išvados atskleidė, kokią įtaką grindų diafragmos atsparumui turėjo abipusė modulinį sudėtinių elementų sąveika ir ypač jungčių reakcija.

Hassanieh'as, Valipour'as ir Bradford'as ištyrė metalo ir medienos konstrukcijų perdangų atsparumą (įlinkį, trumpalaikį standumą, plieno ir medienos kompozitinių (STC) grindų laikomąją galią ir

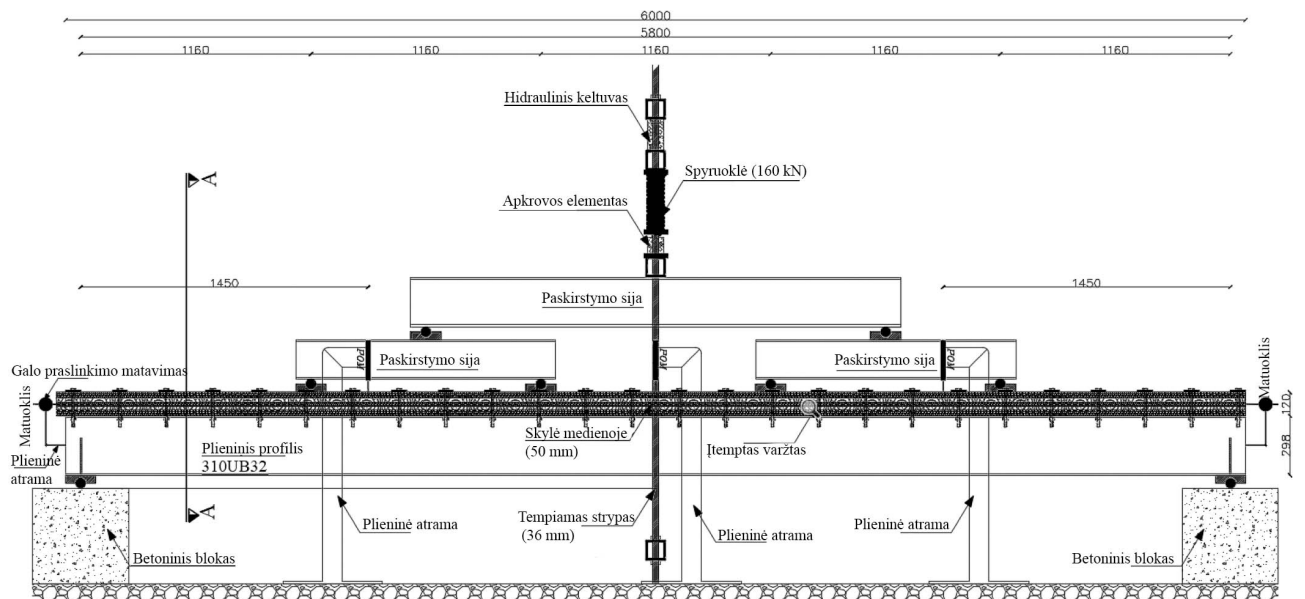
suirimo būvius) atlikę keturių taškų lenkiamąjį bandymą su septyniomis metalo ir medienos sijomis [35] (žr. 18 pav.).



18 pav. Hassanieh ir kt. eksperimento bandinys [35]

Tyrimo išvadose sijų suirimo variantai suklasifikuoti kaip plastiški arba trapūs. Išilgai pluošto apkrautų STC sijų plastiški suirimai siejami su plastinių lankstų susiformavimu ir per didelę mechaninių jungčių deformacija, kurią sekė tempiamieji lūžiai medienos plokščių apatiniuose sluoksniuose. Trapusis suirimo variantas buvo stebimas išilgai pluošto kryptiai apkrautose STC sijose klijuotomis jungtimis ir šis suirimo variantas buvo įtakotas staigaus klijų sluoksnio suirimo arba tempimų medinių plokščių apatinių sluoksnių suirimo. STC sijų apkrautų statmena pluoštui kryptimi suirimo pobūdis buvo gana plastiškas ir susijęs su per dideliu įlinkiu ir sutrumpėjimu plokštėje, kurį įtakojo medienos sutankėjimas [35].

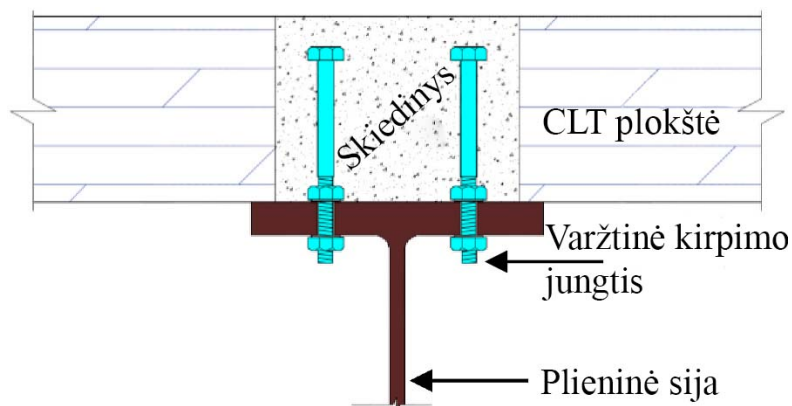
Australijos mokslininkai Chiniforush'as ir kt. tyrė plieno ir medienos kompozitinių grindų konstrukcinį stiprumą, veikiant ilgalaikėms apkrovoms [36]. Buvo atliktas 22 mėnesių trukmės laboratorinis tyrimas, kurio objektas – šešios 5,80 m tarpatramio ilgio kompozitinės metalo ir medžio sijos, sudarytos iš dvitėjinių plieninių profiliuotųjų ir 5 sluoksnių, 120 mm storio, kryžmiškai sluoksniuotos medienos (CLT) plokščių. STC sijos bandymo sąranka pateikta 19 pav.



19 pav. STC sijos bandymo sąranka [36]

Tyrimo rezultatai parodė, kad nepaisant didesnio atstumo tarp šlyties jungčių, plieno ir medžio kompozito sija (bandinio žymuo 4BGPPL40) su varžtinėmis jungtimis skiediniu užpildytose ertmėse pademonstravo didžiausius pradinį ir galutinį (po 22 mėnesių) lenkiamojo standumo parametrus (EI) tarp visų išbandytų plieno ir medžio kompozitinių sijų. Pirminės ir galutinės (po 22 mėnesių) šio bandinio EI vertės buvo $22,95 \text{ MNm}^2$ ir $19,32 \text{ MNm}^2$. Tai parodo didelį standumo lygio pagerėjimą (daugiau nei 53 proc. dėl sudėtinio veikimo) laikui bėgant, palyginti su pavienės plieninės sijos EI , kurio vertė $12,6 \text{ MNm}^2$ [36].

Ataei ir kt. tyrė [37] tokių jungčių kaip Chiniforush'as [36] atsparumą plieno ir medžio kompozito sistemoje veikiant cikliškomis apkrovoms. Jungties schema pateikta 20 pav.



20 pav. Varžtinė kirpimo jungtis [37]

Šio tyrimo rezultatai rodo, kad tirtų bandinių plastiškumo koeficientas buvo nuo 6,14 iki 11,25, o tai daug didesnis nei rekomenduojamas projektavimo normose (t. y. 6,0). Atstumas tarp varžtinių šlyties jungčių su skiediniu medienos plokštėje turi didelę įtaką plastiškumo koeficientui, kai kompozitinė jungtis veikiama tempimo. Atstumas mažesnis nei 150 mm sumažino plastiškumo koeficientą [37].

Varžtų tokiose jungtyse ilgalaikio atsparumo tyrimą atliko Chiniforush'as ir kt. [38]. Tyrimo objektas – varžtais sujungta karšto formavimo plieninė sija su kryžmiškai sluoksniuota (CLT) plokšte. Bandyti varžtai pavaizduoti 21 pav.



21 pav. A.A. Chiniforush ir kt. tyrime išbandyti varžtai [38]

Tyrimo rezultatai parodė, šlyties jungtis su skiedinyje panardintais varžtais (BGP), turėjo didžiausią našumą su mažiausiu valkšnumo koeficientu (mažiau nei 0,8) 50 metų laikotarpiu. STC jungtys su varžtu (CS/DS) ir įtemptu varžtu (PB) šlyties jungčių valkšnumo koeficientai buvo nuo 1,0 iki 8,8. CS, DS ir PB šlyties jungčių nuolatiniai slydimo moduliai buvo nuo 8,4 iki 13 kN/mm lygiagrečia kryptimi ir nuo 3,08 iki 4,77 kN/mm statmena kryptimi, esant nuolatinei apkrovai, lygiai 20 proc. ribinės laikomosios galios. BGP jungtys pademonstravo didžiausią nuolatinį standumą – atitinkamai 32,2 kN/mm ir 17,5 kN/mm [38].

1.4. Pastatų perdangų virpesiai

Perdangoms projektuoti taikomas atsparumo virpesiams reikalavimas.

Ilgo tarpatramio ir lengvų konstrukcijų grindys linkusios virpėti dėl žemo rezonansinio dažnio ir būdingo slopinimo. Virpesius lengvai sužadina einantis ar bėgantis žmogus, todėl šiuose pastatuose dirbantiems ar gyvenantiems asmenims gali kilti nepatogumų [21].

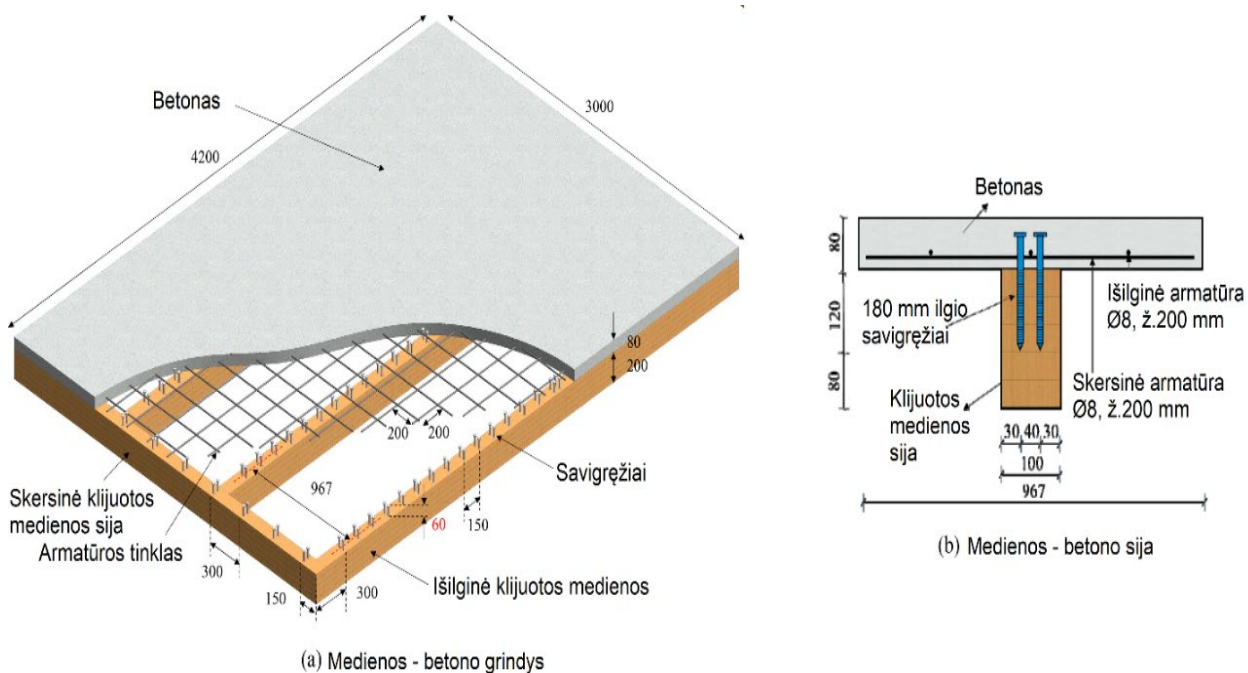
Vertinant medinių grindų virpesių charakteristikas, siūlomos gairės apima empirinius metodus, kurie tiesiog riboja statinę deformaciją ir judesio reakcijas, pvz., pagreičio lygius arba didžiausius greičius grindų paviršiuose, kuriuos sukelia apibrėžti sužadinimai. Naudojamos formulės paprastos ir apima tik keletą įvesties parametrų, tokių kaip d_1 – statinė deformacija esant 1 kN koncentruotai apkrovai, f_1 – pagrindinis savasis dažnis [22].

Pastatų virpėjimo komforto projektavimo poreikį ir galiojančių medinių grindų konstrukcijų virpėjimo komforto vertinimo taisyklių apibendrinimą Europoje straipsnyje pateikia Zhang'as ir kt. [39]. Jie išsamiai aptarė įvairius konstrukcijų virpesių projektavimo standartus, normas, komforto vertinimo metodus, aprašus ir jų ribines vertes.

Kaip teigiama šio straipsnio išvadose [39], dauguma normų naudoja suvokimo kreives, skirtas įvertinti žmonių patogumo ribas atsižvelgiant į medinių grindų virpesius. Eurokodo 5 1-1 dalyje pateikti trys medinių grindų tinkamumo ribiniam būviui projektuoti skirti kriterijai: pagrindinis dažnis, įlinkis nuo koncentruotos apkrovos ir impulso greičio atsakas. EN 1995-1-1 apibrėžia tik bendruosius projektavimo kriterijus pagal taškinės apkrovos įlinkį, tačiau nesiūlo išsamių formulių įlinkiui apskaičiuoti ir taip pat nenumato aiškių projektavimo apribojimų. Elemento impulso greičio atsako kriterijus inžinieriams išlieka vienu sudėtingiausių dėl sunkumo suprasti jo fizikinę reikšmę ir galimybės šį dydį fiziškai išmatuoti. Taip pat siūloma slopinimo koeficiento reikšmes pritaikyti įvairių tipų medinėms grindų sistemoms su įvairių tipų sijomis.

Remiantis Zhang'o straipsnio [39] išvadomis, elemento taškinės apkrovos įlinkio kriterijus yra pats svarbiausias medinėms grindims projektuoti, tačiau papildomi kriterijai išsamesniems skaičiavimams labai priklauso nuo konkrečių praktinių situacijų. Grindims, sukonstruotoms iš pjautinės medienos sijų, elemento impulso greičio atsako kriterijus yra svarbesnis nei pagrindinio dažnio kriterijus. Grindims, pagamintoms iš inžinerinių dvitėjinės formos medinių sijų, pagrindinis dažnis svarbesnis nei elemento impulso greičio atsakas. Grindų konstrukcijoje, pagamintoje su plieninių konstrukcijų sijomis kaip laikančiaisiais elementais, pagrindinio dažnio kriterijus nemažiau svarbus nei elemento taškinės apkrovos įlinkis, kai tuo pačiu elemento impulso greičio atsakas tampa daug mažesnės svarbos nei prieš tai paminėti kiti du kriterijai.

Medienos ir betono kompozito grindų konstrukcijos eksperimentinius ir analitinius dinامينius tikro dydžio tyrimus atliko Xie ir kt. [23]. Jų tyrimo rezultatai atskleidė, kad grindų vertikalus pagreitis padidėjo didėjant žingsnių dažniui ir pėsčiųjų skaičiui. Paprastas ėjimas sukėlė didesnę pagreitį, palyginti su netaisyklingu ėjimu. Pagrindiniam grindų dažniui numatyti buvo pritaikyti trys esami analitiniai modeliai, kurie atitiko eksperimento rezultatus. Be to, buvo pasiūlytas skaičiavimo modelis ir baigtinių elementų modeliai, leidžiantys numatyti didžiausią grindų pagreitį vienam žmogui einant, o analitinio modelio rezultatai sutapo su praktinio bandymo rezultatais. Medienos ir betono kompozito grindų tinkamumui virpesiams įvertinti buvo pasiūlytas dvigubas indeksas. Pagrindinis grindų dažnis turėtų viršyti 15 Hz, o didžiausias pagreitis turi būti mažesnis nei $0,15 \text{ m/s}^2$. Šiame tyrime analizuotos konstrukcijos schema pateikta 22 pav.

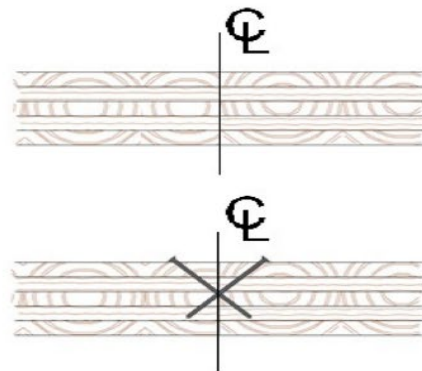
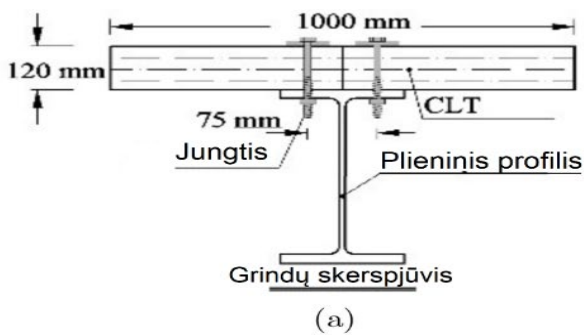


22 pav. Xie ir kt. bandymo objektas [23]

Analogiškus tyrimus plieno ir medienos perdangų konstrukcijoms atliko Chiniforushir'as ir kt. [24]. Jų pastebėjimu, lengvesnio plieno ir medienos kompozito svorio ir mažesnio būdingojo slopinimo, palyginti su įprastomis plieno ir betono kompozitinėmis grindimis, virpesių savybės kelia pagrindines eksploatacines problemas, kurias privaloma išspręsti, kad būtų užtikrintos dinaminės sistemos charakteristikos, kurios atitiktų žmogaus patogumo ribas.

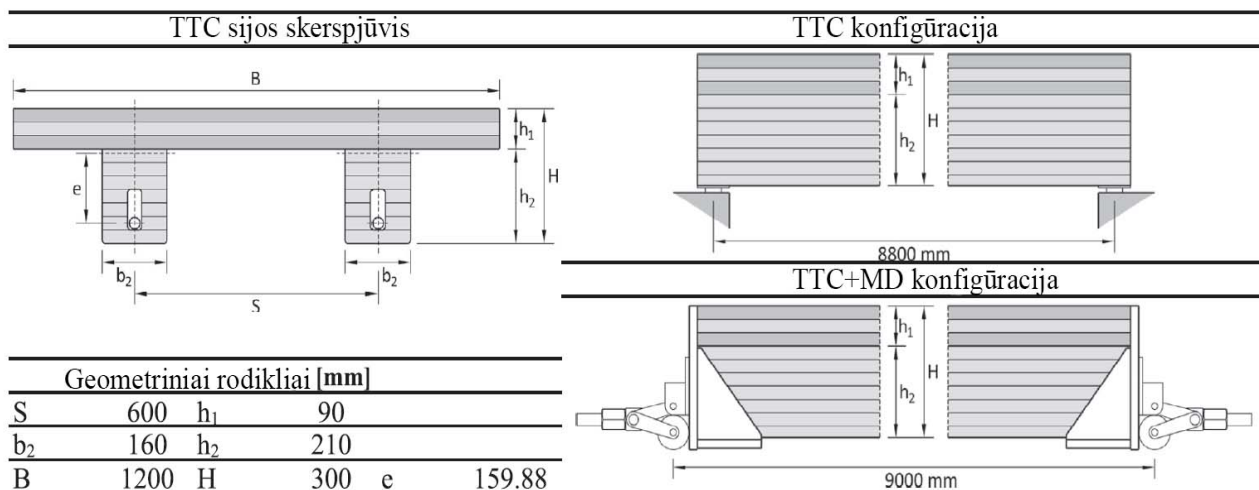
Jų tyrimų rezultatai parodė, kad analitinės formulės pakankamai tiksliai numatė pirmąjį natūralų plieno ir medienos sijų dažnį. Mokslininkai išvadose taip pat pažymi, kad reikėtų ištirti alternatyvias didesnio standumo šlyties jungtis, kad būtų pagerintas šių grindų standumas ir virpesių efektyvumas didesniems tarpatramiams. Šiame tyrime analizuotos konstrukcijos schema pateikta 23 pav.

Tyrimais nustatytas plieno ir medienos kompozitinių sijų savasis dažnis – 24 Hz (tipiniam gyvenamųjų namų tarpatramiui) yra žymiai didesnis nei 8 Hz riba, rekomenduojama Eurokodo 5. Taip buvo pristatyta nauja žymiai mažesnio svorio medienos kompozicinė sistema, palyginti su plieno ir betono sijomis, kurią naudojant galima atitinkamai sumažinti pagrindinių laikančiųjų sijų ir kolonų skerspjūvių dydžius.



23 pav. Chiniforush'o ir kt. bandymo objektas [24]

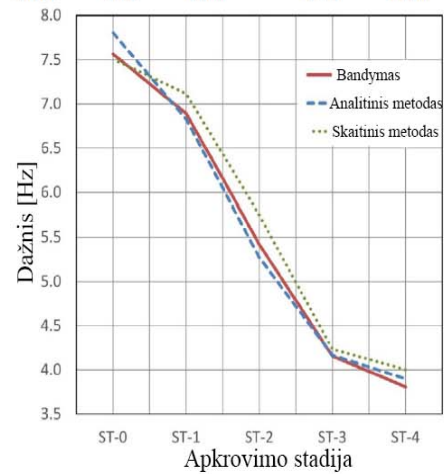
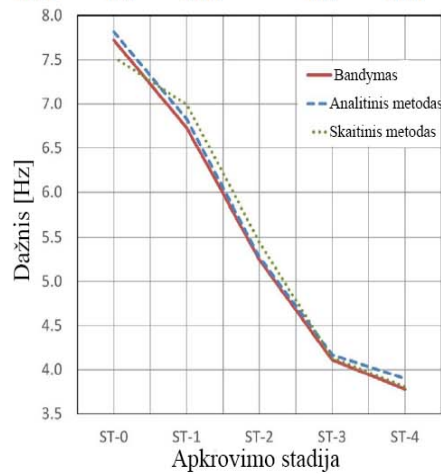
Suárez-as-Riestra ir kt. atliko didelio tarpatramio medžio ir medžio kompozito (TTC) sijų atsparumo dinaminiam poveikiams tyrimą esant skirtingoms apkrovimo sąlygoms [40]. Čia palyginamos neįtemptos ir įtemptos (su sija nesurištu, bet iš anksto įtemptu strypu) perdangų konfigūracijos (žr. 24 pav.). Straipsnyje taip pat pateikiamos analitinė ir skaitinė šių sijų skaičiavimo metodikos.



24 pav. Tiriamų TTC sijų skerspjūvis ir konfigūracijos [40]

Tyrimo rezultatai parodė minimalų skirtumą tarp savųjų dažnių neįtemptos ir įtemptos sijos konfigūracijų atvejais visomis apkrovimo sąlygomis. Daroma išvada, kad su sija nesurišto įtempto strypo panaudojimas konstrukcijoje nėra lemiantis faktorius jos savajam dažniui [40]. Eksperimentinio, analitinio ir skaitinio metodų rezultatai pateikti 25 pav.

Apkrovimo stadija	TTC konfigūracija						TTC+MD konfigūracija					
	Bandymas	ξ	Analitinis metodas	Δ %	Skaitinis metodas	Δ %	Bandymas	ξ	Analitinis metodas	Δ %	Skaitinis metodas	Δ %
ST-0	7.724	1.16	7.818	1.22	7.532	2.49	7.565	1.00	7.807	3.10	7.507	0.76
ST-1	6.729	4.82	6.828	1.47	6.994	3.94	6.892	1.17	6.826	0.96	7.116	3.26
ST-2	5.245	2.80	5.274	0.55	5.442	3.76	5.420	1.21	5.272	2.78	5.747	6.05
ST-3	4.111	3.43	4.168	1.39	4.097	0.35	4.156	0.89	4.167	0.26	4.236	1.93
ST-4	3.783	1.97	3.901	3.12	3.781	0.06	3.811	0.76	3.899	2.29	4.004	5.08



25 pav. Rezultatų palyginimas (TTC ir TTC+MD konfigūracija) [40]

Tyrimo, modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai rodo, kad pateikta analitinė metodika leidžia su iki 3 proc. dydžio paklaida nuspėti dinaminę konstrukcijos elgesį pagal savąjį dažnį. Straipsnyje pateikiamas metodas gali būti naudojamas kaip projektavimo įrankis. Mokslininkai kiekvienai bandymo konfigūracijai sukūrė FEM modelius ir analizavo su skirtingos apkrovos būsenomis. Rezultatai parodė itin tikslų (iki 6 proc. skirtumu) sutapimą su eksperimentinio bandymo rezultatais. Ši skaitinė metodika taip pat tinka šių konstrukcinių elementų dinaminei analizei.

2. Metodologinė dalis

2.1. Apkrovų deriniai

Skirtingoms skaičiuotinėms situacijoms sudaromi apkrovų deriniai, vadovaujantis LST EN 1990 nurodymais.

Apkrovų derinys konstrukcijų saugos ribiniam būviui: tikrinant konstrukcijos saugos ribinius būvius taikoma konstrukcijų irimo (STR) ribinių būvių klasė. Poveikiai apskaičiuojami naudojant tokią apkrovų kombinaciją:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}. \quad (2.1)$$

Apkrovų derinys konstrukcijų tinkamumo ribiniam būviui:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \quad (2.2)$$

čia „+“ – reiškia derinamas su; Σ – reiškia derintinis efektas; $G_{k,j}$ – charakteristinė nuolatinio j -ojo poveikio reikšmė; P – išankstinio įtempio poveikio reikšmė; $Q_{k,1}$ – charakteristinė vyraujančio kintamojo 1-ojo poveikio reikšmė; $Q_{k,i}$ – charakteristinė nevyraujančio kintamojo i -ojo poveikio reikšmė; $\gamma_{G,j}$ – nuolatinio j -ojo poveikio dalinis koeficientas; $\gamma_{Q,1}$ – vyraujančio kintamojo 1-ojo poveikio dalinis koeficientas; $\gamma_{Q,i}$ – kintamojo i -ojo poveikio dalinis koeficientas; $\psi_{0,i}$ – kintamojo i -ojo poveikio derintinės reikšmės koeficientas [49].

2.2. Transformuočių pjūvių metodas

Transformuočių pjūvių metodas kelių medžiagų skerspjuvį transformuoja į vienos medžiagos ekvivalentinį skerspjuvį. Parengta daug mokslinių darbų naudojant šį metodą, ypač sustiprintose ir (arba) iš anksto įtemptose sijose ir kompozitinėse plieno ir betono konstrukcijose [42–46]. Transformuočių pjūvių metodas naudojamas medžio ir kitų medžiagų kompozitinių skerspjuvių skaičiavimams [47, 48].

Šiame darbe skaičiavimai atliekami taikant transformuočių pjūvių metodą skerspjuviui, sudarytam iš dviejų medžiagų [46]. Laikoma, kad medžiagų tarpusavio jungtys užtikrintos, t. y. medžiagų sąlytyje išilginės deformacijos skirtingose medžiagose yra vienodos.

Modalinis santykis:

$$n = E_2/E_1; \quad (2.3)$$

čia E_1 – medžiagos, į kurią transformuojamas skerspjuvis, tamprumo modulis; E_2 – transformuojamos medžiagos tamprumo modulis.

Transformuotos medžiagos plotis (aukštis nekeičiamas):

$$b_{2,T} = n \cdot b_2; \quad (2.4)$$

čia b_2 – transformuojamos medžiagos plotis.

Transformuoto skerspjuvio neutraliosios ašies padėtis skerspjuvio apačios atžvilgiu:

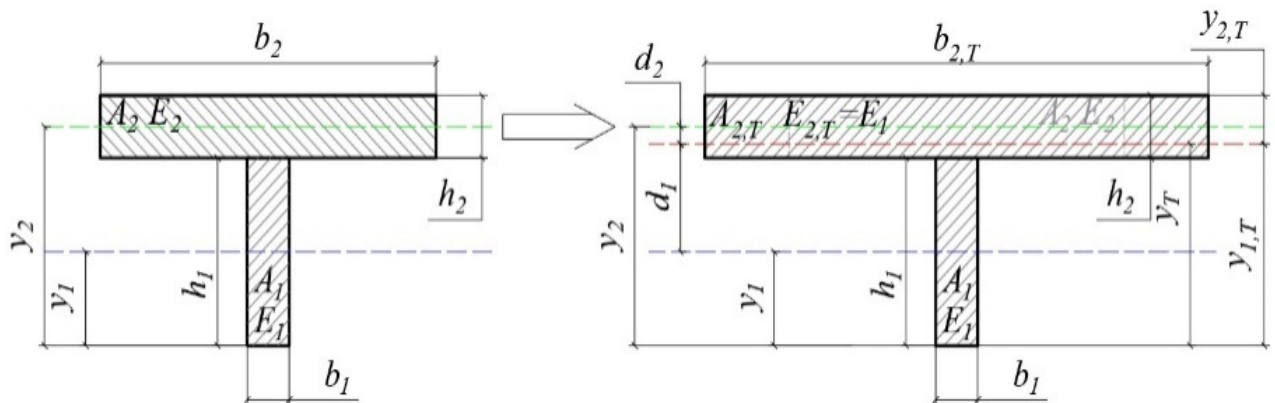
$$y_T = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_{2,T} \cdot y_2}{A_1 + A_{2,T}}; \quad (2.5)$$

čia A_1 – medžiagos, į kurią transformuojama, skerspjūvio plotas; y_1 – atstumas nuo skerspjūvio apačios iki A_1 neutraliosios ašies; $A_{2,T}$ – transformuotos medžiagos skerspjūvio plotas; y_2 – atstumas nuo skerspjūvio apačios iki $A_{2,T}$ neutraliosios ašies; $A_{2,T} = b_{2,T} \cdot h_2$ (žr. 26 pav.).

Bendras skerspjūvio inercijos momentas po transformacijos:

$$I_T = (I_1 + A_1 \cdot d_1^2) + (I_{2,T} + A_{2,T} \cdot d_2^2); \quad (2.6)$$

čia $I_1 = b_1 \cdot h_1^3/12$ – skerspjūvio, į kurią transformuojama, inercijos momentas; d_1 – atstumas nuo A_1 neutraliosios ašies iki bendro skerspjūvio neutraliosios ašies; $I_{2,T} = b_{2,T} \cdot h_2^3/12$ – transformuoto skerspjūvio inercijos momentas; d_2 – atstumas nuo $A_{2,T}$ neutraliosios ašies iki bendro skerspjūvio neutraliosios ašies (žr. 26 pav.).



26 pav. Transformuojamo skerspjūvio geometriniai rodikliai. Šiame paveiksle pavaizduota 2-o (viršutinio) sluoksnio transformacija į 1-ą (apatinį) sluoksnį

Įrašų ir atraminių reakcijų skaičiavimas

Didžiausias veikiantis lenkimo momentas skerspjūvyje, kai apkrova tolygiai paskirstyta visame tarpatramyje, o sijos abu galai įtvirtinti lanksčiai (vienas galas neslankus, o kitas slankus sijos ašies kryptimi):

$$M_{max} = \frac{q_d \cdot L_{sk}^2}{8}; \quad (2.7)$$

čia q_d – vertikali tolygiai tarpatramyje paskirstyta apkrova pagal saugos ribinio būvio apkrovų derinį; L_{sk} – skaičiuojamasis sijos ilgis.

Kai dviatramė sija lanksčiai įtvirtinta abiejose atramose, o apkrova paskirstyta tolygiai, vertikalios atraminių reakcijų reikšmės vienodos ir lygios didžiausiai veikiančiai skersinei jėgai. Apskaičiuojama pagal formulę:

$$R_{z,1} = R_{z,2} = V_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_{sk}}{2}; \quad (2.8)$$

čia $R_{z,1}$ – 1 įtvirtinimo vertikali atraminė reakcija; $R_{z,2}$ – 2 įtvirtinimo vertikali atraminė reakcija; V_{Ed} – didžiausia veikianti skersinė jėga skerspjūvyje.

2.3. Lenkimo įtempiai ir lenkiamojo elemento stiprumo sąlygos tikrinimas

Didžiausi lenkimo įtempiai labiausiai tempiamoje skerspjūvio dalyje (medinėje sijoje):

$$\sigma_{max,1} = \frac{M_{Ed} \cdot y_{1,T}}{I_T}. \quad (2.9)$$

Didžiausi lenkimo įtempiai labiausiai gniuždomojoje skerspjūvio dalyje (betoninėje plokštėje):

$$\sigma_{max,2} = n \cdot \frac{M_{Ed} \cdot y_{2,T}}{I_T}. \quad (2.10)$$

Kad medinės sijos laikomoji galia lenkimui būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\frac{\sigma_{max,1}}{f_{m,0,edge,d}} \leq 1,0. \quad (2.11)$$

Skaičiuotinis lenkiamasis medienos stipris:

$$f_{m,0,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{m,0,edge,k}}{\gamma_M}, \quad (2.12)$$

čia $f_{m,0,edge,k}$ – medienos lenkiamojo stiprio charakteristinė reikšmė; k_{mod} – pataisos koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės ir drėgnio poveikį; γ_M – stiprumo savybės dalinis koeficientas [52].

Kad betoninės plokštės laikomoji galia lenkimui būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\sigma_{max,2} \leq f_{cd}. \quad (2.13)$$

Skaičiuotinis gniuždomasis betono stipris:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_C}, \quad (2.14)$$

čia f_{ck} – cilindrinis charakteristinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris; α_{cc} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į gniuždomojo stiprio ilgalaikius efektus ir nepalankius efektus, atsirandančius dėl apkrovos veikimo būdo; γ_C – betono dalinis saugos koeficientas [51].

2.4. Šlyties įtempiai ir stiprumo sąlygos tikrinimas

Kad sijos laikomoji galia šlyčiai būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$f_{v,0,edge,d} \geq \tau_d. \quad (2.15)$$

Skaičiuotinė šlyties laikomoji galia:

$$f_{v,0,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{v,0,edge,k}}{\gamma_M}. \quad (2.16)$$

Projektiniai šlyties įtempiai skerspjūvyje:

$$\tau_d = \frac{1,5V_{Ed}}{A}, \quad (2.17)$$

čia A – suminis transformuoto skerspjūvio plotas.

2.5. Gniuždymo įtempiai atraminėje zonoje ir stiprumo sąlygos tikrinimas

Kad perdangos sijos laikomoji galia atraminėje dalyje gniuždant skersai medienos pluoštų būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,edge,d}. \quad (2.18)$$

Skaičiuotinis gniuždymo stipris skersai pluošto:

$$f_{c,90,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{c,90,edge,k}}{\gamma_M}. \quad (2.19)$$

Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovos konfigūraciją, skilimo galimybę ir gniuždomosios deformacijos laipsnį:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l_{atr}}{250}\right) \left(1 + \frac{h_{MS}}{12 \cdot l_{atr}}\right) < 4. \quad (2.20)$$

Gniuždymo įtempiai atramos zonoje apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_{z,i}}{b_{MS} \cdot l_{atr}}. \quad (2.21)$$

2.6. Įlinkiai ir standumo sąlygos tikrinimas

Įlinkiai apskaičiuojami ir standumo sąlygos patikrinimas atliekamas pagal LST EN 1995-1-1 pateikiamą metodiką [52].

Perdangos sijos turi tenkinti tokias tinkamumo ribinio būvio sąlygas:

$$\begin{cases} \frac{u_{inst}}{\omega_{inst,lim}} \leq 1,0; \\ \frac{u_{fin}}{\omega_{fin,lim}} \leq 1,0. \end{cases} \quad (2.22)$$

Galutinis perdangos sijos įlinkis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1}. \quad (2.23)$$

Galutinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}); \quad (2.24)$$

čia $k_{def} = 0,8$ – deformacijos koeficientas [52].

Galutinis perdangos sijos įlinkis nuo kintamųjų apkrovų:

$$u_{fin,Q1} = u_{inst,Q1} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}); \quad (2.25)$$

čia $\psi_2 = 0,3$ – tariamai nuolatinio poveikio koeficientas [52].

Akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$u_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_k \cdot L_{sk}^4}{E_{0,mean} \cdot I_T}. \quad (2.26)$$

Akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo kintamųjų apkrovų:

$$u_{inst,Q1} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{k,1} \cdot L_{sk}^4}{E_{0,mean} \cdot I_T}. \quad (2.27)$$

Medinių perdangos sijų ribinis akimirkinis įlinkis:

$$\omega_{inst,lim} = L_{sk}/400. \quad (2.28)$$

Medinių perdangos sijų ribinis galutinis įlinkis:

$$\omega_{fin,lim} = L_{sk}/250. \quad (2.29)$$

2.7. Perdangų savieji svyravimų dažniai ir atitikimo virpesių apribojimams tikrinimas

Stačiakampio formos grindims pagrindinis perdangos konstrukcijos virpesių dažnis apskaičiuojamas pagal tokią išraišką ir turėtų viršyti 8 Hz ribą [52]:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L_{sk}^2} \sqrt{\frac{(E_{0,mean} I_T) / s_{MS}}{m}} \quad (2.30)$$

čia m – perdangos masė tenkanti vienam kvadratiniam metrui ploto nuo konstrukcijos savojo svorio; s_{MS} – atstumas tarp medinių sijų; $(E_{0,mean} I_T)$ – transformuoto skerspjūvio standumas; L_{sk} – perdangos skaičiuojamasis ilgis.

Perdangos masė tenkanti vienam kvadratiniam metrui ploto nuo konstrukcijos savojo svorio:

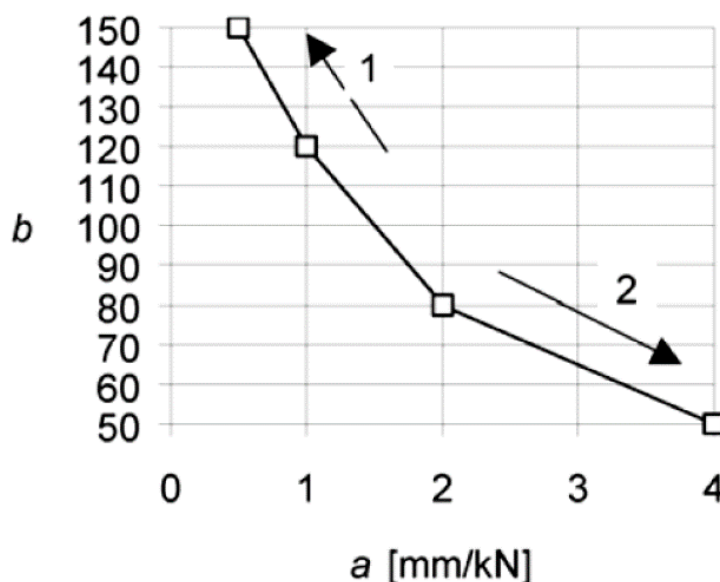
$$m = \frac{b_{MS} \cdot h_{MS} \cdot \rho_{LVL}}{s_{MS}} + h_{BP} \cdot \rho_{betono}. \quad (2.31)$$

Kai pagrindinis perdangos konstrukcijos virpesių dažnis didesnis už 8 Hz turi būti tenkinamos tokios sąlygos:

$$\begin{cases} \frac{\omega}{F} \leq a; \\ v \leq b(f_1 \zeta - 1); \end{cases} \quad (2.32)$$

čia ω – didžiausias akimirkinis vertikalusis įlinkis; F – 1 kN sutelktoji statinė vertikali apkrova; v – vienetinė impulsinė greičio reakcija; a ir b – reikšmės pagal 27 pav.; ζ – modalinio slopinimo koeficientas.

Rekomenduojamasis (pagal EN 1995-1-1) a ir b ribinių reikšmių intervalas ir tarpusavio sąryšis pateiktas 27 pav.



27 pav. Rekomenduojamasis a ir b ribinių reikšmių intervalas ir tarpusavio sąryšis [52]

Didžiausias akimirkinis vertikalusis įlinkis, kurį, priklausomai nuo apkrovos pasiskirstymo, sukelia vertikali sutelktoji statinė jėga F , veikianti bet kurioje grindų vietoje:

$$\omega = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot L_{sk}^3}{48 \cdot E_{0,mean} \cdot I_T}. \quad (2.33)$$

Vienetinė impulsinė greičio reakcija, t.y. vertikalūs grindų virpesiai, kuriuos sukelia idealus vienetinis impulsas (1 Ns), veikiantis didžiausią reakciją turinčioje grindų vietoje, greičio (m/s) didžiausioji pradinė reikšmė (komponentų, viršijančių 40 Hz, gali būti nepaisoma) [52]:

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \quad (2.34)$$

Pirmosios eilės režimų su iki 40 Hz savuoju dažniu skaičius apskaičiuojamas pagal formulę:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{B_{MBK}}{L_{sk}} \right)^4 \frac{(E_{0,mean} I_T) / S_{MS}}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (2.35)$$

Perdangos standumas statmena sijų išdėstymui kryptimi:

$$(EI)_b = E_{cm} \cdot \left(\frac{1 \cdot h_{BP}^3}{12} \right) \quad (2.36)$$

EN 1995-1-1 nurodo: jei neįrodyta, kad kitos reikšmės būtų tinkamesnės, grindims turi būti taikomas modalinio slopinimo koeficientas $\zeta = 0,01$ [52].

2.8. Perdangų tyrimas taikant skaitinius inžinerijos metodus

Modeliavimas ir skaičiavimai atliekami programiniu paketu „SolidWorks“. Jame naudojamas baigtinių elementų metodas (BEM). Tai skaitmeninė technika, naudojama analizėje, siekiant išspręsti sudėtingų elementų uždavinius, padalijant juos į mažesnius elementus.

Pagrindiniai žingsniai atliekant konstrukcijos analizę skaitiniu metodu:

1. Geometrijos modeliavimas: programos aplinkoje sukuriama erdviniai konstrukcijos elementai – LVL sija ir betoninė plokštė kiekvienam nagrinėjamam perdangos atvejui. Svarbu užtikrinti, kad geometrija tiksliai atspindėtų realias sąlygas sprendžiamo uždavinio atžvilgiu.
2. Medžiagos savybės: nurodomos medžiagos savybės kiekvienai modelio daliai. Įvedama informacija apie medžiagos tamprumo modulį, tankį, stiprio savybes ir t.t., priklausomai nuo analizei reikalingų duomenų.
3. Surinkimas: iš sukurtų komponentų surenkamas perdangos konstrukcijos skaičiuojamasis modelis.
4. Kraštinės sąlygos: nurodomos sąlygos, kuriomis remiantis modeliui taikomi suvaržymai ir apkrovos. Tai tam tikrų laisvės laipsnių fiksavimas projekcinėse vietose ir apkrovos pritaikymas imituojant realias sąlygas.
5. Tinklelio generavimas: erdvinis modelis padalinamas į mažesnes, baigtines dalis. Priartėjimo būdu parenkamas optimalus sudalinimo elementų kiekis, siekiant užtikrinti greitą, bet tikslų skaičiavimo rezultatą.
6. Analizės tipas: pasirenkamas analizės tipas. Šiame darbe naudojami 2 tipai – statinė analizė ir virpesių analizė.

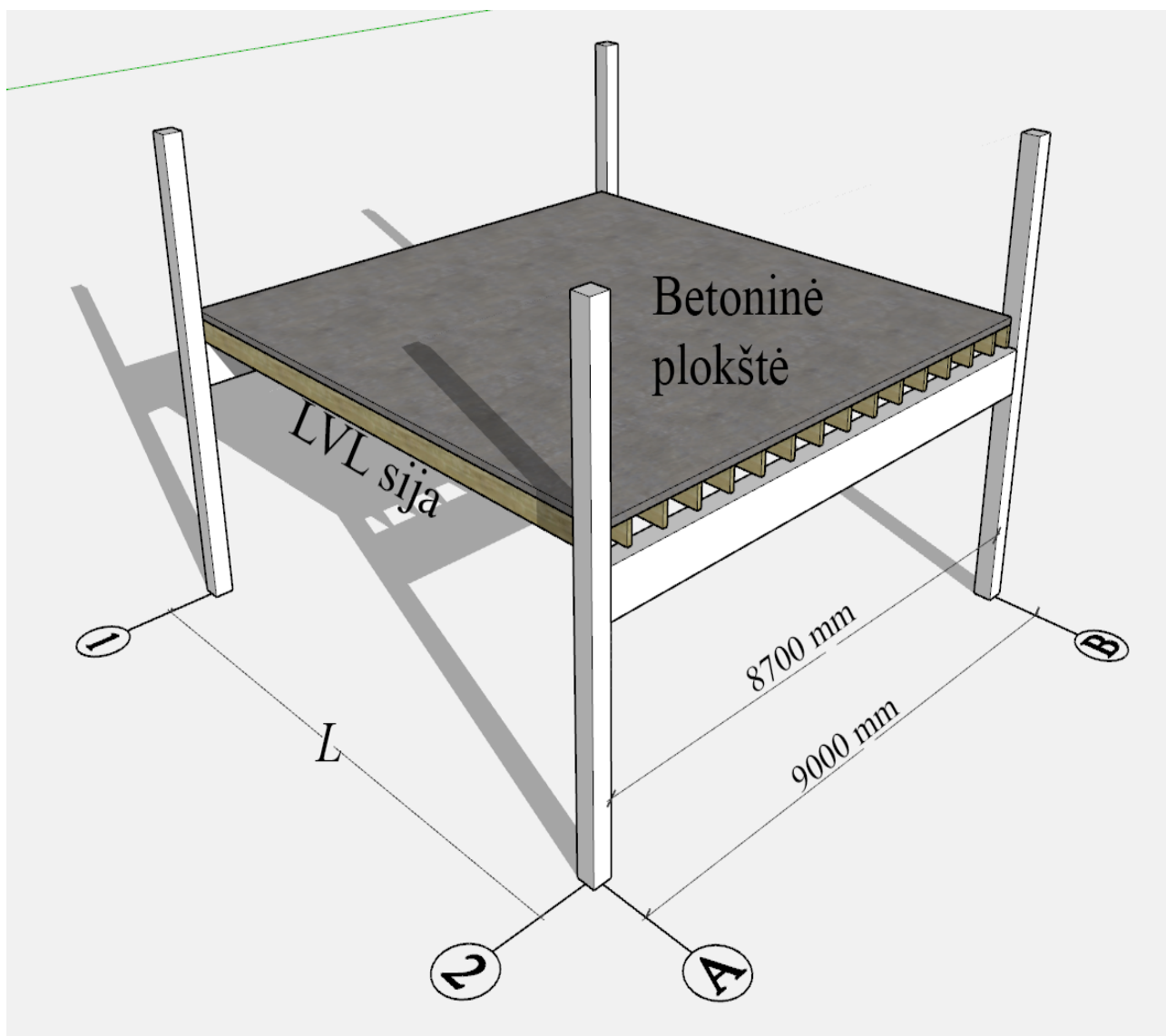
Siekiant patikrinti skaičiuojamojo modelio tikslumą, įvertinami programa apskaičiuoti lenkimo įtempiai skerspjuvyje ir konstrukcijos įlinkiai. Rezultatai palyginami su analitinio metodo rezultatais.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimas taikant analitinę skaičiavimo metodiką

Šioje dalyje perdangos plokščių laikomosios galios ir pirmojo savųjų svyravimų dažnio nustatymas atliekamas taikant transformuotą pjūvių metodą ir Lietuvoje galiojančių Europos standartų (Eurokodų) pateikiamas metodikas.

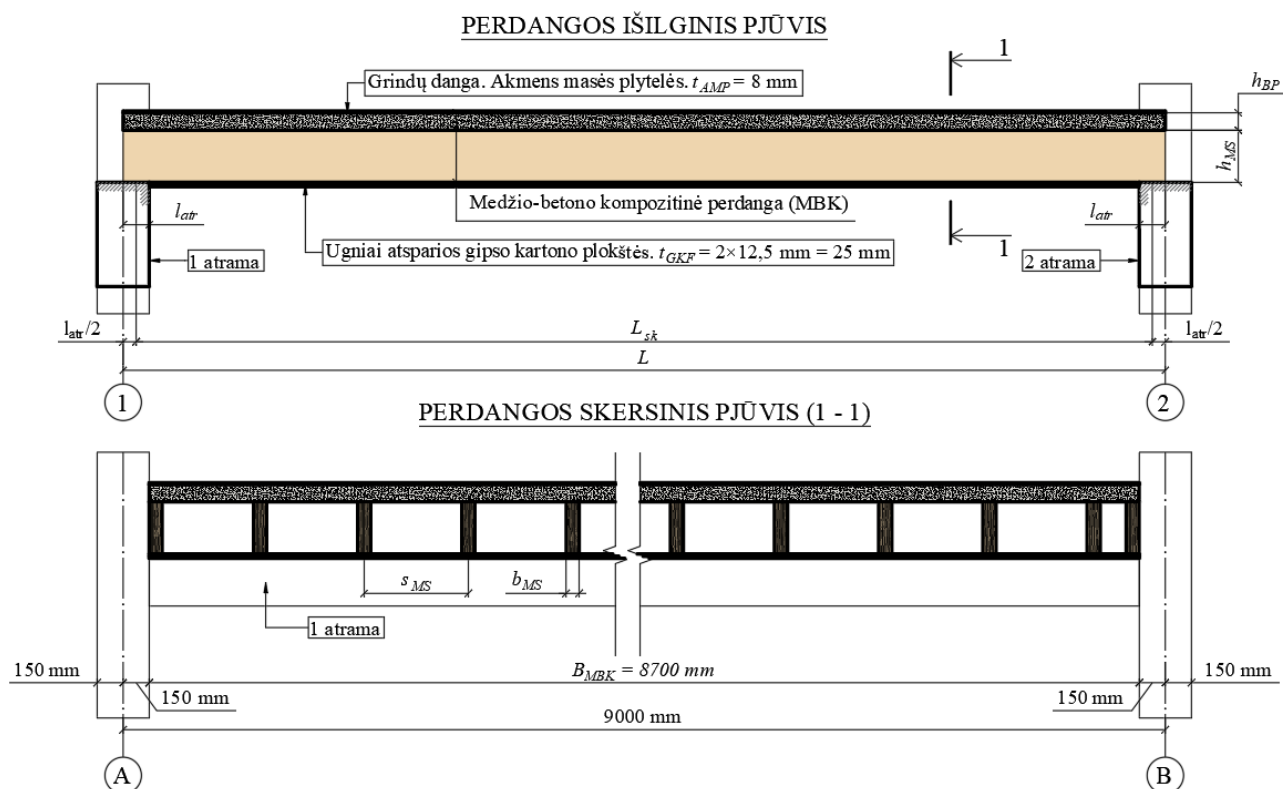
Tyrimė nagrinėjamos 10-ties skirtingų ilgių perdangos, kiekvienai jų suteiktas unikalus žymuo, pavyzdžiui, MBK3(EK). MBK – tai medžio ir betono kompozitas, skaičius žymi perdangos ilgį L , skliaustuose nurodoma, kuriuo metodu analizuojama perdanga ((EK) – Eurokodas). Perdangos erdvinis vaizdas pateiktas 28 pav.



28 pav. Analizuojamos perdangos erdvinis vaizdas

3.1.1. Perdangų modeliai

29 pav. pavaizduoti perdangų konstrukcijų bendrieji išilginiai ir skersiniai pjūviai, kuriais vadovaujantis sudaromos skaičiuojamosios schemas ir atliekami skaičiavimai.



29 pav. perdangų konstrukcijų bendrieji išilginiai ir skersiniai pjūviai

Geometrinės savybės bendros visoms nagrinėjamos perdangoms:

- perdangų plotis $B_{MBK} = 8700$ mm;
- medinių sijų aukštis $h_{MS} = 300$ mm;
- medinių sijų plotis $b_{MS} = 75$ mm;
- gelžbetoninės plokštės storis $h_{BP} = 100$ mm;
- atstumas tarp medinių sijų $s_{MS} = 600$ mm;
- gelžbetoninės plokštės efektyvusis plotis $b_{eff} = s_{MS} = 600$ mm;
- medinių sijų atramos ilgis $l_{atr} = 150$ mm.

Geometrinės savybės būdingos kiekvienai nagrinėjamai perdangos plokštei atskirai pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Medžio ir betono perdangų geometrinės savybės

Eil. Nr.	Žymuo	Ilgis L , m	Kompozitinės perdangos skaičiuojamasis ilgis L_{sk} , m
1	MBK3(EK)	3,00	2,85
2	MBK4(EK)	4,00	3,85
3	MBK5(EK)	5,00	4,85
4	MBK6(EK)	6,00	5,85
5	MBK7(EK)	7,00	6,85
6	MBK8(EK)	8,00	7,85
7	MBK9(EK)	9,00	8,85
8	MBK10(EK)	10,00	9,85
9	MBK11(EK)	11,00	10,85
10	MBK12(EK)	12,00	11,85

3.1.2. Perdangų sudedamųjų dalių fizikinės ir mechaninės savybės

Perdangų sudedamųjų dalių, medinių sijų ir gelžbetoninių plokščių, fizikinės savybės pateiktos 5 ir 6 lentelėse.

5 lentelė. Medinių (LVL) sijų fizikinės ir mechaninės savybės

Tipas, klasė	Charakteristinis lenkiamasis stipris $f_{m,0,edge,k}$, MPa	Charakteristinis gniuždymo stipris skersai pluošto $f_{c,90,edge,k}$, MPa	Charakteristinis šlyties (kirpimo) išilgai pluoštų stipris $f_{v,0,edge,k}$, MPa	Vidutinis tamprumo išilgai pluošto modulis $E_{0,mean}$, MPa	Vidutinis medžiagos tankis ρ_{LVL} , kg/m ³
LVL R	44,0	7,50	4,60	14 000	550

6 lentelė. Gelžbetoninių plokščių fizikinės ir mechaninės savybės

Tipas, klasė	Charakteristinis betono gniuždomasis stipris f_{ck} , MPa	Tamprumo modulis E_{cm} , MPa	Vidutinė medžiagos tūrinė masė ρ_{betono} , kg/m ³
C30/37	30,0	33 000	2 500

Inžinerinės medienos (LVL) duomenys parinkti pagal „Steico“ pateiktą produkto deklaraciją [53]. Betono charakteristikos parinktos vadovaujantis Eurokodais 1 ir 2 [50, 51].

3.1.3. Perdangas veikiančios apkrovos

Perdangų analizė atliekama priimant, kad konstrukcija yra veikiama savojo svorio, B kategorijos perdangų naudojimo apkrovų ir kilnojamųjų pertvarų savojo svorio.

Analizei priimtos perdangas veikiančios apkrovos pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė. Perdangas veikiančios apkrovos

Eil. Nr.	Apkrovos tipas	Apkrovos dydis, kN/m ²	Apkrovos dydis, kN/m	Poveikio koeficientas saugos ribiniam būviui
1	Nuolatinė, konstrukcinė, LVL sija	-	$q'_{MS} = 0,121^*$	$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$
2	Nuolatinė, konstrukcinė, g/b plokštė	$q_{BP} = 2,453^{**}$	-	$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$
3	Nuolatinė, nekonstrukcinė, gipso-kartono plokštės ir grindų danga	$q_{NN} = 0,54$	-	$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$
4	B kategorijos naudojimo apkrova	$q_{B,ka.} = 2,00$	-	$\gamma_{Q,1} = 1,3$
5	Kilnojamos pertvaros su savuoju svoriu $>1 \leq 2,0$ kN/m	$q_{KP.} = 0,80$	-	$\gamma_{Q,1} = 1,3$

* $q'_{MS} = b_{MS} \cdot h_{MS} \cdot \rho_{LVL} \cdot g / 1000$, kN/m; ** $q_{BP} = \rho_{betono} \cdot h_{BP} \cdot g / 1000$, kN/m²; g – laisvojo kritimo pagreitis, 9,81 m/s².

Apkrovų poveikių koeficientai ir poveikių vertės parinkti vadovaujantis [49] ir [50]. Inžinerinės medienos svoris apskaičiuotas panaudojant medžiagos tankio reikšmę, pateiktą sijos gamintojo Steico LVL R produkto eksploatacinių savybių deklaracijoje [53].

3.1.4. Apkrovų deriniai

Apkrovų derinys konstrukcijų saugos ribiniam būviui: tikrinant konstrukcijos saugos ribinius būvius taikoma konstrukcijų irimo (STR) ribinių būvių klasė. Analizuojamu atveju, kai veikia tik nuolatinės

apkrovos ir vienos rūšies kintamas vyraujantis poveikis (2.1) išraiška supaprastinama ir poveikiai apskaičiuojami naudojant toki apkrovų derinį:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \quad (3.1)$$

Nuolatinio j -ojo poveikio dalinis koeficientas $\gamma_{G,j} = 1,35$ [49].

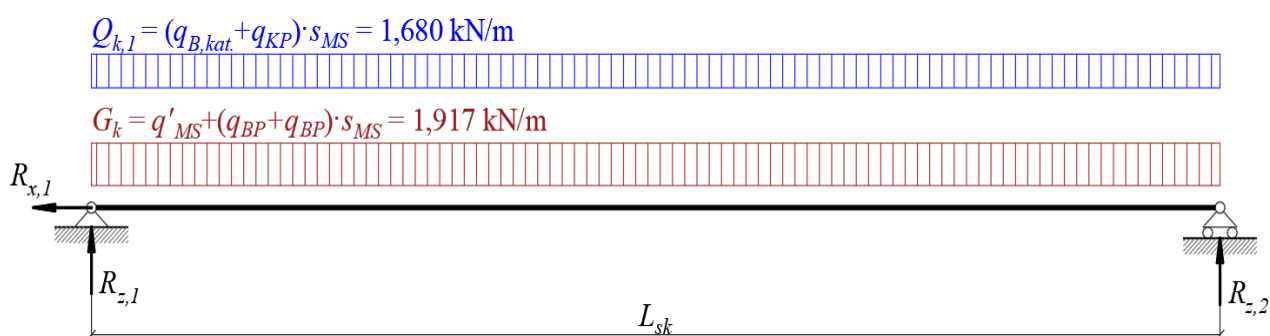
vyraujančio kintamojo 1-ojo poveikio dalinis koeficientas $\gamma_{Q,1} = 1,30$ [49].

Kaip ir saugos ribinio būvio atveju, tinkamumo ribinio būvio apkrovų derinio (2.2) išraiška supaprastinama ir randama taip:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} \quad (3.2)$$

3.1.5. Perdangos skaičiuojamoji schema

Perdanga analizuojama kaip lanksčiai įtvirtintas dvitramis sijinis elementas pasirinktiems tarpatramių ilgiams. Perdangos skaičiuojamoji schema pavaizduota 30 pav.



30 pav. Perdangos skaičiuojamoji schema

3.1.6. Perdangos skerspjūvio geometriniai rodikliai

Taikant analitinę skaičiavimo metodiką, kompozitinės perdangos skerspjūvio geometriniai rodikliai apskaičiuojami panaudojant transformuotų pjūvių metodą, kuriuo kelių medžiagų skerspjūvis transformuojama į vienos medžiagos ekvivalentinį skerspjūvį. Šiame tyrime skaičiavimai atliekami taikant transformuotų pjūvių metodą skerspjūviui, sudarytam iš dviejų medžiagų. Transformuojama betoninė perdangos skerspjūvio dalis į medinę. Laikoma, kad medžiagų tarpusavio jungtys užtikrintos, t. y. medžiagų sąlytyje išilginės deformacijos skirtingose medžiagose vienodos. Nagrinėjami skerspjūvio rodikliai pavaizduoti 2.2 poskyryje 26 pav.

Skerspjūvio sudedamųjų dalių modalinis santykis:

$$n = \frac{E_2}{E_1} = \frac{33\,000}{14\,000} = 2,357; \quad (3.3)$$

čia E_1 – LVL tamprumo modulis; E_2 – betono tamprumo modulis.

Transformuotos skerspjūvio dalies plotis (aukštis nekeičiamas, kad nepasislinktų skerspjūvio neutralioji ašis):

$$b_{2,T} = n \cdot b_2 = n \cdot b_{eff} = 2,357 \cdot 60 = 141,42 \text{ cm}; \quad (3.4)$$

čia b_2 – transformuojamos medžiagos plotis.

Transformuoto skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis skerspjūvio apačios atžvilgiu:

$$y_T = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_{2,T} \cdot y_2}{A_1 + A_{2,T}} = \frac{225 \cdot 15 + 1414,2 \cdot 35}{225 + 1414,2} = 32,3 \text{ cm}; \quad (3.5)$$

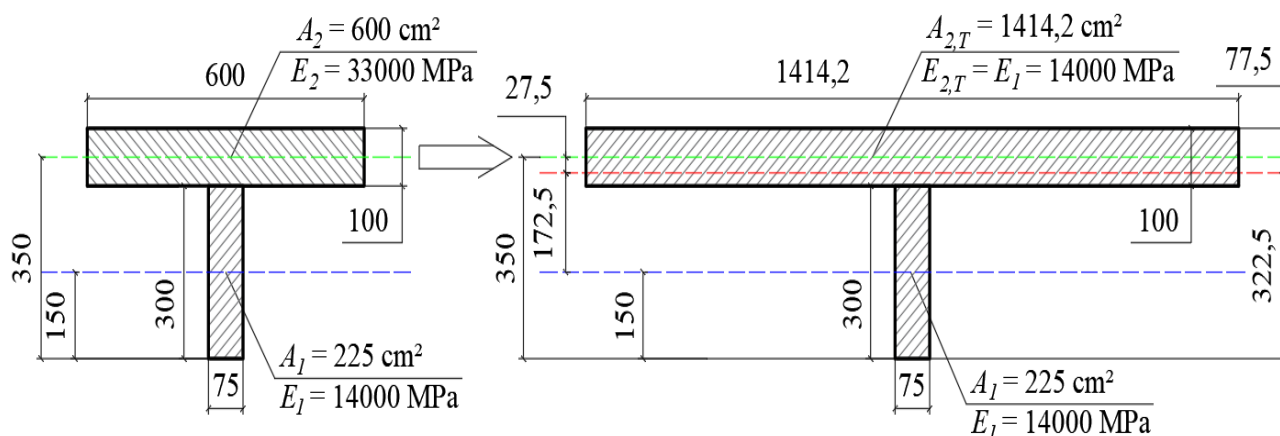
čia A_1 – LVL sijos skerspjūvio plotas; y_1 – atstumas nuo skerspjūvio apačios iki A_1 neutraliosios ašies; $A_{2,T}$ – betoninės dalies (transformuotos į medieną) skerspjūvio plotas; y_2 – atstumas nuo skerspjūvio apačios iki $A_{2,T}$ neutraliosios ašies; $A_{2,T} = b_{2,T} \cdot h_2$.

Bendras skerspjūvio inercijos momentas po transformacijos:

$$I_T = (I_1 + A_1 \cdot d_1^2) + (I_{2,T} + A_{2,T} \cdot d_2^2) = (16875 + 225 \cdot 17,25^2) + (11766 + 1414,2 \cdot 2,75^2) = 106287,45 \text{ cm}^4; \quad (3.6)$$

čia $I_1 = b_1 \cdot h_1^3 / 12$ – LVL sijos skerspjūvio inercijos momentas; d_1 – atstumas nuo A_1 neutraliosios ašies iki bendro skerspjūvio neutraliosios ašies; $I_{2,T} = b_{2,T} \cdot h_2^3 / 12$ – betoninės (transformuotos į medieną) skerspjūvio dalies inercijos momentas; d_2 – atstumas nuo $A_{2,T}$ neutraliosios ašies iki bendro skerspjūvio neutraliosios ašies.

Skerspjūvio geometriniai rodikliai prieš ir po transformacijos pavaizduoti 31 pav.



31 pav. Kompozitinio skerspjūvio geometriniai rodikliai prieš ir po transformacijos

3.1.7. Įrašų ir atraminių reakcijų perdangos sijose skaičiavimas

Šiame poskyryje atliekami perdangos sijų įrašų verčių skaičiavimai. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 8 lentelėje.

Perdangos sijas veikiantis didžiausias lenkimo momentas:

$$M_{Ed,y} = \frac{q_d \cdot L_{sk}^2}{8} = \frac{4,772 \cdot 6,85^2}{8} = 27,989 \text{ kNm}; \quad (3.7)$$

čia q_d – veikianti paskirstytoji skaičiuotinė apkrova pagal saugos ribinio būvio derinį.

Kai dviatramė sija lanksčiai įtvirtinta abiejose atramose, o apkrova paskirstyta tolygiai, vertikalios atraminių reakcijų reikšmės vienodos ir lygios didžiausiai veikiančiai skersinei jėgai. Apskaičiuojama pagal formulę:

$$R_{z,1} = R_{z,2} = V_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_{sk}}{2} = \frac{4,772 \cdot 6,85}{2} = 16,344 \text{ kN}. \quad (3.8)$$

8 lentelė. Visų perdangų įrašų ir atraminių reakcijų skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	Žymuo	$M_{Ed,y}$, kNm	$R_{z,1} = R_{z,2} = V_{Ed}$, kN
1	MBK3(EK)	4,845	6,800
2	MBK4(EK)	8,842	9,186
3	MBK5(EK)	14,031	11,572
4	MBK6(EK)	20,414	13,958
5	MBK7(EK)	27,989	16,344
6	MBK8(EK)	36,757	18,730
7	MBK9(EK)	46,719	21,116
8	MBK10(EK)	57,873	23,502
9	MBK11(EK)	70,221	25,888
10	MBK12(EK)	83,761	28,274

3.1.8. Lenkimo įtempiai ir lenkiamojo elemento stiprumo sąlygos tikrinimas

Šiame poskyryje atliekami lenkiamųjų perdangos sijų įtempių verčių skaičiavimai ir stiprumo sąlygų patikrinimai. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 9 lentelėje ir 32 pav.

Didžiausi įtempiai labiausiai tempiamoje skerspjūvio dalyje (medinėje sijoje):

$$\sigma_{max,1} = \frac{M_{Ed} \cdot y_{1,T}}{I_T} = \frac{27,989 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3225}{106287,45 \cdot 10^{-8}} = 8,492 \text{ MPa.} \quad (3.9)$$

Didžiausi įtempiai labiausiai gniuždomojoje skerspjūvio dalyje (betoninėje plokštėje):

$$\sigma_{max,2} = n \cdot \frac{M_{Ed} \cdot y_{2,T}}{I_T} = 2,357 \cdot \frac{27,989 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0775}{106287,45 \cdot 10^{-8}} = 4,810 \text{ MPa.} \quad (3.10)$$

Kad medinės sijos laikomoji galia lenkimui būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\frac{\sigma_{max,1}}{f_{m,0,edge,d}} \leq 1,0. \quad (3.11)$$

Skaičiuotinis lenkiamasis medienos stipris:

$$f_{m,0,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{m,0,edge,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{44,0}{1,20} = 29,33 \text{ MPa;} \quad (3.12)$$

čia $f_{m,0,edge,k}$ – medienos lenkiamojo stiprio charakteristinė reikšmė; k_{mod} – pataisos koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės ir drėgnio poveikį; γ_M – stiprumo savybės dalinis koeficientas.

$$\frac{\sigma_{max,1}}{f_{m,0,edge,d}} = \frac{8,492}{29,33} = 0,290 \leq 1,0. \quad (3.13)$$

Sijos laikomoji galia lenkimui pakankama.

Kad betoninės plokštės laikomoji galia lenkimui būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\sigma_{max,2} \leq f_{cd}. \quad (3.14)$$

Skaičiuotinis gniuždomasis betono stipris:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = 1,0 \cdot \frac{30,0}{1,5} = 20 \text{ MPa;} \quad (3.15)$$

čia f_{ck} – cilindrinis charakteristinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris; α_{cc} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į gniuždomojo stiprio ilgalaikius efektus ir nepalankius efektus, atsirandančius dėl apkrovos veikimo būdo; γ_c – betono dalinis saugos koeficientas.

$$\sigma_{max,2} = 4,810 \text{ MPa} \leq f_{cd} = 20 \text{ MPa}. \quad (3.16)$$

Plokštės gniuždomoji laikomoji galia lenkiamame elemente pakankama.

9 lentelė. Visų perdangų lenkimo įtempiai

Eil. Nr.	Žymuo	$\sigma_{max,1}$, MPa	$\frac{\sigma_{max,1}}{f_{m,0,edge,d}}$, proc.	$\sigma_{max,2}$, MPa	$\frac{\sigma_{max,2}}{f_{cd}}$, proc.
1	MBK3(EK)	1,470	5,01	0,832	4,16
2	MBK4(EK)	2,683	9,15	1,518	7,59
3	MBK5(EK)	4,257	14,51	2,410	12,05
4	MBK6(EK)	6,194	21,11	3,506	17,53
5	MBK7(EK)	8,492	28,95	4,807	24,03
6	MBK8(EK)	11,153	38,02	6,312	31,56
7	MBK9(EK)	14,175	48,32	8,023	40,12
8	MBK10(EK)	17,559	59,86	9,939	49,69
9	MBK11(EK)	21,306	72,63	12,059	60,30
10	MBK12(EK)	25,414	86,64	14,384	71,92

3.1.9. Šlyties įtempiai ir stiprumo sąlygos tikrinimas

Šiame poskyryje atliekami perdangos sijų šlyties įtempių verčių skaičiavimai ir stiprumo sąlygų patikrinimai. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 10 lentelėje ir 32 pav.

Kad sijos laikomoji galia šlyčiai būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$f_{v,0,edge,d} \geq \tau_d. \quad (3.17)$$

Skaičiuotinė šlyties laikomoji galia:

$$f_{v,0,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{v,0,edge,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{4,60}{1,20} = 3,067 \text{ MPa}. \quad (3.18)$$

Projektiniai šlyties įtempiai skerspjūvyje:

$$\tau_d = \frac{1,5V_{Ed}}{A} = \frac{1,5 \cdot 16,344 \cdot 10^{-3}}{0,16393} = 0,150 \text{ MPa}; \quad (3.19)$$

čia A – suminis transformuoto skerspjūvio plotas.

$$f_{v,0,edge,d} = 3,067 \text{ MPa} \geq \tau_d = 0,150 \text{ MPa}. \quad (3.20)$$

Sijos laikomoji galia šlyčiai pakankama.

10 lentelė. Visų perdangų šlyties įtempiai

Eil. Nr.	Žymuo	τ_d , MPa	$\frac{\tau_d}{f_{v,0,edge,d}}$, proc.
1	MBK3(EK)	0,0622	2,03
2	MBK4(EK)	0,0841	2,74
3	MBK5(EK)	0,1059	3,45
4	MBK6(EK)	0,1277	4,16
5	MBK7(EK)	0,1496	4,88
6	MBK8(EK)	0,1714	5,59
7	MBK9(EK)	0,1932	6,30
8	MBK10(EK)	0,2150	7,01
9	MBK11(EK)	0,2369	7,72
10	MBK12(EK)	0,2587	8,44

3.1.10. Gniuždymo įtempiai atraminėje zonoje ir stiprumo sąlygos tikrinimas

Šiame poskyryje atliekami perdangos sijų atraminės zonos įtempių verčių skaičiavimai ir stiprumo sąlygų patikrinimai. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 11 lentelėje ir 32 pav.

Kad perdangos sijos laikomoji galia atraminėje dalyje gniuždant skersai medienos pluoštų būtų pakankama, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,edge,d}. \quad (3.21)$$

Skaičiuotinis gniuždymo stipris skersai pluošto:

$$f_{c,90,edge,d} = k_{mod} \frac{f_{c,90,edge,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{7,50}{1,20} = 5,00 \text{ MPa}. \quad (3.22)$$

Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovos konfiguraciją, skilimo galimybę ir gniuždomosios deformacijos laipsnį:

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l_{atr}}{250}\right) \left(1 + \frac{h_{MS}}{12 \cdot l_{atr}}\right) = \left(2,38 - \frac{0,15}{250}\right) \left(1 + \frac{0,30}{12 \cdot 0,15}\right) = 2,776 < 4. \quad (3.23)$$

Apskaičiuojami gniuždymo įtempiai atramos zonoje:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_{z,1}}{b_{MS} \cdot l_{atr}} = \frac{16,344 \cdot 10^{-3}}{0,075 \cdot 0,15} = 1,453 \text{ MPa}. \quad (3.24)$$

$$\sigma_{c,90,d} = 1,453 \text{ MPa} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,edge,d} = 2,776 \cdot 5,00 = 13,88 \text{ MPa}. \quad (3.25)$$

Perdangos sijos laikomoji galia atraminėje dalyje gniuždant skersai medienos pluoštų pakankama.

11 lentelė. Visų perdangų gniuždymo įtempiai

Eil. Nr.	Žymuo	$\sigma_{c,90,d}$, MPa	$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,edge,d}}$
1	MBK3(EK)	0,604	4,35
2	MBK4(EK)	0,817	5,88
3	MBK5(EK)	1,029	7,41
4	MBK6(EK)	1,241	8,94
5	MBK7(EK)	1,453	10,47
6	MBK8(EK)	1,665	11,99
7	MBK9(EK)	1,877	13,52
8	MBK10(EK)	2,089	15,05
9	MBK11(EK)	2,301	16,58
10	MBK12(EK)	2,513	18,11

3.1.11. Įlinkiai ir standumo sąlygos tikrinimas

Šiame poskyryje atliekami perdangos sijų įlinkių skaičiavimai ir standumo sąlygų patikrinimai. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 12 lentelėje ir 33 pav.

Apskaičiuojamas akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$u_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_k \cdot L_{sk}^4}{E_{0,mean} \cdot I_T} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,917 \cdot 10^3 \cdot 6,85^4}{14\,000 \cdot 10^6 \cdot 106287,45 \cdot 10^{-8}} = 0,00369 \text{ m.} \quad (3.26)$$

Akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių apkrovų $u_{inst,G} = 3,69$ mm.

Apskaičiuojamas akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo kintamųjų apkrovų:

$$u_{inst,Q1} = \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{k,1} \cdot L_{sk}^4}{E_{0,mean} \cdot I_T} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,680 \cdot 10^3 \cdot 6,85^4}{14\,000 \cdot 10^6 \cdot 106287,45 \cdot 10^{-8}} = 0,00324 \text{ m.} \quad (3.27)$$

Akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo kintamųjų apkrovų $u_{inst,Q1} = 3,24$ mm.

Apskaičiuojamas akimirkinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių ir kintamųjų apkrovų:

$$u_{inst} = u_{inst,G} + u_{inst,Q1} = 3,69 + 3,24 = 6,93 \text{ mm.} \quad (3.28)$$

Apskaičiuojamas galutinis perdangos sijos įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 3,69 \cdot (1 + 0,80) = 6,64 \text{ mm.} \quad (3.29)$$

Apskaičiuojamas galutinis perdangos sijos įlinkis nuo kintamųjų apkrovų:

$$u_{fin,Q1} = u_{inst,Q1} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) = 3,24 \cdot (1 + 0,3 \cdot 0,8) = 4,02 \text{ mm.} \quad (3.30)$$

Apskaičiuojamas galutinis perdangos sijos įlinkis:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} = 6,64 + 4,02 = 10,66 \text{ mm;} \quad (3.31)$$

čia $\psi_2 = 0,3$ – tariamai nuolatinio poveikio koeficientas; $k_{def} = 0,8$ – deformacijos koeficientas [52].

Medinių perdangos sijų ribinis akimirkinis įlinkis:

$$\omega_{inst,lim} = L_{sk}/400 = 2850/400 = 7,13 \text{ mm.} \quad (3.32)$$

Medinių perdangos sijų ribinis galutinis įlinkis:

$$\omega_{fin,lim} = L_{sk}/250 = 2850/250 = 11,40 \text{ mm.} \quad (3.33)$$

$$u_{inst} = 6,93 \text{ mm} < \omega_{inst,lim} = 7,13 \text{ mm.} \quad (3.34)$$

$$u_{fin} = 10,66 \text{ mm} < \omega_{fin,lim} = 11,40 \text{ mm.} \quad (3.35)$$

Apskaičiuoti perdangos sijos įlinkiai neviršija ribinių verčių. Konstrukcijos standumas pakankamas.

12 lentelė. Visų perdangų įlinkiai

Eil. Nr.	Žymuo	$u_{inst,G}$, mm	$u_{inst,Q}$, mm	u_{inst} , mm	$\frac{u_{inst}}{\omega_{inst,lim}}$, proc.	$u_{fin,G}$, mm	$u_{fin,Q}$, mm	u_{fin} , mm	$\frac{u_{fin}}{\omega_{fin,lim}}$, proc.
1	MBK3(EK)	0,11	0,10	0,21	2,91	0,20	0,12	0,32	2,66
2	MBK4(EK)	0,37	0,32	0,69	7,18	0,66	0,40	1,1	6,65
3	MBK5(EK)	0,93	0,81	1,74	14,36	1,67	1,01	2,7	13,39
4	MBK6(EK)	1,96	1,72	3,69	25,20	3,54	2,13	5,7	23,63
5	MBK7(EK)	3,69	3,24	6,93	40,46	6,65	4,01	10,7	38,07
6	MBK8(EK)	6,37	5,58	11,95	60,89	11,46	6,92	18,4	57,45
7	MBK9(EK)	10,29	9,02	19,30	87,25	18,52	11,18	29,7	82,50
8	MBK10(EK)	15,79	13,84	29,62	120,30	28,42	17,16	45,6	113,93
9	MBK11(EK)	23,24	20,37	43,61	160,78	41,84	25,26	67,1	152,49
10	MBK12(EK)	33,07	28,98	62,05	209,46	59,53	35,94	95,5	198,88

3.1.12. Perdangų savieji svyravimų dažniai ir atitikimo virpesių apribojimams tikrinimas

Šiame poskyryje atliekami perdangos savųjų svyravimų dažnių ir atitikimo virpesių apribojimams tikrinimas. Pateikiamas pavyzdys perdangai MBK7(EK). Kitų perdangų skaičiavimų rezultatai pateikti 13 lentelėje ir 34 pav.

Apskaičiuojamas pagrindinis perdangos konstrukcijos virpesių dažnis:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L_{sk}^2} \sqrt{\frac{(E_{0,mean} I_T) / s_{MS}}{m}} = \frac{3,14}{2 \cdot 6,85^2} \sqrt{\frac{(14\,000 \cdot 10^6 \cdot 106287,45 \cdot 10^{-8}) / 0,6}{270,63}} = 10,12 \text{ Hz.} \quad (3.36)$$

Perdangos masė tenkanti vienam kvadratiniam metrui ploto nuo savojo svorio ir visų nuolatinių poveikių:

$$m = \frac{b_{MS} \cdot h_{MS} \cdot \rho_{LVL}}{s_{MS}} + h_{BP} \cdot \rho_{betono} = \frac{0,075 \cdot 0,30 \cdot 550}{0,60} + 0,10 \cdot 2500 = 270,63 \text{ kg.} \quad (3.37)$$

Kai pagrindinis perdangos konstrukcijos virpesių dažnis didesnis už 8 Hz turi būti tenkinamos tokios sąlygos:

$$\begin{cases} \frac{\omega}{F} \leq a; \\ v \leq b(f_1 \zeta - 1). \end{cases} \quad (3.38)$$

Didžiausias akimirkinis vertikalusis įlinkis, kurį, priklausomai nuo apkrovos pasiskirstymo, sukelia vertikali sutelktoji statinė jėga F , veikianti bet kurioje grindų vietoje:

$$\omega = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot L_{sk}^3}{48 \cdot E_{0,mean} \cdot I_T} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 6,85^3}{48 \cdot 14\,000 \cdot 10^6 \cdot 106287,45 \cdot 10^{-8}} = 0,00045 \text{ m.} \quad (3.39)$$

Vienetinė impulsinė greičio reakcija v :

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 4,301)}{270,63 \cdot 8,70 \cdot 6,85 + 200} = 0,0007 \text{ m/(Ns}^2\text{)}. \quad (3.40)$$

$$v = 0,0007 < b^{(f_1 \zeta - 1)} = b^{(10,12 \cdot 0,01 - 1)} = 0,019 \quad (3.41)$$

Pirmosios eilės režimų su iki 40 Hz savuoju dažniu skaičius:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{B_{MBK}}{L_{sk}} \right)^4 \frac{(E_{0,mean} I_T) / S_{MS}}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{10,12} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{8,70}{6,85} \right)^4 \frac{106287,45 \cdot 10^{-8} / 0,6}{2,75 \cdot 10^6} \right\}^{0,25} = 4,301. \quad (3.42)$$

Perdangos lankstumas statmena sijų išdėstymui kryptimi:

$$(EI)_b = E_{cm} \cdot \left(\frac{1 \cdot h_{BP}^3}{12} \right) = 33 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,13^3}{12} \right) = 2,75 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m.} \quad (3.43)$$

EN 1995-1-1 pateikiamas rekomenduojamasis a ir b ribinių reikšmių intervalas ir tarpusavio sąryšis. Šiam tyrimui parenkamos vidutinių savybių reikšmės:

$$a = 2 \text{ mm/kN};$$

$$b = 80 \text{ mm/kN.}$$

$$\frac{\omega}{F} = \frac{0,032}{1} = 0,032 \text{ mm/kN} \leq a = 2 \text{ mm/kN.} \quad (3.44)$$

Grindų konstrukcijai keliama virpesių apribojimo sąlyga tenkinama.

13 lentelė. Visų perdangų pagrindiniai savieji svyravimų dažniai

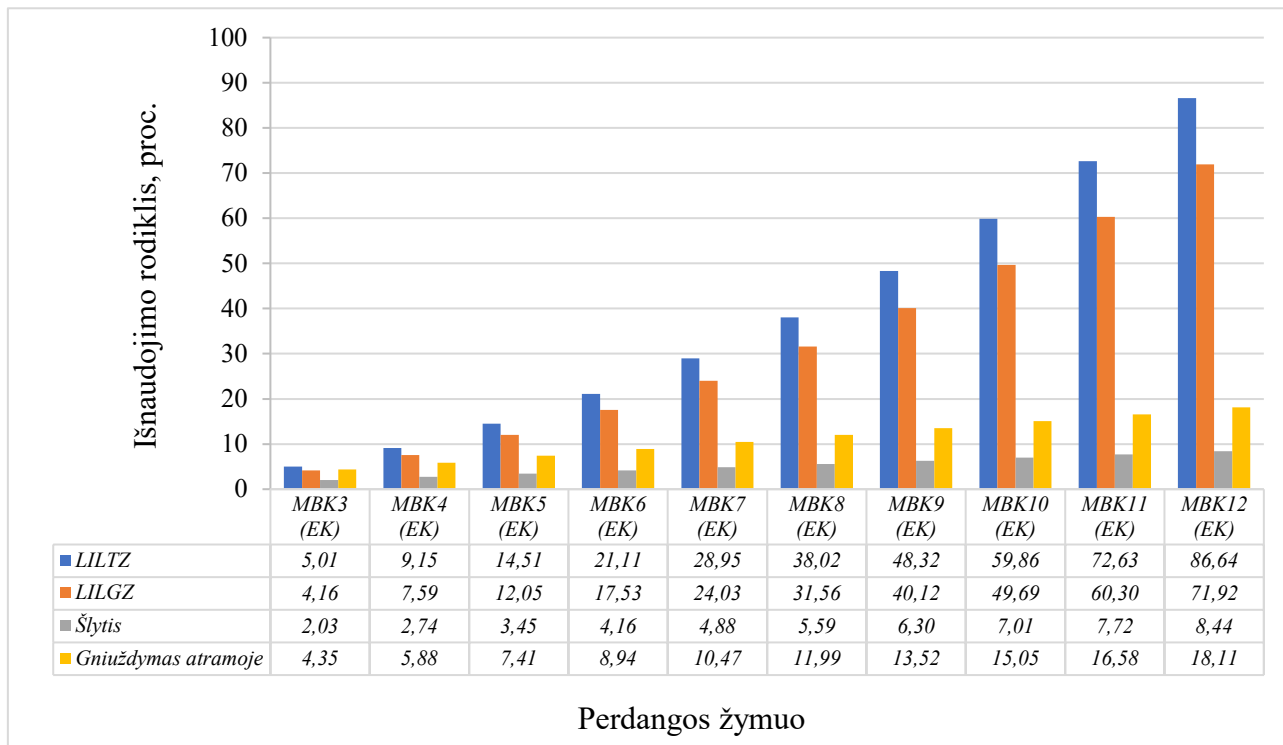
Eil. Nr.	Žymuo	f_1 , Hz	w , mm	$b^{(f_1 \zeta - 1)}$	v , m/(Ns ²)
1	MBK3(EK)	58,55	0,032	0,163	Nepaisoma
2	MBK4(EK)	32,08	0,080	0,051	0,0010
3	MBK5(EK)	20,22	0,160	0,030	0,0010
4	MBK6(EK)	13,90	0,280	0,023	0,0008
5	MBK7(EK)	10,14	0,450	0,019	0,0007
6	MBK8(EK)	7,72	0,677	0,018	0,0006
7	MBK9(EK)	6,07	0,970	0,016	0,0006
8	MBK10(EK)	4,90	1,338	0,015	0,0005
9	MBK11(EK)	4,04	1,788	0,015	0,0005
10	MBK12(EK)	3,39	2,329	0,014	0,0004

3.1.13. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimo, taikant analitinę skaičiavimo metodiką, rezultatai

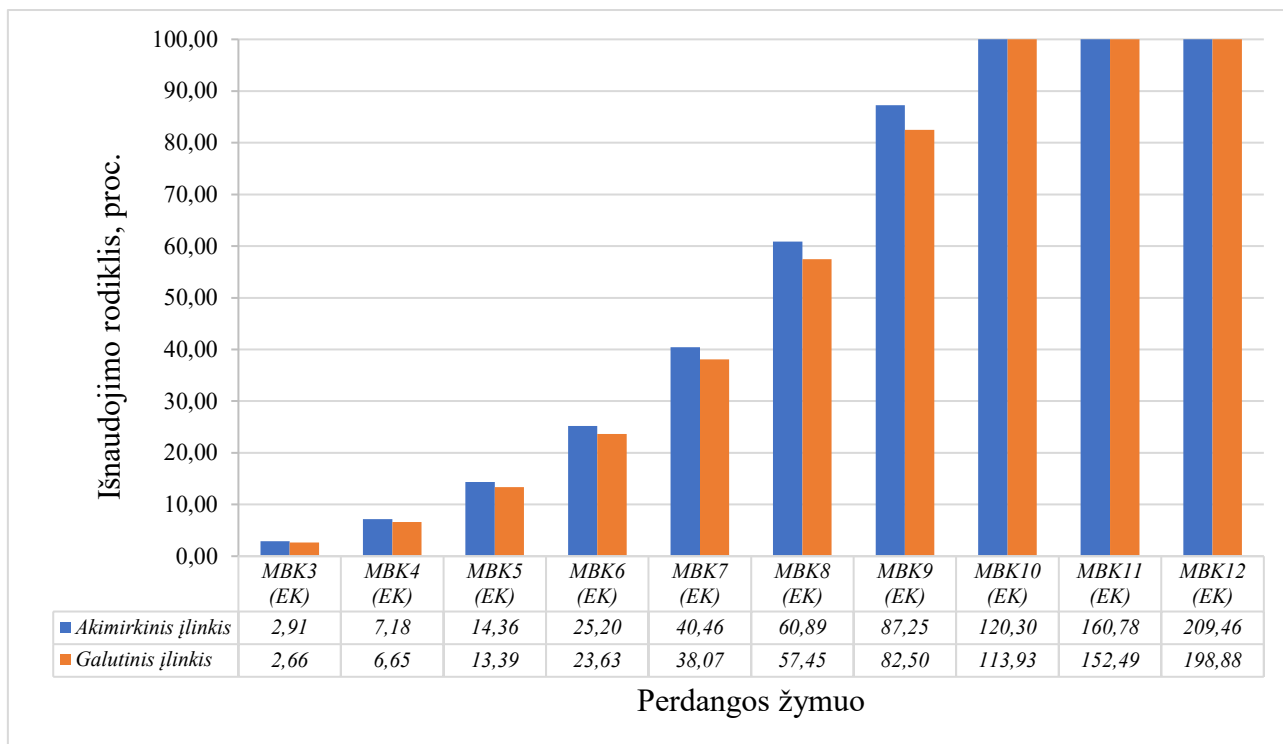
Analitinės skaičiavimo metodikos rezultatai rodo, kad tiriamos perdangos, patikrinus saugos ribinio būvio sąlygas, gali būti naudojamos iki 12 metrų trapatramiams. Tinkamumo ribinis būvis sumažina

perdangos ilgio pasirinkimo galimybę iki 9 metrų. Visgi lemiantis faktorius yra konstrukcijos pagrindinis svyravimų dažnis, kuris, norint eksploatuoti perdangas neatliekant papildomų tyrimų, turi būti ne mažesnis kaip 8 Hz [LST EN 1995-1-1]. Šis rodiklis nustato didžiausią leistiną 7 metrų tarpatramio ilgio perdangos konstrukciją.

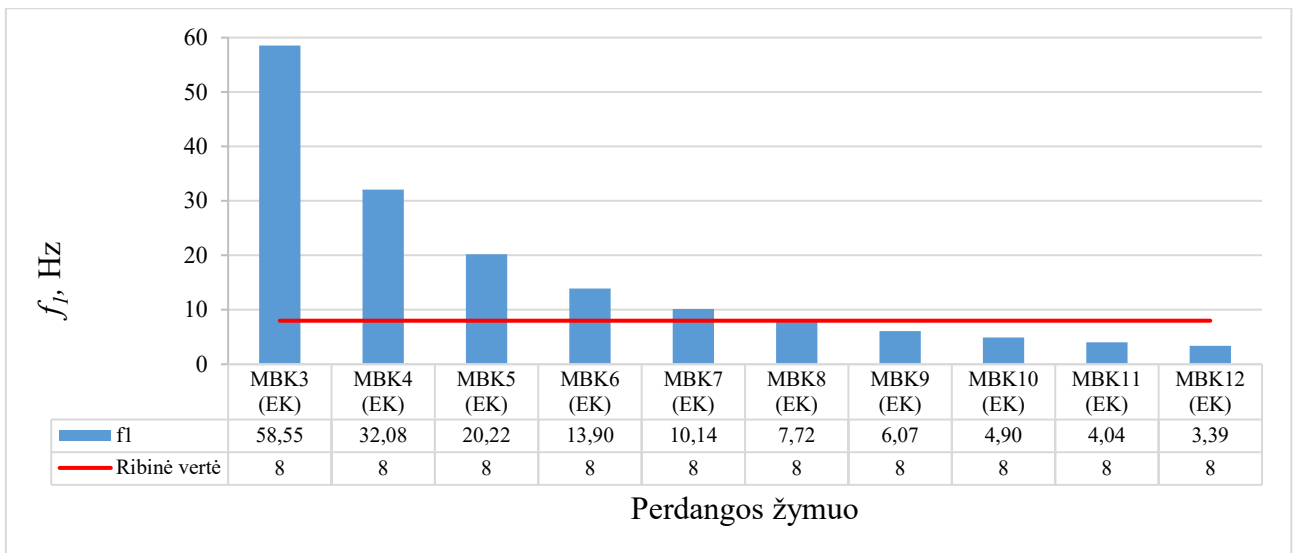
Toliau pateiktose diagramose pavaizduoti šios tyrimo dalies rezultatai (32 pav., 33 pav. ir 34 pav.).



32 pav. Saugos ribinio būvio išnaudojimo rodikliai (LILTZ – lenkimo įtempiai labiausiai tempiamoje zonoje; LILGZ – lenkimo įtempiai labiausiai gniuždomoje zonoje)



33 pav. Tinkamumo ribinio būvio išnaudojimo rodikliai.



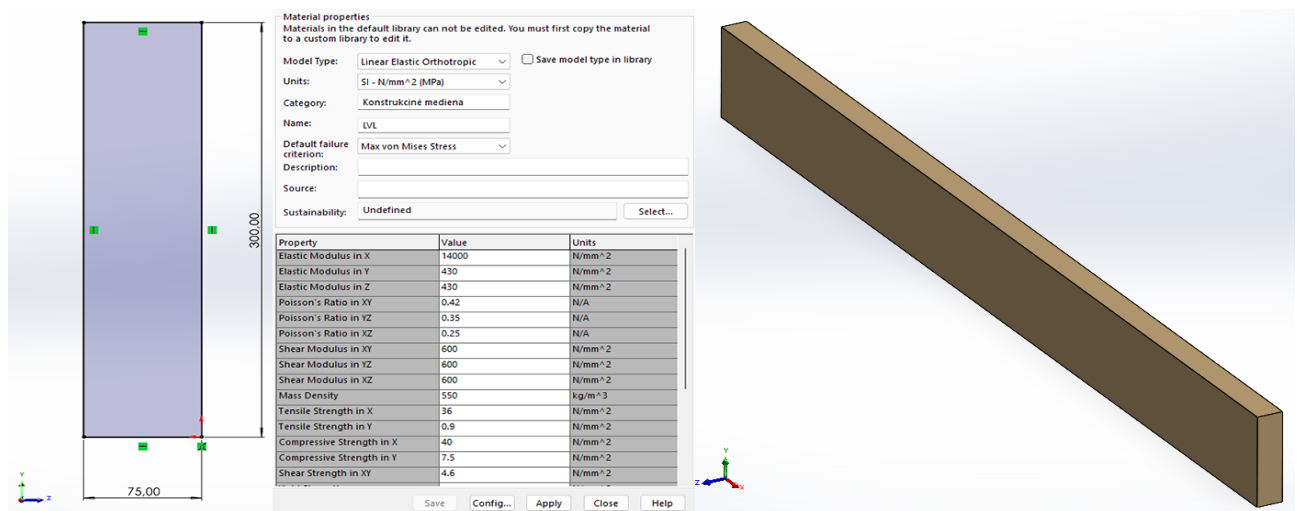
34 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (EK)

3.2. Kompozitinių perdangų iš medžio ir betono tyrimas taikant skaitinius inžinerijos metodus

Šioje dalyje perdangos plokščių laikomosios galios ir pirmojo savųjų svyravimų dažnio nustatymas atliekamas jas modeliuojant programiniu paketu „SolidWorks“. Įtempiai, įlinkiai ir pagrindinis konstrukcijos svyravimų dažnis apskaičiuojamas baigtinių elementų metodu. Nagrinėjamos 10-ties skirtingų ilgių (lygiaverčių analitinei daliai) perdangos, kiekvienai jų suteiktas unikalus žymuo, pavyzdžiui, MBK3(BEM). MBK – tai medžio ir betono kompozitas, skaičius žymi perdangos ilgį L , skliaustuose nurodoma, kuriuo metodu analizuojama perdanga ((BEM) – baigtinių elementų metodas). Perdangos erdvinis vaizdas pateiktas 28 pav. (žr. 42 psl.).

3.2.1. BEM perdangų modeliai

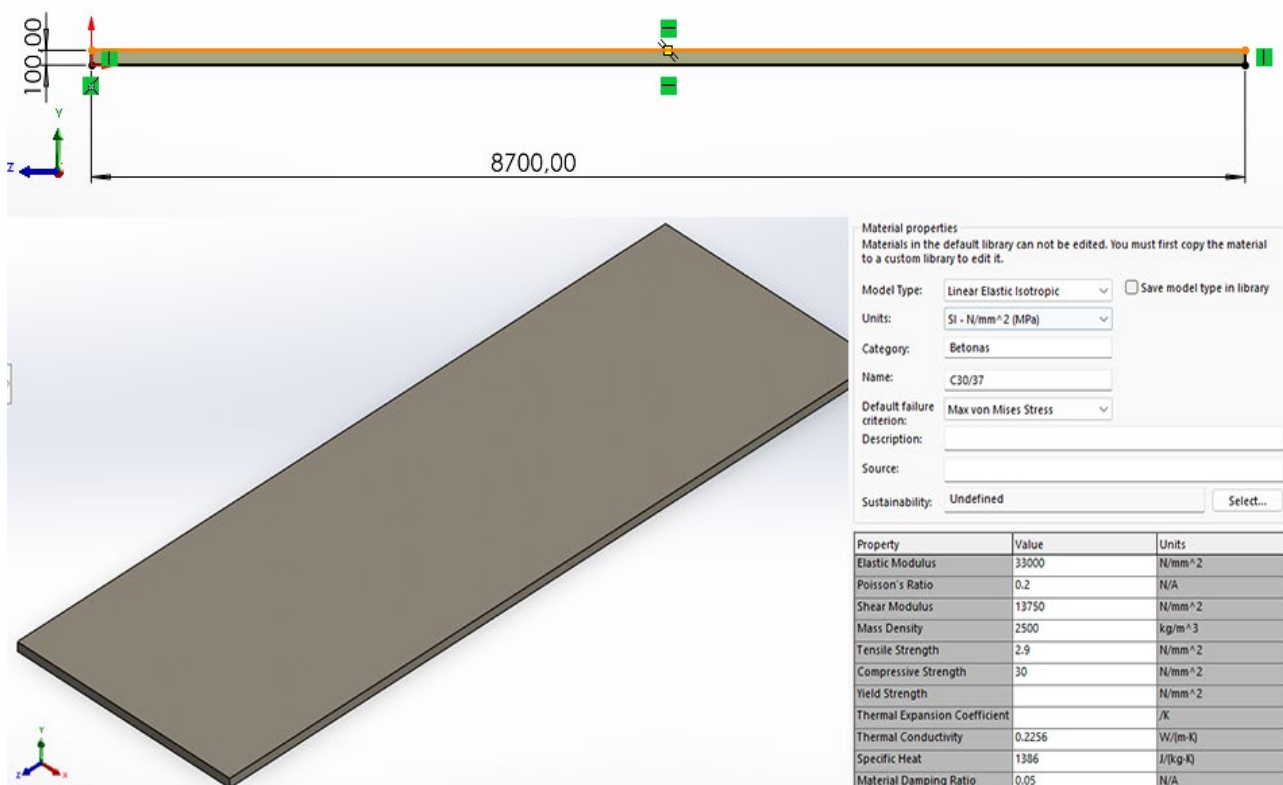
Programiniu paketu „SolidWorks“ sumodeliuojamos inžinerinės medienos LVL sijos (žr. 35 pav.) ir betoninės plokštės (žr. 36 pav.). Sistemoje, aprašant fizikines ir mechanines savybes, sukuriama medžiagos, atitinkančios analizuojamus elementus (žr. 14 ir 15 lenteles).



35 pav. LVL sijos modelis ir medžiagos aprašas sistemoje

14 lentelė. Inžinerinės medienos fizikinės ir mechaninės savybės įvestos į modeliavimo sistemą

Savybė	Mato vnt.	Vertė
Tamprumo modulis X ašies kryptimi	MPa	14 000
Tamprumo modulis Y ašies kryptimi	MPa	430
Tamprumo modulis Z ašies kryptimi	MPa	430
Puasono koeficientas XY ašių atžvilgiu	-	0,42
Puasono koeficientas YZ ašių atžvilgiu	-	0,35
Puasono koeficientas XZ ašių atžvilgiu	-	0,25
Medžiagos tankis	kg/m ³	550
Tempiamasis stipris X ašies atžvilgiu	MPa	36
Tempiamasis stipris Y ašies atžvilgiu	MPa	0,9
Gniuždymo stipris X ašies atžvilgiu	MPa	40
Gniuždymo stipris Y ašies atžvilgiu	MPa	7,5
Šlyties stipris	MPa	4,6
Medžiagos slopinimo koeficientas	-	0,01

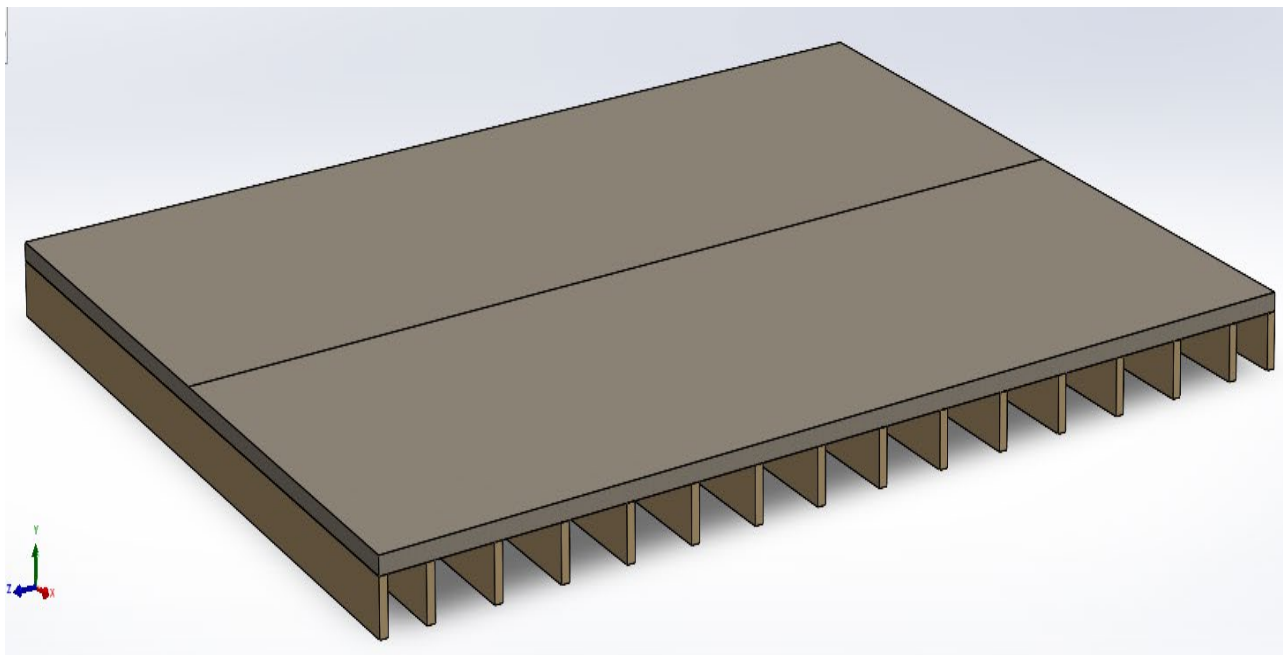


36 pav. Betoninės plokštės modelis ir medžiagos aprašas sistemoje

15 lentelė. Betono fizikinės ir mechaninės savybės įvestos į modeliavimo sistemą

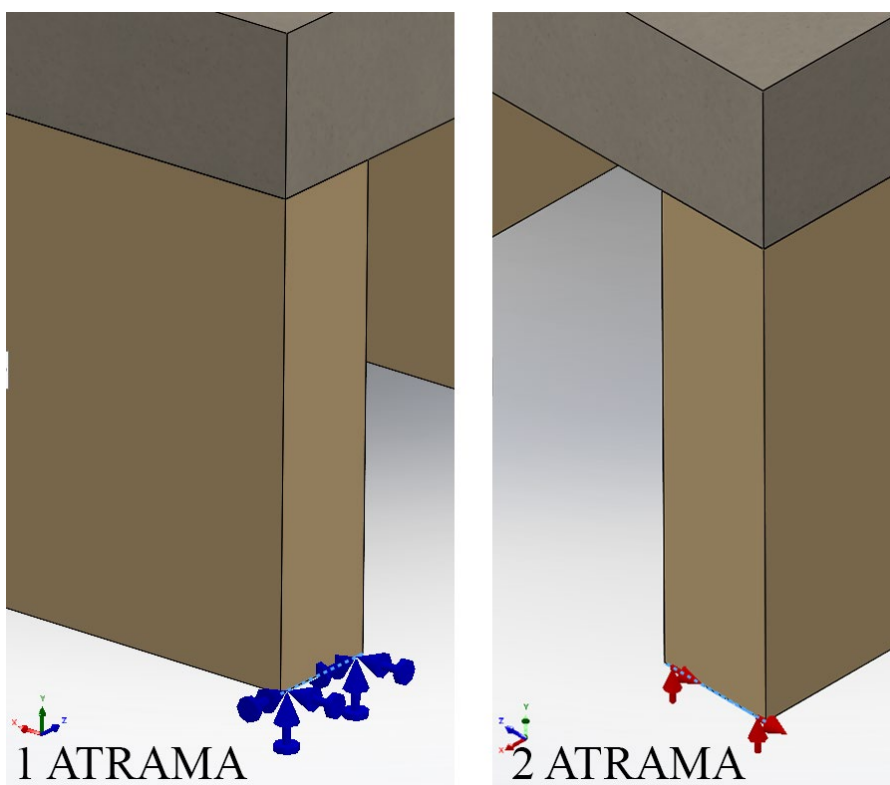
Savybė	Mato vnt.	Vertė
Standumo modulis	MPa	33 000
Puasono koeficientas	-	0,2
Šlyties modulis	MPa	13750
Medžiagos tankis	kg/m ³	2500
Tempiamasis stipris	MPa	2,9
Tempiamasis stipris	MPa	0,9
Gniuždymo stipris	MPa	30
Medžiagos slopinimo koeficientas	-	0,05

Sukurti elementai sujungiami į bendrą sistemą. Perdangų ilgiai (tarpatramiai) modelyje atitinka analitiniame metode apibrėžtus skaičiuojamuosius ilgius L_{sk} . Perdangos modelio vaizdas pateiktas 37 pav.



37 pav. Perdangos modelio vaizdas „SolidWorks“ aplinkoje.

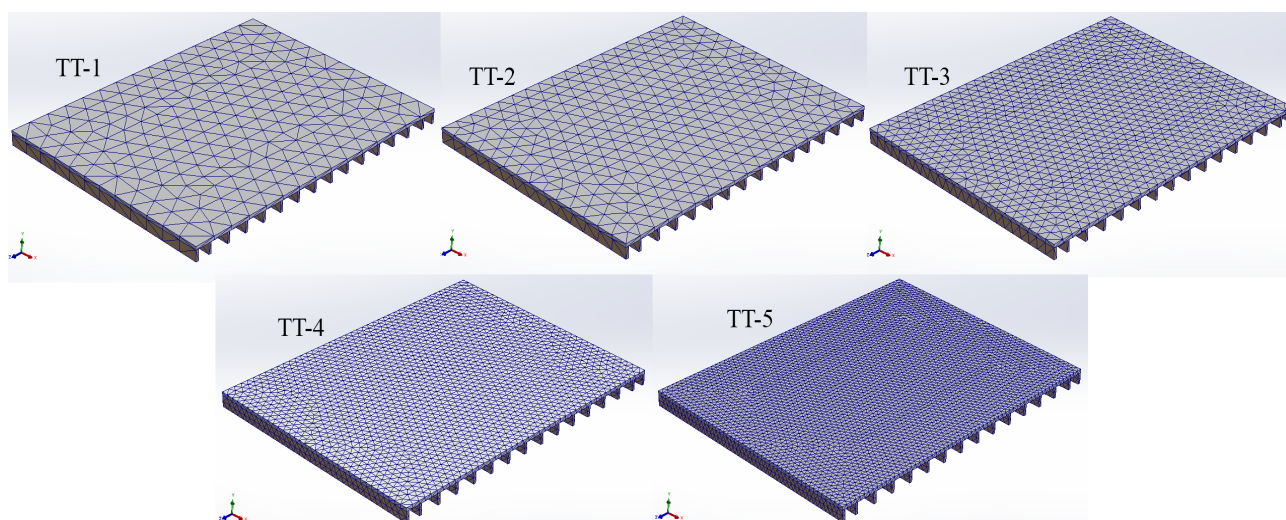
Perdangų sijų galuose priskiriami suvaržymai, imituojantys dvitramį įtvirtinimą: viename gale standus medinių sijų apatinių briaunų įtvirtinimas (38 pav., 1 atrama), kitame – medinių sijų apatinių briaunų poslinkių suvaržymas Y ir Z ašių kryptimis (38 pav., 2 atrama).



38 pav. Perdangos sijų įtvirtinimai

3.2.2. Baigtinių elementų tinklelio parinkimas

Modeliavimo programa leidžia pasirinkti kaip tiksliai bus skaičiuojama sistema. Kad pasirinktume į kiek baigtinių elementų bus sudalintas parengtas perdangos modelis, išbandome penkis sudalinimo variantus ir pagal apskaičiuotus elementų įtempių rezultatus parenkame optimalų sudalinimo elementų skaičių. Tinklelio parinkimas atliekamas pagal 7 metrų ilgio perdangos modelį, sudalinant į stambiausią (TT-1), vidutinį (TT-3), smulkiausią (TT-5) ir du tarpinius variantus (TT-2, TT-4). Rezultatai pateikti 16 lentelėje. Baigtiniais elementais (BE) sudalintų perdangos modelių vaizdas pateiktas 39 pav.



39 pav. Baigtiniais elementais sudalintų perdangos modelių vaizdas

16 lentelė. Įtempiai skerspjūvyje pagal skirtingus baigtinių elementų kiekius

Eil. Nr.	BE skaičius	BE mazgų skaičius	$\sigma_{1,max}$, MPa	$\sigma_{2,max}$, MPa
TT-1	3197	7351	6,098	3,912
TT-2	3464	8552	6,093	3,905
TT-3	8095	18253	6,120	3,891
TT-4	17253	38356	6,162	3,902
TT-5	29873	64892	6,169	3,903

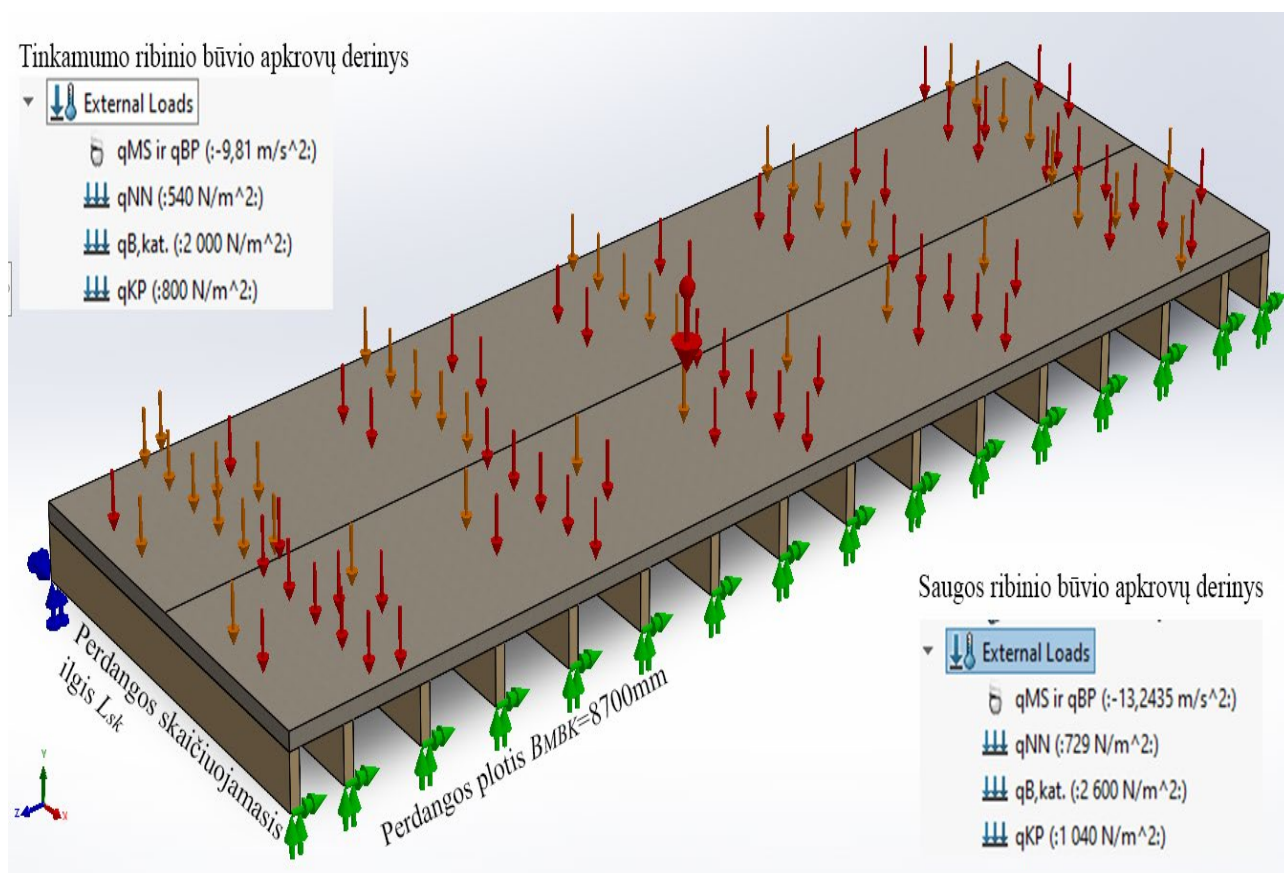
Matomas nedidelis skirtumas tarp pasirinkto baigtinių elementų kiekio. Įtempių vertės tarp smulkiausio ir stambiausio sudalinimo analizių skiriasi 1,16 proc. Tolimesniems skaičiavimams bus naudojamas TT-3 tankio (vidutinio tankio) tinklelis.

3.2.3. Apkrovos ir apkrovų deriniai

Konstrukcijos nuolatinės nekonstrukcinės (q_{NN}), B kategorijos grindų naudojimo ($q_{B,kat.}$) ir kilnojamųjų pertvarų (q_{KP}) apkrovos – lygiavertės įvertintoms analitiniame skaičiavime (žr. 3.1.3). LVL sijų ir betoninės plokštės svoris automatiškai įvertinamas programoje pagal duomenis suvestus kuriant medžiagų aprašus. Saugos ribinio būvio skaičiavimuose laisvojo kritimo pagreitis padaugintas iš nuolatinio poveikio dalinio koeficiento $\gamma_{G,j}$. Apkrovų deriniai tokie patys kaip 3.1.4 poskyryje.

3.2.4. Skaičiuojamieji perdangų modeliai

40 pav. pavaizduotas skaičiuojamasis perdangos modelis su sudarytais apkrovų deriniais. Tiriamų perdangų modelių žymenys ir skaičiuojamieji ilgai pateikti 17 lentelėje.



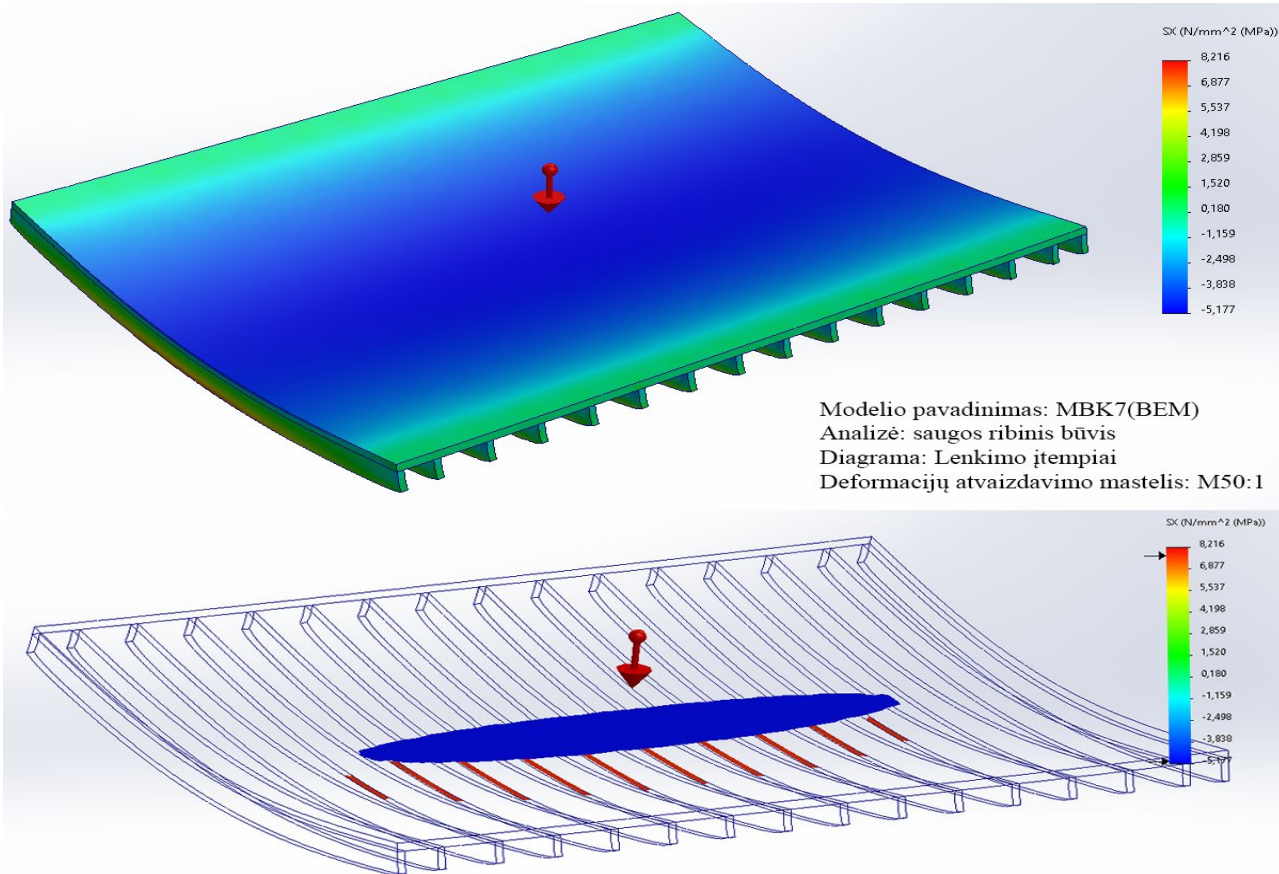
40 pav. Skaičiuojamasis perdangos modelis ir apkrovų deriniai

17 lentelė. Tiriamų perdangų modelių žymenys ir skaičiuojamieji ilgai

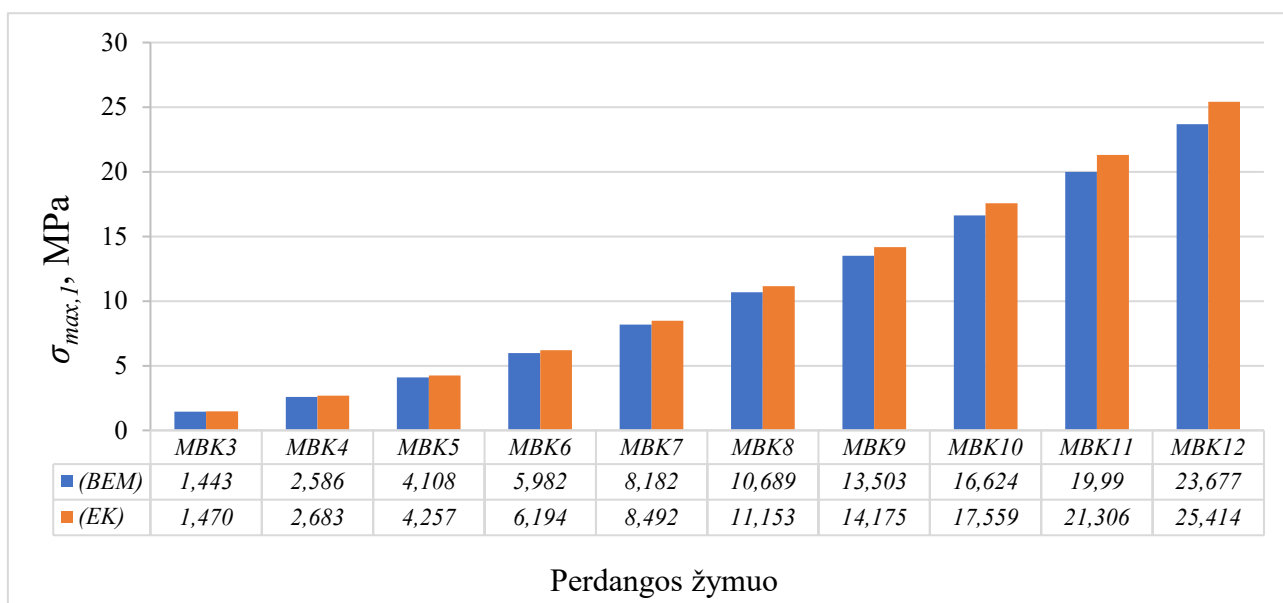
Eil. Nr.	Žymuo	Skaičiuojamasis ilgis L_{sk} , m
1	MBK3(BEM)	2,85
2	MBK4(BEM)	3,85
3	MBK5(BEM)	4,85
4	MBK6(BEM)	5,85
5	MBK7(BEM)	6,85
6	MBK8(BEM)	7,85
7	MBK9(BEM)	8,85
8	MBK10(BEM)	9,85
9	MBK11(BEM)	10,85
10	MBK12(BEM)	11,85

3.2.5. Lenkimo įtempių patikrinimas

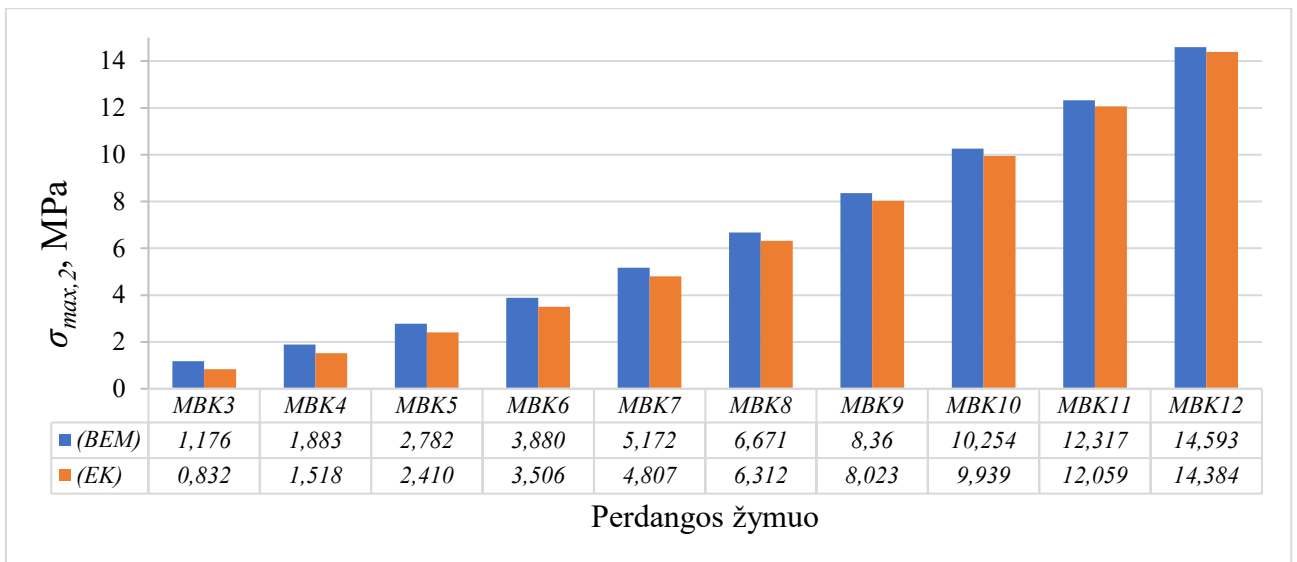
Siekiant patikrinti skaičiuojamojo modelio tikslumą, įvertinami programa apskaičiuoti lenkimo įtempiai susidarantys skerspjūvyje. Rezultatai palyginami su analitinio metodo rezultatais. Lenkimo įtempių verčių pasiskirstymas perdangoje MBK7(BEM) pavaizduotas 41 pav. Visų perdangų lenkimo įtempių rezultatai pateikti 42 pav. ir 43 pav.



41 pav. Lenkimo įtempių verčių pasiskirstymas perdangoje MBK7(BEM) (viršuje – pilnas pasiskirstymas, apačioje – kritinių zonų atvaizdavimas)



42 pav. Lenkimo įtempiai labiausiai tempiamoje skerspjūvio dalyje (EK) ir (BEM) atvejais

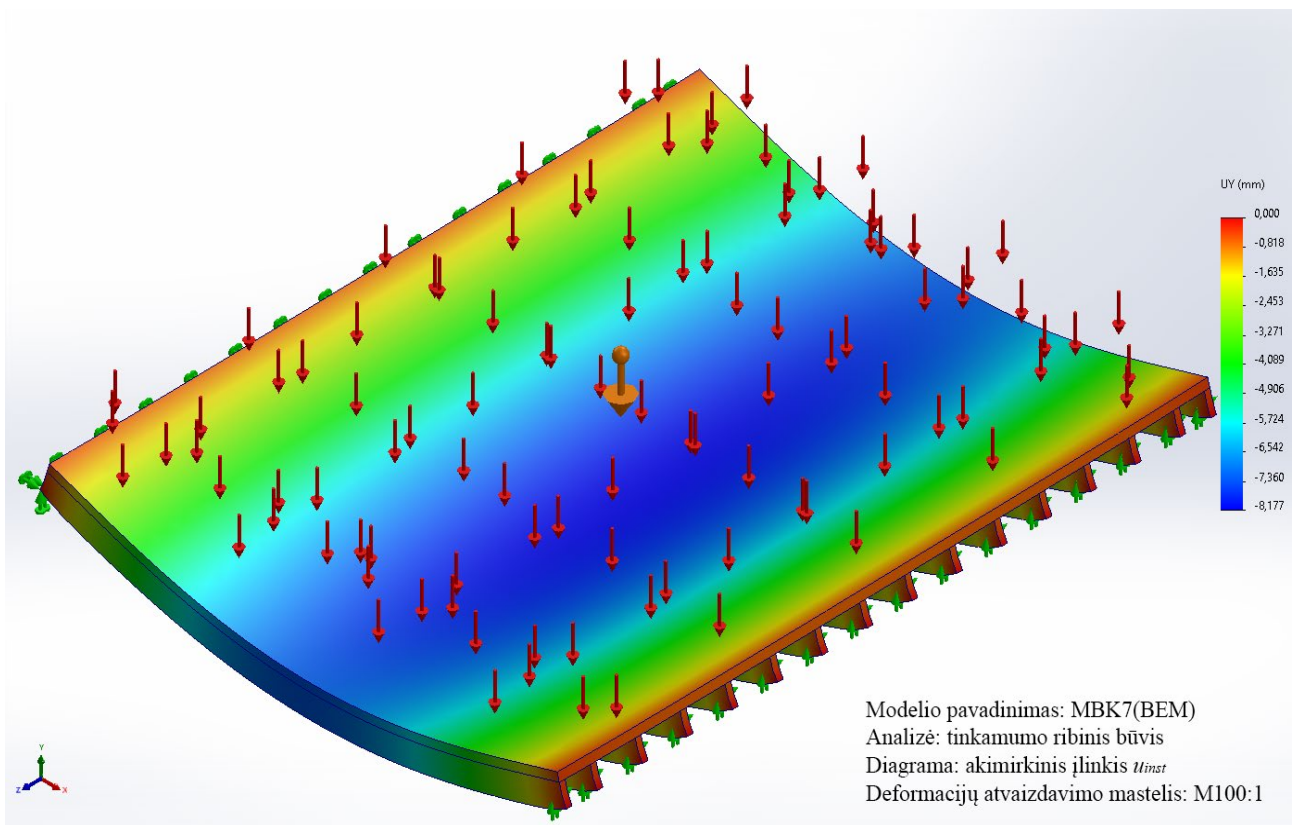


43 pav. Lenkimo įtempiai labiausiai gniuždomoje skerspjūvio dalyje (EK) ir (BEM) atvejais

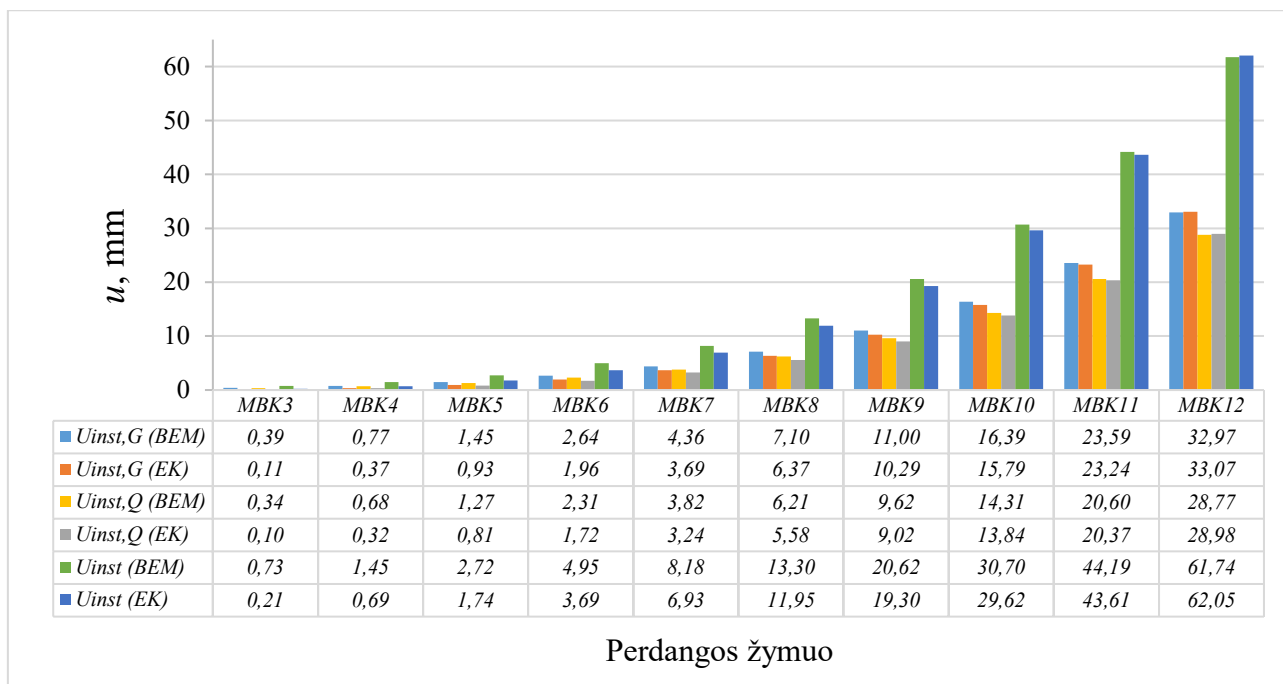
Lenkimo įtempiai apskaičiuoti skaitiniu metodu artimi rezultatams taikant analitinį metodą.

3.2.6. Akimirkinių įlinkių patikrinimas

Siekiant pasitikrinti skaičiuojamojo modelio tikslumą, įvertinami programa apskaičiuoti akimirkiniai perdangos konstrukcijos įlinkiai. Rezultatai palyginami su analitinio metodo rezultatais. Erdvinis įlinkių atvaizdavimas perdangai MBK7(BEM) pavaizduota 44 pav. Visų perdangų įlinkių rezultatai pateikti 45 pav.



44 pav. Akimirkinių perdangos konstrukcijos įlinkių erdvinė diagrama perdangai MBK7(BEM)

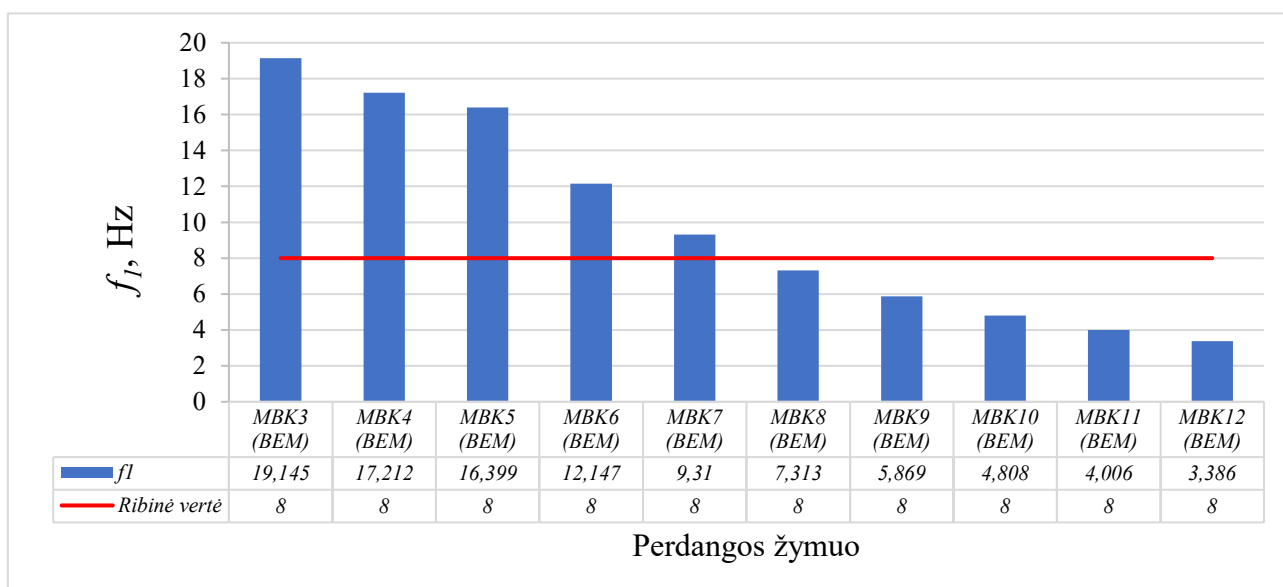


45 pav. Akimirkinis įlinkis (EK) ir (BEM) atvejais

Akimirkiniai įlinkiai apskaičiuoti skaitiniu metodu artimi rezultatams taikant analitinį metodą.

3.2.7. Pagrindinis perdangos konstrukcijos svyravimų dažnis nustatytas taikant skaitinius inžinerijos metodus

Pagrindinio konstrukcijos savųjų svyravimų dažnio skaičiavimo rezultatai (taikant skaitinius inžinerijos metodus programiniu paketu „SolidWorks“) pateikti 46 pav.

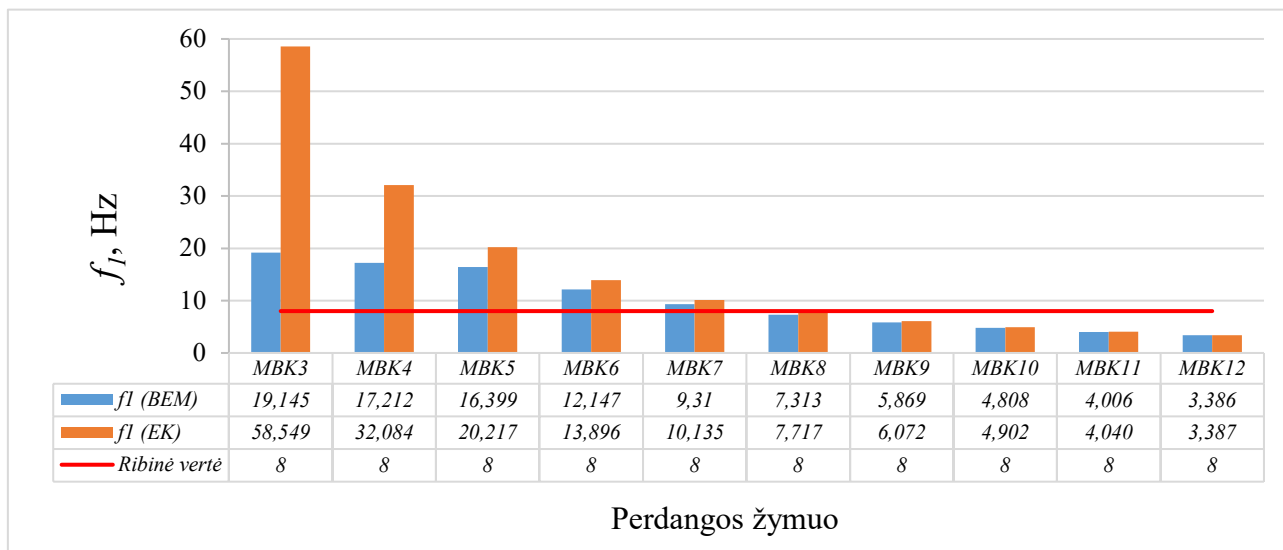


46 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (BEM)

Rezultatai, kaip ir analitinio skaičiavimo atveju, rodo maksimalų perdangos panaudojimą iki 7 metrų ilgio tarpatramyje, kad būtų tenkinamas ne mažesnis kaip 8 Hz pagrindinis konstrukcijos svyravimų dažnis [LST EN 1995-1-1].

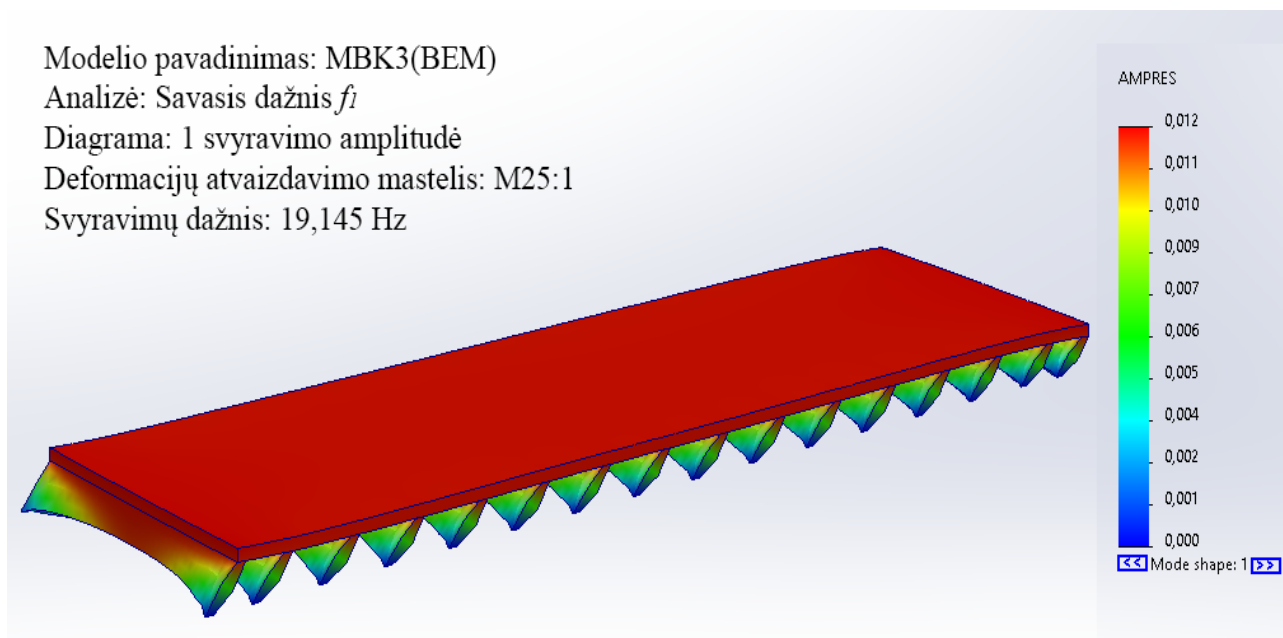
3.3. Skirtingų skaičiavimo metodikų rezultatų palyginimas

Dviem skirtingomis metodikomis atliktų skirtingų tarpatramių ilgių perdangų pagrindinių svyravimų dažnių skaičiavimo rezultatai pateikti 47 pav.



47 pav. Perdangų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai (EK) ir (BEM) atvejais

Savieji dažniai, apskaičiuoti analitiškai ir taikant BEM pastebimai pradeda skirtis prie mažesnių nei 6 m perdangos tarpatramių. Tai galima paaiškinti tuo, kad analitinis modelis skirtas aprašyti tik sijos išilginiams vertikaliems virpesiams. O skaičiuojant BEM, kai tarpatramiai yra mažesni už 6 m, 1-asis savasis dažnis tampa ne išilginių, o skersinių (statmenų išilginiams) virpesių, nes iš esmės pasikeičia perdangos standumų skirtingomis kryptimis santykiai (žr. 48 pav.).

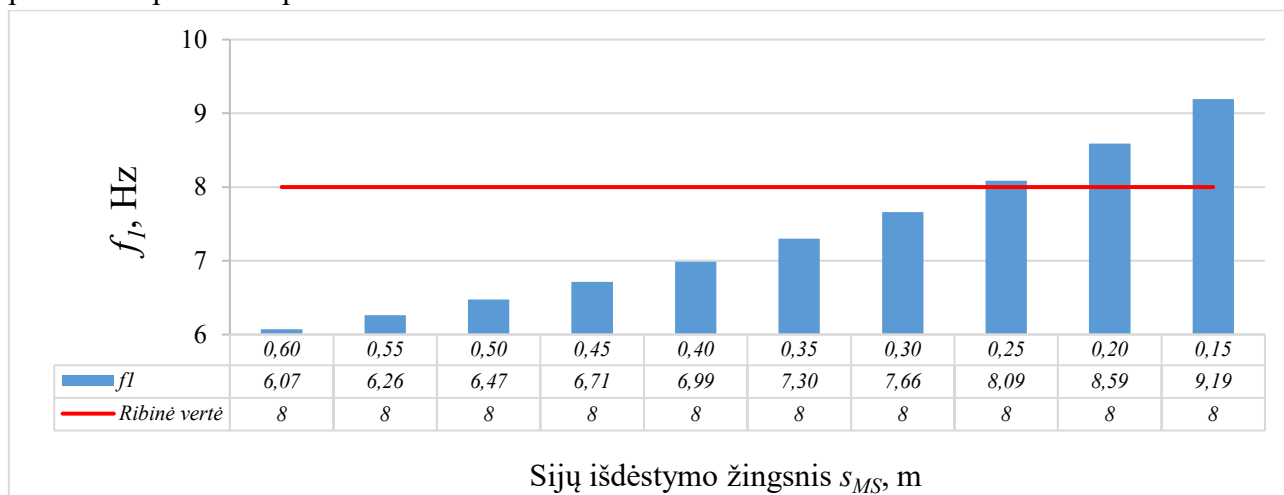


48 pav. MBK3(BEM) pagrindinis svyravimų dažnis. 1 svyravimo amplitudė

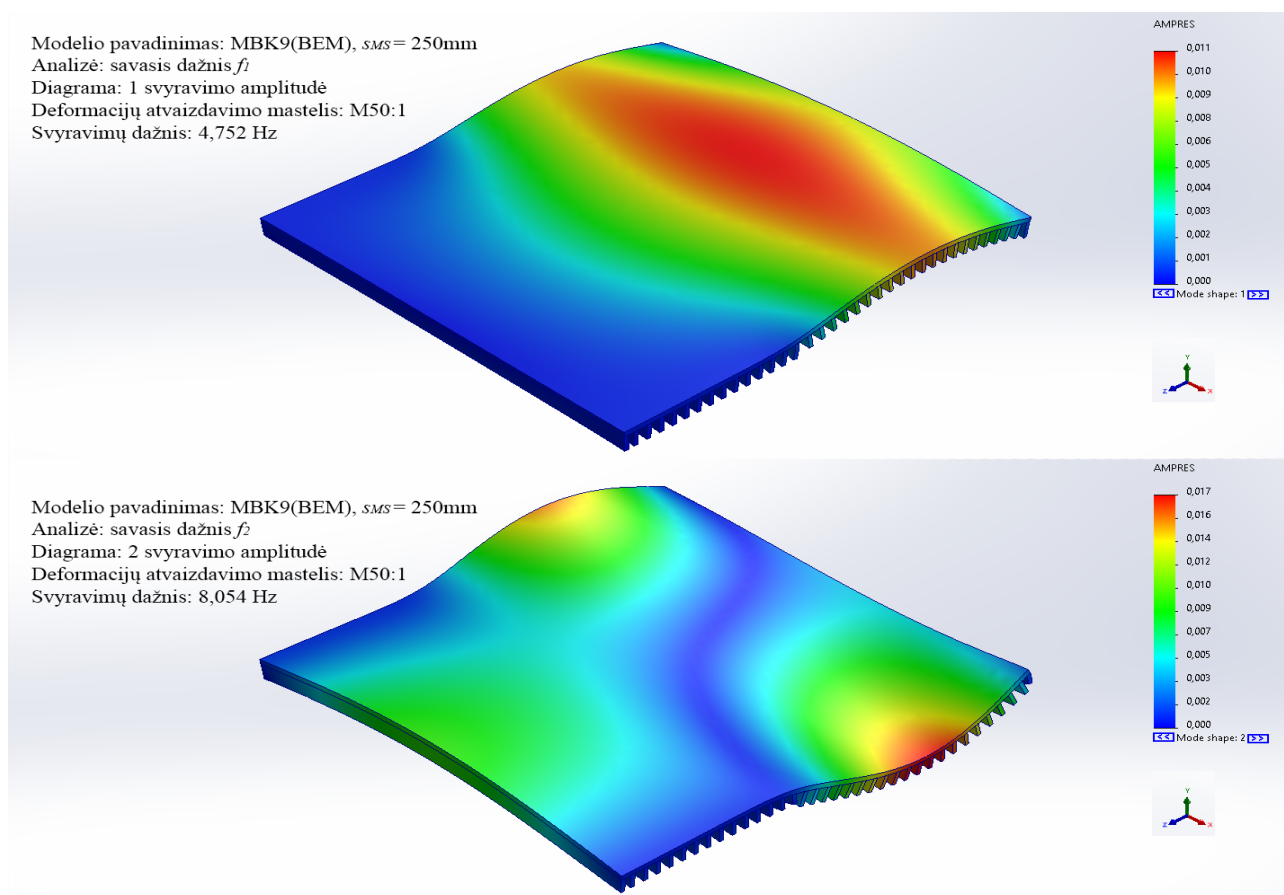
Tokiais atvejais reiktų imti ne 1-os modos (moda – savojo dažnio ir savosios formos derinys) dažnį, o tos modos, kurios savosios formos pavidalas atitinka analitinės savosios formos pavidalą.

3.4. Sijų išdėstymo žingsnio įtaka perdangų atsparumui virpesiams.

Pasirenkama 9 metrų tarpatramio ilgio perdanga, kuri (iš šiame darbe tiriamų perdangų) yra didžiausia galima pagal tinkamumo ribinio būvio sąlygą. Analizuojama, kokią įtaką turi sijų išdėstymo žingsnis, siekiant, kad konstrukcija tenkintų ir atsparumo virpesiams keliamus reikalavimus. Parenkamas sijų tankinimas kas 5 centimetrus mažėjančia seka ir apskaičiuojama, kokiam žingsniui esant tenkinamas 8 Hz pagrindinio dažnio apribojimo reikalavimas. Rezultatai pateikti 49 pav. ir 50 pav.



49 pav. Pagrindinio konstrukcijos svyravimų dažnio priklausomybė nuo sijų išdėstymo žingsnio 9 metrų tarpatramio ilgio perdangai MBK9(EK)



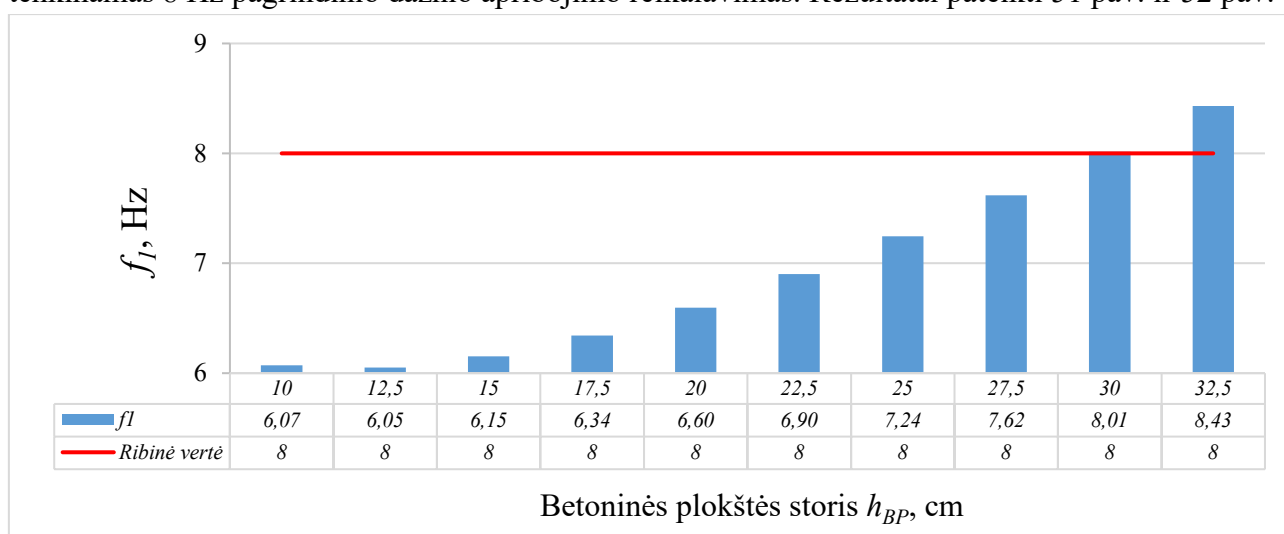
50 pav. MBK9(BEM) 1-asis (viršuje) ir 2-asis (apačioje) svyravimų dažniai, kai sijų žingsnis 250 mm

Atlikus patikrinimą baigtinių elementu metodu vėl pastebimas pagrindinio konstrukcijų dažnio susiformavimas statmena sijų išdėstymui kryptimi. Antrasis dažnis apskaičiuotas „SolidWorks“ (atitinkantis analitiniu metodu vertinamą modą) (žr. 50 pav.) nuo analitinio metodo rezultato skiriasi 0,44 proc.

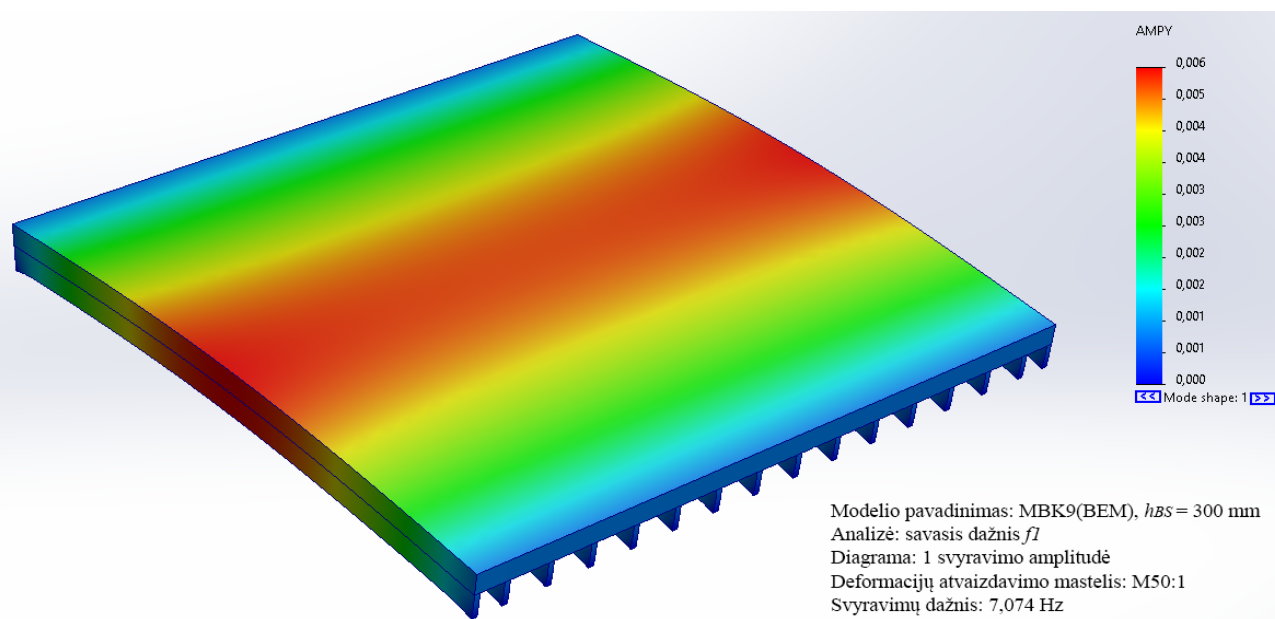
Sijų žingsnio tankinimas gerina konstrukcijos savųjų virpesių savybes. Nagrinėjamu atveju, nekeičiant konstrukcijos aukščio ir norint perdengti 9 metrų ilgio angas, sijų išdėstymas turėtų būti parinktas kas 25 centimetrus.

3.5. Betoninės plokštės storio bei svorio įtaka perdangų atsparumui virpesiams.

Kaip ir 3.4 poskyryje pasirenkama 9 metrų tarpatramio ilgio perdanga. Analizuojama, kokią įtaką turi betoninės plokštės storis, siekiant, kad konstrukcija tenkintų ir atsparumo virpesiams keliamus reikalavimus. Parenkamas h_{BP} didinamas kas 2,50 cm ir apskaičiuojama, kokiam storiui esant tenkinamas 8 Hz pagrindinio dažnio apribojimo reikalavimas. Rezultatai pateikti 51 pav. ir 52 pav.



51 pav. Pagrindinio perdangos konstrukcijos svyravimų dažnio priklausomybė nuo betoninės plokštės storio 9 metrų ilgio perdangos konstrukcijai



52 pav. MBK9(BEM) Svyravimų dažnis, kai plokštės storis 300 mm

Betoninės plokštės storinimas gerina konstrukcijos savųjų virpesių savybes. Nagrinėjamu atveju, norint perdengti 9 metrų ilgio angas, plokščių storis turėtų būti 30 centimetrų. Palyginti su 0 poskyrio rezultatais, sijų tankinimas yra geresnis sprendinys siekiant užtikrinti atsparumą virpesiams: tankinant sijų žingsnį nekeičiamas bendras konstrukcijos aukštis, taip pat konstrukcijos svorio padidėjimas storinant betoninę plokštę būtų 1731 proc. didesnis.

Baigtinių elementų metodu apskaičiuotas savasis konstrukcijos virpesių dažnis artimas (11,69 proc. skirtumu) analitinės metodikos rezultatui. Vertinant pagal BEM konstrukcija netenkina atsparumui virpesiams keliamų reikalavimų.

Išvados

1. Prieš atliekant atsparumo virpesiams tyrimą patikrintos perdangų stiprumo ir standumo sąlygos. Rezultatai parodė, kad duotose sąlygose perdangų laikomoji galia pakankama iki 12 metrų tarpatramio ilgio, įlinkio apribojimai leidžia perdengti iki 9 metrų. Visgi lemiantis faktorius yra konstrukcijos pagrindinis svyravimų dažnis, kuris, norint eksploatuoti perdangas neatliekant papildomų tyrimų, turi būti ne mažesnis kaip 8 Hz. Šis rodiklis nustato didžiausią leistiną 7 metrų tarpatramio ilgio perdangos konstrukciją.
2. Atlikus perdangų, pagamintų iš medžio ir betono, atsparumo virpesiams tyrimą dviem skaičiavimo metodikomis, rezultatai parodė, kad analitinis metodas gali turėti netikslumų nustatant nedidelio tarpatramio perdangų pagrindinį savųjų virpesių dažnį. Nuo 3 iki 5 metrų tarpatramio ilgio perdangose pastebimas didelis (iki 67,30 proc. skirtumu) rezultatų nesutapimas palyginti su baigtinių elementų metodo rezultatais. „SolidWorks“ rezultatai rodo, kad pagrindinės (1-os) konstrukcijos modos savoji forma deformuojasi statmena sijų išdėstymui kryptimi, kai analitinė Eurokodo metodika vertina tik išilginius virpesius.
3. Tankinant sijų žingsnį analitiniu metodu atliktų skaičiavimų rezultatai parodė gerėjančias atsparumo virpesiams savybes: mažinant atstumą tarp sijų savųjų svyravimų dažnio vertė nuosekliai didėja. Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu sutankintų sijų atveju vėl nustatytas pagrindinio svyravimų dažnio susiformavimas statmena sijų išdėstymui kryptimi ir didelį dažnio skirtumą nuo apskaičiuoto analitiniu metodu ($f_{1(BEM)} = 4,752$ Hz, $f_{1(EK)} = 8,09$ Hz). Antrasis dažnis apskaičiuotas „SolidWorks“ (atitinkantis analitiniu metodu vertinamą modą) nuo analitinio metodo rezultato skiriasi 0,44 proc. ($f_{2(BEM)} = 8,054$ Hz).
4. Didinant betoninės plokštės storį analitiniu metodu atliktų skaičiavimų rezultatai parodė gerėjančias atsparumo virpesiams savybes: storinant plokštę perdangos savųjų svyravimų dažnio vertė palaipsniui didėja. Svyravimų dažnis apskaičiuotas BEM ($f_{1(BEM)} = 7,074$ Hz) nedaug skiriasi nuo apskaičiuoto EK metodu ($f_{1(EK)} = 8,01$ Hz), tačiau skaitinio modeliavimo atveju tai reiškia nepakankamą konstrukcijos atsparumą virpesiams ir papildomų tyrimų būtinybę.

Literatūros sąrašas

1. *Timber: The past, present and future* [interaktyvus]. 2018-02-20 [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://internationaltimber.com/resources/timber-the-past-present-and-future/>.
2. *FAOSTAT-Forestry database* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>.
3. ZUBIZARRETAB, M. ir kt. Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study. *Environmental Impact Assessment Review* [interaktyvus]. 2019, 78, 106286 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0195-9255. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106286>.
4. OURWORLDINDATA.ORG. *Greenhouse gas emissions* [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-10-27]. Prieiga per: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.
5. BUSCH, P. ir kt. Literature review on policies to mitigate GHG emissions for cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. 2022, 182, 106278 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0921-3449. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106278>.
6. GORMAN, M. R., DZOMBAK, D. A., FRISCHMANN, C. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. 2022, 184, 106424 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0921-3449. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106424>.
7. LESZCZYSZYN, E. ir kt. The future of wood construction: Opportunities and barriers based on surveys in Europe and Chile. *Sustainability* [interaktyvus]. 2022, 14, 4358 [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/su14074358>.
8. *Sustainable forest management* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://www.fao.org/sustainable-forests-management/en/>.
9. SHONO, K., JONSSON, Ö. Global progress towards sustainable forest management: bright spots and challenges. *International Forestry Review* [interaktyvus]. 2022, 24(1), 85–97(13) [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1505/146554822835224856>.
10. BAZLI, M., HEITZMANN, M. ir ASHRAFI, H. Long-span timber flooring systems: A systematic review from structural performance and design considerations to constructability and sustainability aspects. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, 48, 103981 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103981>.
11. SIDDIKA, A. ir kt. Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis* [interaktyvus]. 2021, 130, 105766 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 1350-6307. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105766>.
12. MAI, K. Q. ir kt. Full-scale static and dynamic experiments of hybrid CLT – concrete composite floor. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 170, 55–65 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.042>.
13. DACKERMANN, U. ir kt. A dynamic-based method for the assessment of connection systems of timber composite structures. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2016, 102(2), 999–1008 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.009>.
14. NIE, Y. IR VALIPOUR, H.R. Experimental and analytical study of timber-timber composite (TTC) beams subjected to long-term loads. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2022, 342(B), 128079 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128079>.

15. ZHANG, L. ir kt. Experimental Investigation on the Structural Performance of Mass Timber Panel-Concrete Composite Floors with Notched Connections. *Journal of Structural Engineering* [interaktyvus]. 2022, 148(2) [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0003229>.
16. BUKA-VAIVADE, K. IR SERDJUKS, D. Behavior of timber-concrete composite with defects in adhesive connection. *Procedia Structural Integrity* [interaktyvus]. 2022, 37, 563–569 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 2452-3216. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.123>.
17. NAVARATNAM, S. ir kt. Development of cross laminated timber-cold-formed steel composite beam for floor system to sustainable modular building construction, *Structures* [interaktyvus]. 2021, 32, 681–690 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 2352-0124. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.051>.
18. LOSS, C. ir DAVISON, B. Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2017, 132, 695–713 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.062>.
19. LOSS, C. ir FRANGI, A. Experimental investigation on in-plane stiffness and strength of innovative steel-timber hybrid floor diaphragms. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2017, 138, 229–244 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.032>.
20. HIMES, A. ir BUSBY, G. Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment* [interaktyvus]. 2020, 4, 100030 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 2666-1659. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100030>.
21. BAADER, J. ir FONTANA, M. Active vibration control of lightweight floor systems. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. 2017, 199, 2772–2777 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 1877-7058. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.529>.
22. USSHER, E., ARJOMANDI, K. ir SMITH, I. Status of vibration serviceability design methods for lightweight timber floors. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, 50, 104111 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104111>.
23. XIE, Z. ir kt. Vibration behavior of timber-concrete composite floors under human-induced excitation. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2020, 32, 101744 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101744>.
24. CHINIFORUSH, A. A. ir kt. Vibration behaviour of steel-timber composite floors, part (1): Experimental & numerical investigation. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2019, 161, 244–257 [žiūrėta 2022-10-26]. ISSN 0143-974X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.07.007>.
25. *FOREST EUROPE*. Sustainable Forest Management [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-12-01]. Prieiga per: <https://foresteurope.org/workstreams/sustainable-forest-management/>
26. ANDERSEN, J. H., RASMUSSEN, N. L., RYBERG, M. W., Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2022, 254, 111604 [žiūrėta 2022-12-01]. ISSN 0378-7788. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111604>.
27. HAMMAD, M. W. ir kt. Timber-timber composite (TTC) beams subjected to hogging moment. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2022, 321, 126295 [žiūrėta 2022-12-01]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126295>.

28. NIE, Y., VALIPOUR, H. R., Experimental and numerical study of long-term behaviour of timber-timber composite (TTC) connections. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2021, 304, 124672 [žiūrėta 2022-12-01]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124672>.
29. SUÁREZ-RIESTRA, F. ir kt. Timber-Timber-Composite (TTC) beam long-term behaviour. Full scale experimental campaign and simplified analytical model. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2022, 361, 129649 [žiūrėta 2022-12-01]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129649>.
30. SHAHNEWAZ, M., JACKSON, R., TANNERT, T. CLT concrete composite floors with steel kerf plate connectors. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2022, 319, 126092 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126092>.
31. BAO, Y. ir kt. Structural performance of cross-laminated timber-concrete composite floors with inclined self-tapping screws bearing unidirectional tension-shear loads. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, 55, 104653 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104653>.
32. TAO, H. ir kt. Effective width of timber-concrete composite beams with crossed inclined coach screw connections at the serviceability state. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2022, 267, 114716 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114716>.
33. TAAZOUNT, M., AMZIANE, S., MOLARD, D. Tangential behavior of nailed composite timber-concrete floor structures. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2013, 40, 506–513 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.092>.
34. OU, Y., FERNANDO, D. ir GATTAS, J. M. Experimental investigation of a novel concrete-timber floor panel system with digitally fabricated FRP-timber hollow core component. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 227, 116667 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.048>.
35. HASSANIEH, A., VALIPOUR, H. R. ir BRADFORD, M. A. Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2016, 122, 367–378 [žiūrėta 2022-12-02]. ISSN 0143-974X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.005>.
36. CHINIFORUSH, A. A. ir kt. Experimental and theoretical investigation of long-term performance of steel-timber composite beams. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2021, 249, 113314 [žiūrėta 2022-12-03]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113314>.
37. ATAEI, A. ir kt. Behaviour of embedded bolted shear connectors in steel-timber composite beams subjected to cyclic loading. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, 54, 104581 [žiūrėta 2022-12-03]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104581>.
38. CHINIFORUSH, A. A. ir kt. Long-term behaviour of steel-timber composite (STC) shear connections. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2019, 196, 109356 [žiūrėta 2022-12-04]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109356>.

39. ZHANG, B. ir kt. Comparison of vibrational comfort assessment criteria for design of timber floors among the European countries. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2013, 52, 592–607 [žiūrėta 2022-12-04]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.028>.
40. SUÁREZ-RIESTRA, F. ir kt. Experimental, analytical and numerical vibration analysis of long-span timber-timber composite floors in self-tensioning and non-tensioning configurations. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 218, 341–350 [žiūrėta 2022-12-04]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.084>.
41. AZADI, M., ir kt. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience* [interaktyvus]. 2020, 13, 100–104 [žiūrėta 2022-10-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>.
42. YANG, Y. ir kt. Flexural behavior of web embedded steel-concrete composite beam. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2021, 240, 112345 [žiūrėta 2023-10-15]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112345>.
43. Li, Y. ir kt. Experimental and theoretical study on mechanical properties of steel–concrete double-sided composite cantilever beams. *Structures* [interaktyvus]. 2021, 30, 100–114 [žiūrėta 2023-10-15]. ISSN 2352-0124. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.074>.
44. NIE, J. G. ir kt. Experimental and theoretical study of steel–concrete composite beams with openings in concrete flange. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2006, 28, 7, 992–1000 [žiūrėta 2023-10-15]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.11.004>.
45. FANG, H. ir kt. Experimental and theoretical study of sandwich panels with steel facesheets and GFRP core. *Advances in Materials Science and Engineering* [interaktyvus]. 2016, 7159205 [žiūrėta 2023-10-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2016/7159205>.
46. TIMBOLMAS, C. ir kt. Transformed-section method applied to multispecies glulam timber beams subjected to pure bending. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* [interaktyvus]. 2022, 29:27, 6814–6823 [žiūrėta 2023-08-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1985665>.
47. BAKALARZ, M. M. IR KOSSAKOWSKI, P. G. Application of transformed cross-section method for analytical analysis of laminated veneer lumber beams strengthened with composite materials. *Fibers* [interaktyvus]. 2023, 11, 24 [žiūrėta 2023-10-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/fib11030024>.
48. SHI, B ir kiti. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, 204, 109901 [žiūrėta 2023-10-15]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109901>.
49. LST EN 1990. *Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
50. LST EN 1991-1-1. *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-1 dalis. Bendrieji poveikiai. Tankiai, savasis svoris, pastatų naudojimo apkrovos*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
51. LST EN 1992-1-1. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

52. LST EN 1995-1-1. *Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios nuostatos. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
53. Steico.com. *Declaration of performance no. 03-0008-03* [interaktyvus]. 2018-11-08 [žiūrėta 2023-07-23]. Prieiga per:
https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b609775e65ec0177d608769c2bda/STEICO_LVL_R_DoP_EN14374_03-0008.pdf