



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Kompozitinių plieno-medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Paulius Orintas

Projekto autorius

Doc. prakt. Tadas Zingaila

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Kompozitinių plieno-medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Paulius Orintas

Projekto autorius

Doc. prakt. Tadas Zingaila

Vadovas

Doc. Rėda Bistrickaitė

Recenzentė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Paulius Orintas

Kompozitinių plieno-medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimai

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.

Paulius Orintas

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis**

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Tvarių pastatų laikančiųjų konstrukcijų analizė	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Kompozitinių plieno – medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimai	
(anglų k.): Analysis of Strength and Stiffness of Composite Steel-Timber Floor Structures	
Pradiniai duomenys darbui:	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☐	Eksperimentiniai tyrimai
☒	Analitiniai tyrimai
☒	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☐	Leidžiama
☒	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	
Ketvirtadienis, 17:30	

Vadovas:	Doc. prakt. Tadas Zingaila
(indėlis100%)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Paulius Orintas
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Orintas, Paulius. Kompozitinių plieno-medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. prakt. Tadas Zingaila; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: CLT, kompozitas, Eurokodas 4, STC sijos, galvelinės jungės, šlyjamoji jungtis.

Kaunas, 2026. 63 p.

Santrauka

Medinių konstrukcijų (CLT) ir plieninių sijų kompozitinių konstrukcijų panaudojimas šių dienų statyboje vis populiarėja, tačiau elementų tarpusavio jungimo būdai, skaičiavimo metodikos nėra pakankamai išnagrinėti, o šlyjamųjų jungčių įtaka kompozitinių perdangų stiprumui ir standumui nėra išsamiai įvertinta.

Baigiamajame magistro projekte analizuojama medienos (CLT) ir plieninių sijų kompozitinė konstrukcija. Atlikta šlyjamųjų jungčių literatūros analizė, kurioje išanalizuotos skirtingų jungčių ypatybės ir tipai. Remiantis mokslinėmis publikacijomis, atliktas analitinis tyrimas, kuriame buvo vertinamos galiojančių standartų ir mokslininkų pateikiamos laikomosios galios skaičiavimo metodikos, analizuojamas metodikų tikslumas ir patikimumas. Apskaičiuota jungčių laikomoji galia palyginta su eksperimentinių tyrimų rezultatais ir nustatyta, kuri metodika pateikia tiksliausius rezultatus. Siekiant įvertinti šlyjamųjų jungčių poveikį medžio ir plieno kompozitinių perdangų konstrukciniam elgesiui, buvo suprojektuotos trys kompozitinės sijos su skirtingu šlyjamųjų jungčių standumu. Jungčių standumo poveikis kompozitinės perdangos stiprumui ir standumui įvertintas naudojant inžinerinę baigtinių elementų skaičiavimo programą DLUBAL RFEM 5.

Darbo apimtis – 63 p. teksto be priedų, 62 iliustr., 9 lent., 40 bibliografinių šaltinių.

Orintas, Paulius. Analysis of Strength and Stiffness of Composite Steel-Timber Floor Structures. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Pract. Tadas Zingaila. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: CLT, composite, Eurocode 4, STC beams, headed studs, shear connection.

Kaunas, 2026. 63 p.

Summary

The use of composite structures of timber (CLT) and steel beams in modern construction is becoming increasingly popular, but the methods of connecting elements and calculation methodologies have not been sufficiently investigated, and the influence of shear connections on the strength and stiffness of composite floors has not been fully evaluated.

The final master's project analyses the composite structure of timber (CLT) and steel beams. A literature analysis of shear connectors was performed, in which the characteristics and types of different joints were analysed. Based on scientific publications, an analytical study was conducted to evaluate the accuracy and reliability of the load – bearing capacity calculation methods presented in current standards and by scientist. The calculated bearing capacity of the connections was compared with the results of experimental studies, and it was determined which methodology provides the most accurate results. In order to evaluate the effect of shear connectors on the structural behaviour of timber and steel composite floors, three composite beams with different stiffness of shear connectors were designed. The effect of connection stiffness on the strength and stiffness of the composite floor was evaluated using the engineering finite element calculation software DLUBAL RFEM 5.

Thesis is comprised of 63 p. of text without appendixes, 62 pictures, 9 tables, 40 bibliographical entries.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga ir analizė.....	13
1.1. Medžiagų savybės	13
1.1.1. Klijuotos medienos plokštės CLT	13
1.1.2. Konstrukcinis plienas	13
1.1.3. Betono skiedinys varžtų užbetonavimui.....	14
1.2. Kompozitinė konstrukcija	14
1.3. Šlyjamosios jungties tipai.....	16
1.3.1. Išstūmimo bandymas	16
1.3.2. Sraigtnių varžtų sujungimai.....	19
1.3.3. Varžtinės jungtys	21
1.3.4. Galvelinės jungės.....	24
1.4. Šlyjamųjų jungčių skaičiavimas pagal standartus	27
1.4.1. Šlyjamųjų varžtinių jungčių skaičiavimas pagal Eurokodas 5.....	27
1.4.2. Galvelinių jungių ir užbetonuojamų varžtų skaičiavimas pagal Eurokodas 4.....	28
1.4.3. Galvelinių jungių ir užbetonuojamų varžtų skaičiavimas pagal AISC 360-16.....	29
1.4.4. Šlyjamosios jungties skaičiavimų palyginimas	29
1.5. Literatūros analizės apibendrinimas	33
2. Tyrimų metodika	34
2.1. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal Eurokodas 4	34
2.2. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal 2027 metų Eurokodas 4	36
2.3. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal AISC 360-16.....	38
2.4. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal GB50017-2017 standartą.....	39
2.5. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal E. Zhao'o ir kt., skaičiavimo metodiką 40	
2.6. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal Ding'ą ir kt., skaičiavimo metodiką ..	42
2.7. Šlyjamosios jungties laikomosios galios skaičiavimų metodikos palyginimas	44
2.8. Kompozitinės perdangos modeliavimo principai	46
2.8.1. Skaičiuojamojo modelio validacija	49
2.9. Kompozitinės perdangos atskirų elementų analizė	52
2.9.1. CLT plokštės projektavimas.....	52
2.9.2. Plieninės sijos projektavimas	54
2.9.3. Kompozitinės perdangos analizė	55
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu [17].....	35
2 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis E. Zhao'o ir kt., siūloma skaičiavimo metodika [17]..	41
3 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis Ding'o ir kt., siūloma skaičiavimo metodika [39]	43
4 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimo rezultatų palyginimui pasirinktų bandinių parametrai.	44
5 lentelė. Eksperimentinių bandymų ir baigtinių elementų skaičiavimo rezultatų palyginimui pasirinktų bandinių parametrai [11].	51
6 lentelė. CLT plokštės skaičiavimo duomenys.....	53
7 lentelė. Plieninės sijos skaičiavimo duomenys	54
8 lentelė. Kompozitinės sijos skaičiavimo prielaidos	56
9 lentelė. Kompozitinių sijų projektavimo rezultatų suvestinė.....	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kryžmai klijuotos medienos plokštės (CLT)[1].....	13
2 pav. H profilio sija[4].....	13
3 pav. Sraigtinis varžtas [11].....	14
4 pav. Užbetonuojama varžtinė jungtis CLT plokštėje[3]	14
5 pav. Kompozitinės sijos elgsena: a) ne kompozitinė elgsena; b) kompozitinė elgsena[12]	15
6 pav. Deformacijų pasiskirstymas: a) nėra kompozitinės sąveikos; b) dalinė sąveika; c) pilna sąveika [12];	16
7 pav. Kryžmai klijuotos medienos ir plieno sijų jungčių tipai: a) galvelinė užbetonuojama jungtis [13]; b) varžtinė užbetonuojama jungtis [14]; c) varžtinė dalinai užbetonuojama jungtis [15];	16
8 pav. Išstūmimo bandymo principas: a) Bandinio paruošimas; b) bandymo atlikimas [17].....	17
9 pav. Apkrovimo procedūra pagal EN 26891 [11, 16].....	17
10 pav. Jungties standumo įtaka vidurio tarpatramio perdangos įlinkiui [11].....	18
11 pav. Jungties standumo įtaka ties sijos galu elementų praslydimui vienas kito atžvilgiu[11].....	19
12 pav. Varžtų suirimo būdai [15]	19
13 pav. Sraigtinių varžtų šlyjamoji jungtis[15].....	20
14 pav. Bandinio apkrovos ir praslydimo diagrama[15].....	20
15 pav. Atstumo tarp varžtų išilgine kryptimi įtaka jungčiai[15]	21
16 pav. Varžtinė, pilnai užbetonuojama jungtis[14]	22
17 pav. Jėgos ir praslydimo diagrama naudojant skirtingų skersmenų ir klasių varžtus[14]	22
18 pav. Apkrovos ir praslydimo kreivė tarp skirtingų varžtų klasių[14]	23
19 pav. Juostos sienelės storio įtaka jungties standumui ir didžiausiai apkrovai[14].....	23
20 pav. CLT pluošto krypties įtaka jungties standumui ir didžiausiai apkrovai[14]	24
21 pav. Galvelinės jungės[22].....	24
22 pav. Šlyjamoji galvelinė jungtis su CLT plokšte[13]	25
23 pav. Galvelinių jungčių su skirtingais jungės skersmenimis apkrovos slydimo atsakas[13].....	25
24 pav. Kūginių griovelių konfigūracijos[13].....	26
25 pav. Kūginių griovelių poveikis laikomajai galiai ir standumui[13]	26
26 pav. CLT plokštės įtaka jungties standumui[13].....	27
27 pav. Principinė varžtinės jungties schema [23].....	28
28 pav. Principinė jungių schema: a) Galvelinė jungė; [26] b) varžtinė užbetonuojama jungtis; [14]	29
29 pav. Bandymų rezultatų palyginimas su Eurokodas 5 skaičiavimo metodika.[26]	30
30 pav. Bandymų rezultatų palyginimas su Eurokodas 4 ir AISC 360-16 skaičiavimo metodika.[26]	30
31 pav. Bandymo metu gautų rezultatų palyginimas su Eurokodas 5 skaičiavimo metodika[17] ...	31
32 pav. Rezultatų palyginimas su Eurokodas 4 ir AISC 360-16 skaičiavimo metodika.[17].....	32
33 pav. L. Chen'o ir kt., bandymo ir skaičiavimų rezultatų palyginimas [29, 36]	32
34 pav. C. L. Wang'o ir kt., bandymo ir teorinių Eurokodas 5 skaičiavimų rezultatų palyginimas[35]	33
35 pav. Eksperimentinių bandymų ir Eurokodas 4 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas..	36
36 pav. Eksperimentinių bandymų ir 2027 metų Eurokodas 4 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas.....	37
37 pav. Eksperimentinių bandymų ir AISC 360-16 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas	38

38 pav. Eksperimentinių bandymų ir GB 50017 – 2017 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas	40
39 pav. Eksperimentinių bandymų [26] ir E. Zhao'o ir kt., skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas.....	42
40 pav. Eksperimentinių bandymų ir Ding'o ir kt., skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas.	43
41 pav. Eksperimentinių bandymų ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas	45
42 pav. Kompozitinės perdangos plokštės skaičiuojamoji schema, naudojant linijinius elementus	46
43 pav. CLT plokštės skerspjūvio nustatymas	47
44 pav. CLT plokštės tamprumo modulio nustatymas	47
45 pav. Plieninės sijos skerspjūvio ir medžiagiškumo nustatymas.....	48
46 pav. Jungties charakteristikos: a) standaus ryšio elementas, b) standaus ryšio poslinkio spyruoklinis standumas	48
47 pav. Kompozitinės perdangos keturių taškų lenkimo bandymas[11]	49
48 pav. Kompozitinės perdangos bandinys[11]	50
49 pav. Kompozitinės perdangos skaičiuojamoji schema.....	50
50 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – S vidurio tarpatramio įlinkis	51
51 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – GP vidurio tarpatramio įlinkis	51
52 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – EP vidurio tarpatramio įlinkis	52
53 pav. Perdangos plokštės skaičiuojamoji schema.....	53
54 pav. CLT plokštės skerspjūvio charakteristikos.....	53
55 pav. CLT plokštės išnaudojimas pagal ULS ir SLS.....	54
56 pav. Plieninės sijos skaičiuojamoji schema	54
57 pav. Plieninės sijos CLT plokštės išnaudojimas pagal ULS ir SLS.....	55
58 pav. Kompozitinės sijos skaičiuojamoji schema.....	56
59 pav. Bandinio su galvelinėmis šlyjamosiomis jungtimis 1S-T7-Φ10 vidurio tarpatramio įlinkis	57
60 pav. Bandinio su galvelinėmis šlyjamosiomis jungtimis 1S-T10-Φ13 vidurio tarpatramio įlinkis	57
61 pav. Bandinio su standžiomis šlyjamosiomis jungtimis vidurio tarpatramio įlinkis	57
62 pav. Kompozitinės sijos įlinkių palyginimas	58

Įvadas

Temos aktualumas

Statybų pramonė yra viena iš didžiausių anglies dvideginio (CO₂) išmetimo šaltinių pasaulyje. Siekiant sumažinti anglies dvideginio kiekį, ieškoma inovatyvių ir tvarių konstrukcijų sprendinių. Mediena yra viena iš seniausių ir plačiausiai naudojamų statybinių medžiagų, kuri pasižymi geromis izoliacinėmis savybėmis, yra ekologiška, lengva bei didelio stiprumo medžiaga. Siekiant išnaudoti šias medienos savybes, šiuo metu vis dažniau kuriamos naujos ir tiriamos jau sukurtos kompozitinės konstrukcijos. Kompozitinėms konstrukcijoms, tokioms kaip medis – plienas arba medis – betonas skiriamas vis didesnis dėmesys.

Kompozitinės perdangos, sudarytos iš medžio ir plieno elementų pasižymi didele laikomąja galia, yra ekonomiškos ir efektyvios. Šių sistemų svarbus elementas yra šlyjamoji jungtis (angl. Shear connection), kuri turi užtikrinti, kad plieninės sijos dirbtų kartų su kryžmai klijuotomis medienos plokštėmis (angl. Cross Laminated Timber, CLT) ir veiktų kaip kompozitinė konstrukcija. Šlyjamosios jungties tipas ir jos mechaninės savybės turi tiesioginę įtaką lenkiamų elementų stiprumui, standumui ir ilgalaikiui patikimumui.

Temos naujumas. Siekiant pakeisti dažniausiai naudojamas gelžbetonines perdangas, vienas iš perspektyviausių būdų yra kompozitinės medžio ir plieno (angl. Timber - Steel Composite, TSC) perdangos. Šioje konstrukcijoje plieninės sijos ir kryžmai klijuotos medienos plokštės sujungtos tam tikru šlyjamosios jungties būdu. Šiuo metu didesnis dėmesys skiriamas kompozitinių perdangų šlyjamųjų jungčių tipų analizavimui ir laikomosios galios nustatymui, tačiau nėra akcentuojama šių jungčių įtaka ir poveikis medžio ir plieno perdangos stiprumui ir standumui. Kompozitinės perdangos mechaninės savybės priklauso nuo pasirinktų jungties tipų, bei jų elgsenos veikiant apkrovoms, todėl būtina išanalizuoti šlyjamosios jungties įtaką medžio ir plieno perdangų stiprumui ir standumui, norint optimizuoti jų konstrukcinius parametrus pritaikant efektyvius jungimo būdus.

Darbo tikslas – Išanalizuoti kompozitinių plieno – medžio perdangų šlyjamosios jungties įtaką lenkiamų elementų stiprumui ir standumui.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę ir išnagrinėti skirtingų tipų šlyjamųjų jungčių mechanines savybes. Apžvelgti mokslinėse publikacijose pateikiamų kompozitinių plieno – medžio perdangų stiprumo ir standumo tyrimus.
2. Taikant analitinius metodus apskaičiuoti plieno – medžio šlyjamosios jungties laikomąją galią ir palyginti su mokslinėse publikacijose pateiktais eksperimentų rezultatais.
3. Atlikti kompozitinės plieno – medžio perdangos stiprumo ir standumo palyginamąją analizę atsižvelgiant į skirtingų šlyjamųjų jungčių įtaką.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

1.1. Medžiagų savybės

1.1.1. Klijuotos medienos plokštės CLT

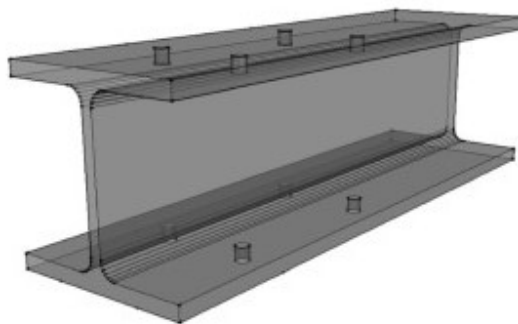
Kryžmai klijuotos medienos plokštės yra plačiai taikomos ir naudojamos masinės medienos statyboje. Šios plokštės gaminamos nuo trijų iki devynių kryžmai klijuotų sluoksnių, tarpusavyje pasuktų 90° kampu, tačiau dažniausiai naudojamos yra trijų ir penkių sluoksnių CLT plokštės. Tokiu principu suklijuota plokštė elementui suteikia standumo, bei gali dirbti dviem kryptimis. CLT plokščių gamybai gali būti naudojamos ir kelios medienos rūšys vienu metu: eglė – pušis – eglė. Naudojant kelias medienos rūšis plokštės savybės išlieka panašios, nes tų rūšių savybės yra panašios [1]. CLT plokštės yra tinkamos naudoti lubose, sienose, sijose ar stoguose [2]. CLT plokštės gaminamos iš kalibruotos medienos lentų, kurių klasė yra C24. Lamelių charakteristinis gniuždymo ir lenkimo stipris lygiagrečiai medienos pluošto kryptčiai yra 21 MPa ir 24 MPa, o vidutinis tamprumo modulis $E = 11 \text{ GPa}$ [3].



1 pav. Kryžmai klijuotos medienos plokštės (CLT)[1]

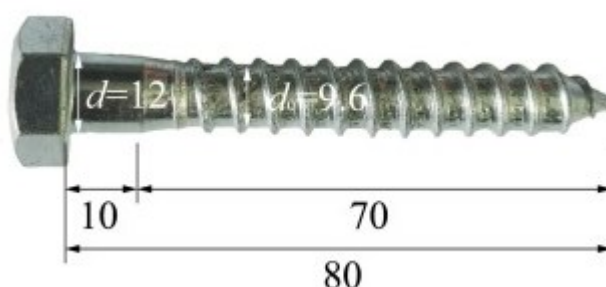
1.1.2. Konstrukcinis plienas

Konstrukcinis plienas – viena iš plačiausiai naudojamų medžiagų statybų pramonėje. Plieninėms konstrukcijoms būdingas mažas savasis svoris, didelė laikomoji galia, geras seisminis atsparumas. Kartais šios konstrukcijos yra nestabilios, dėl plonasienių elementų naudojimo. Atliekant kompozitinių perdangų tyrimus, plieno stiprumas ir lankstumas naudojami stambioms, bet lengvoms klijuotos medienos plokštėms papildyti, kad būtų sukurtas naujo tipo medžio ir plieno kompozito elementas. Tokio tipo kompozitui kurti dažniausiai naudojamas H arba IPE profiliai [4, 5]. Pagrindinės konstrukcinio plieno klasės yra: S235, S275, S355, S450, tačiau kitose šalyse galimi kitokie plieno klasių žymėjimai, bei reikšmės. A. Hassanieh'as ir kt., atlikdami kompozitinės perdangos tyrimą naudojo H profilį, kurio plieno markė yra „300PLUS“, takumo riba – 320 MPa ir ribinis stipris – 440 MPa [6].



2 pav. H profilio sija[4]

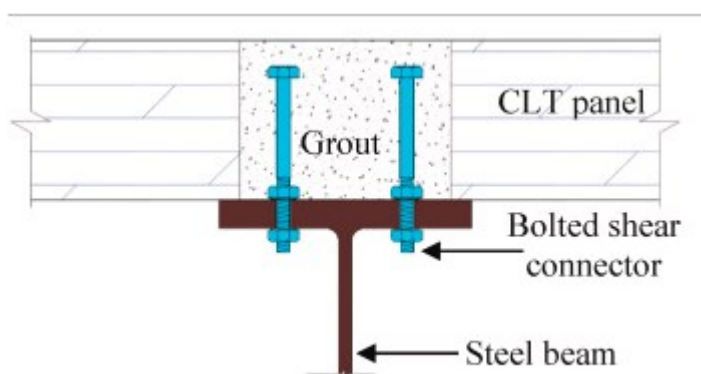
Plieninėms konstrukcijoms sujungti dažniausiai naudojami varžtiniai sujungimai [7-9]. Varžtų yra įvairių tipų, skersmens ir stiprumo klasių. A. Ataei ir kt., tirdami medienos ir plieno kompozitinių perdangų šlyjamąsias jungtis naudojo 4.6 ir 8.8 klasės varžtus, kurių skersmuo buvo M12, M16, M20 [3]. A. Hassanieh'as ir kt., tiriant kompozitinių perdangų šlyjamąją jungtį naudojo varžtus, sraigtinius varžtus ir didelio stiprumo varžtus. Varžtų skersmuo buvo 16 mm, sraigtinių varžtų skersmuo 16 mm ir 19 mm, o didelio stiprumo varžtų skersmuo – 16 mm ir 20 mm [10]. Y. Zhao'o ir kt., tirdami jungtis naudojo 4.8 klasės sriegtus varžtus, kurių takumo riba yra 320 MPa, didžiausias stipris – 400 MPa [3].



3 pav. Sraigtinis varžtas [11]

1.1.3. Betono skiedinys varžtų užbetonavimui

Siekiant padidinti varžtinių jungčių efektyvumą šlyjamosiose jungtyse, varžtinės jungtys kryžmai klijuotoje plokštėje yra užbetonuojamos betono skiediniu. A. Hassanieh'as ir kt., tirdami šlyjamąsias jungtis, varžtinėms jungtims užbetonuoti naudojo didelio stiprumo betono mišinį. Betono stipris gniuždam po 2 valandų kietėjimo 30 MPa, o 28 parų – 57,2 MPa [6]. A. Ataei ir kt. savo tyrime naudojo betono skiedinį, kurio nustatytas gniuždymo stipris – 40 MPa, tempiamasis stipris – 3,5 MPa, tamprumo modulis – 32 GPa [3]. Y. Zhao'o ir kt., tirdami šlyjamąsias jungties stiprumą, taip pat naudojo aukštos kokybės skiedinį „JMG – PC(1)“, kurio vidutinis gniuždomasis stipris po 28 parų siekė 84,3 MPa, o tamprumo modulis – 35,6 GPa [11].



4 pav. Užbetonuojama varžtinė jungtis CLT plokštėje[3]

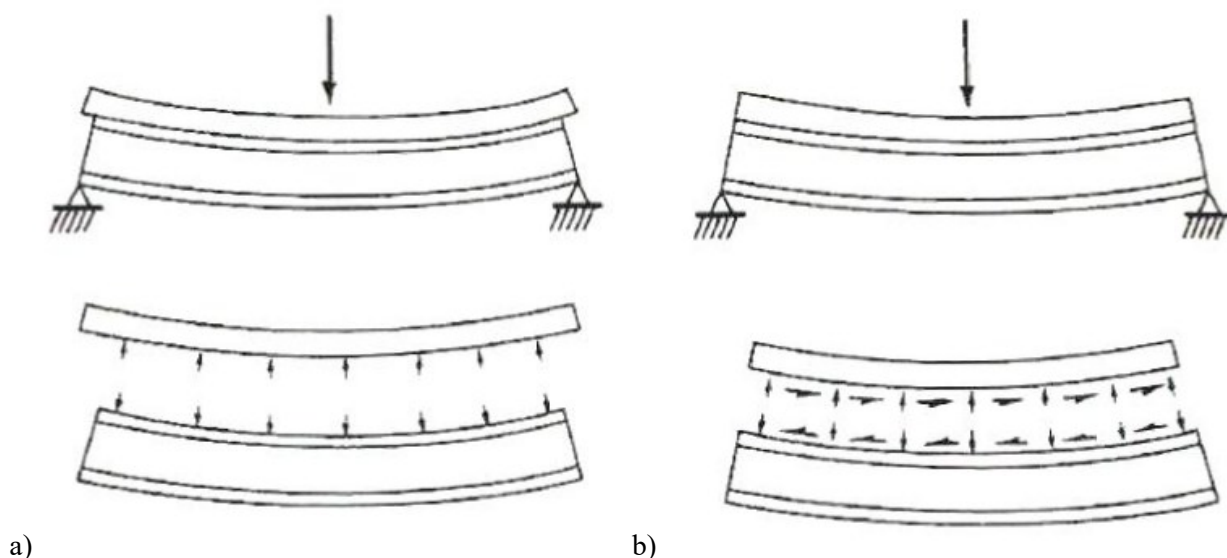
1.2. Kompozitinė konstrukcija

Kompozitinės konstrukcijos – tai konstrukcijos, kurias sudaro daugiau nei viena skirtingų mechaninių ir fizikinių savybių medžiaga. Plienas yra stiprus gniuždam ir tempiant, o kryžmai klijuota mediena suteikia elementui standumo, bei įgalina plokštės darbą dviem kryptimis. Kompozitinėse

konstrukcijose panaudojamos atskirų medžiagų savybės, kurias sudėjus, medžiaga turi geresnes savybes, nei medžiagos atskirai, taip pat panaikinamos jų silpnybės. Kompozitinės konstrukcijos leidžia projektuoti lengvas, efektyvias, patikimas bei ekonomiškąs konstrukcijas. Naudojant kompozitines perdangas, sumažinamas perdangos aukštis, gaunama lengvesnė konstrukcija, kuri sumažina apkrovą kitoms laikančioms konstrukcijoms. Kompozitinės perdangos montavimo greitis ir našumas yra didesnis, lyginant su standartinių perdangų įrengimu. Projektuojant kompozitines konstrukcijas svarbu užtikrinti, kad kompozitinė konstrukcija veiktų kaip vienas elementas, 5 pav. pateikta sijos elgsena: a) ne kompozitinė elgsena, elementai veikia atskirai; b) kompozitinė elgsena, medžiagos veikia kaip vienas elementas [12].

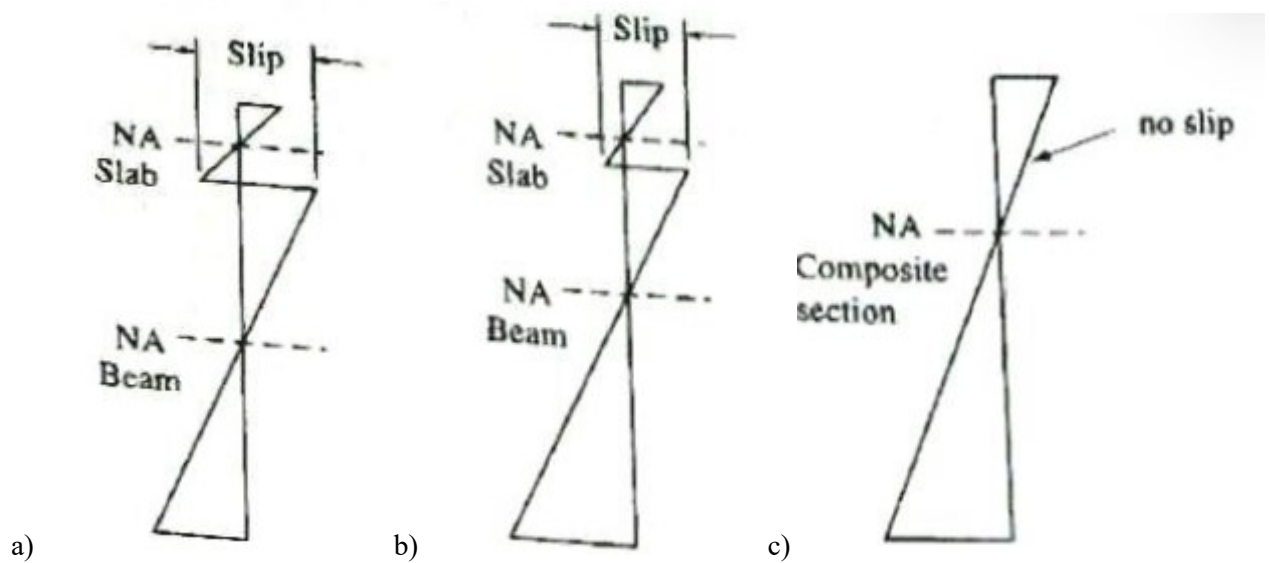
Kompozitinių konstrukcijų elgsenos pagrindinės sąvokos ir principai:

1. šlyjamoji jungtis – jungiamoji detalė, užtikrinanti plieninės sijos ir kryžmai klijuotos medienos plokštės sąveiką, kad tos medžiagos veiktų kaip vientisas konstrukcinis elementas [12];
2. pilna sąveika - sąveikos vietoje įtempiai abejose medžiagose yra lygūs [12];
3. dalinė sąveika – sąveikos vietoje įtempiai abejose medžiagose skiriasi [12];
4. pilna šlyjamoji jungtis – neutrali ašis yra tarp sijos ir plokštės sąveikaujančio paviršiaus, nesusidaro praslydimas tarp elementų [12];
5. dalinė šlyjamoji jungtis – sijos neutrali ašis yra arčiau plokštės, o plokštės neutrali ašis yra arčiau sijos. Dėl dalinės šlyjamosios jungties praslydimas tarp elementų sumažėja [12];
6. šlyjamosios jungties praslydimas – poslinkis išilgine kryptimi dviejų kontaktuojančių medžiagų, viena kitos atžvilgiu [12].



5 pav. Kompozitinės sijos elgsena: a) ne kompozitinė elgsena; b) kompozitinė elgsena[12]

6 pav. Pateikiama kompozitinių medienos – plieno deformacijų pasiskirstymas, kai elementai dirba atskirai (nėra kompozitinės sąveikos), elementai dalinai dirba kartu (dalinė sąveika), elementai pilnai dirba kartu (pilna sąveika).

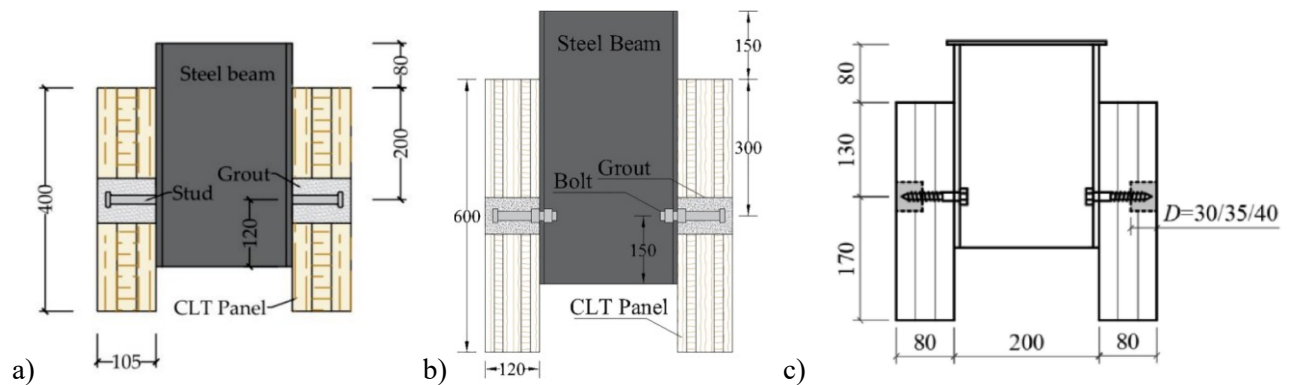


6 pav. Deformacijų pasiskirstymas: a) nėra kompozitinės sąveikos; b) dalinė sąveika; c) pilna sąveika [12];

1.3. Šlyjamosios jungties tipai

1.3.1. Išstūmimo bandymas

Siekiant, kad mediena veiktų kartu su plienu, yra būtina jas konstrukciškai sujungti. Dažniausiai naudojamos galvelinės jungės, kurios yra privirinamos prie plieninės sijos viršutinės lentynos ir užpilamos betono skiediniu, taip pat įvairių tipų mechaninės varžtinės jungtys, kaip parodyta 7 pav.



7 pav. Kryžmai klijuotos medienos ir plieno sijų jungčių tipai: a) galvelinė užbetonuojama jungtis [13]; b) varžtinė užbetonuojama jungtis [14]; c) varžtinė dalinai užbetonuojama jungtis [15];

Išstūmimo bandymas atliekamas taikant jėgos ir poslinkio valdymo apkrovos metodą pagal standartą EN 26891. Tai Europos standartas, nustatantis bendruosius principus, kaip nustatyti mechaniniais tvirtinimo elementais sujungtų medinių konstrukcijų jungčių stiprumo ir deformacijos (poslinkio) charakteristikas. Šis standartas taikomas jungtims, naudojamoms statiskai apkrautose medinėse konstrukcijose [16].

Pirmiausia jėgos kontroliuojamas apkrovimas taikomas nuo 0 iki $0,4 F_{\max}$ ir palaikomas 30 s, tada apkrova sumažinama iki $0,1 F_{\max}$ ir palaikoma 30 s, sumažinta apkrova vėl palaipsniui didinama nuo $0,1 F_{\max}$ iki $0,7 F_{\max}$ ir galiausiai padidinus apkrovimo greitį iki 4mm/min yra didinama kol bandinys suirs, (žr. 8 – 9 pav).

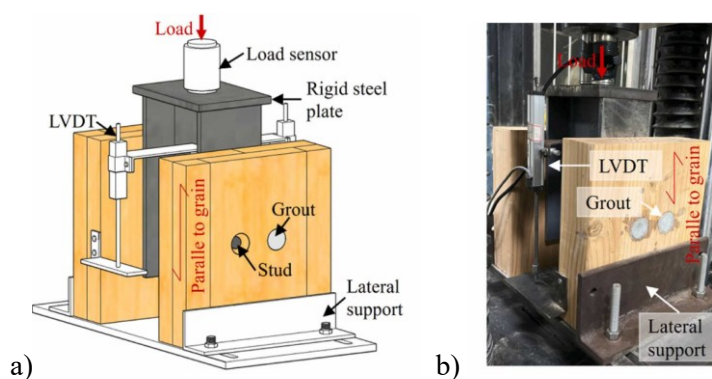
Išstūmimo bandymų pagalba nustatoma pasirinktos jungties laikomoji galia, bei fiksuojamas apkrovos – poslinkio santykis, kuris leidžia įvertinti jungties standumą K_i , kuris apskaičiuojamas pagal (1.3.1.1) formulę [16].

$$K_i = \frac{0,4 \cdot F_{max} - 0,1 \cdot F_{max}}{V_{0,4} - V_{0,1}} \quad (1.3.1.1)$$

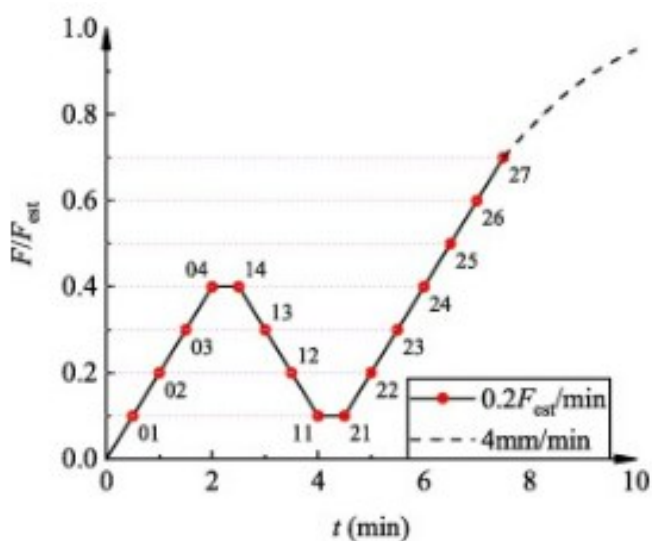
čia: K_i – Jungties standumas tarp 10 % ir 40 % didžiausios apkrovos F_{max} ;

F_{max} – didžiausia apkrova;

$v_{0,1}$ ir $v_{0,4}$ – jungties praslydimas, atitinkantis 10 % ir 40 % didžiausios apkrovos F_{max} ;



8 pav. Išstūmimo bandymo principas: a) Bandinio paruošimas; b) bandymo atlikimas [17]



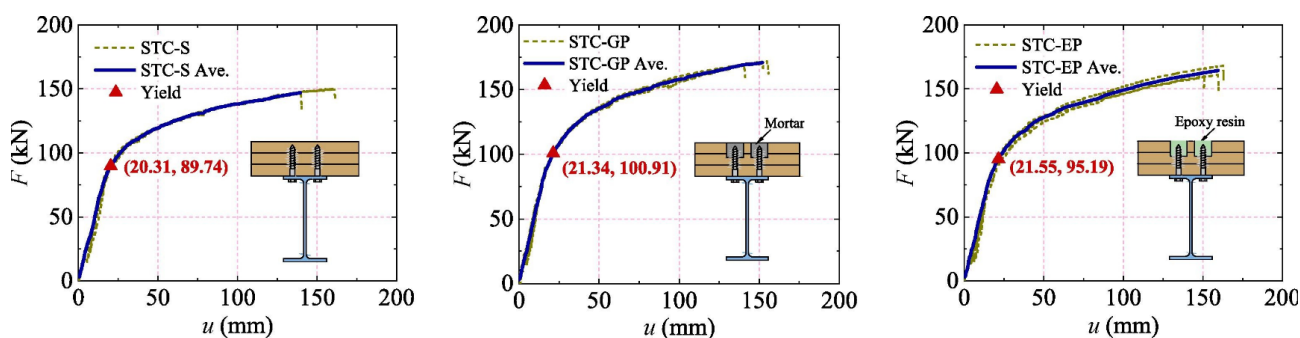
9 pav. Apkrovimo procedūra pagal EN 26891 [11, 16]

Medžio ir plieno perdangų mechaninės savybės priklauso nuo jungties standumo, kuris veikia perdangos elgseną veikiant apkrovoms. Jungties standumas K_i apibūdina jungties gebėjimą perduoti šlyties jėgas – bei riboti elementų tarpusavio praslydimą vienas kito atžvilgiu. Didesnis jungties standumas lemia efektyvesnę kompozicinę darbą, mažesnę elementų praslydimą – bei didesnę elemento lenkimo laikomąją galią [11, 16].

Y. Zhao'o ir kt., atliko keturių taškų lenkimo bandymus, kuriuose siekė nustatyti jungties standumo įtaką medžio ir plieno perdangos stiprumui. Eksperimente buvo tiriamos trys skirtingos varžtinės šlyjamosios jungtys su įprastais varžtais (STC-S) ir hibridinės jungtys, kur varžtų galai dalinai užpildomi betoniniu užpildu (STC-GP), taip pat epoksidine derva (STC-EP). Iš viso buvo 8 bandiniai, kurių kiekvieno ilgis – 4000 mm, naudojamas H profilis, kurio takumo riba $f_y=283,7$ MPa, ribinis stipris $f_u=466,6$ MPa. CLT plokštės gniuždomasis stipris $f_1=37,54$ MPa, o lygiagrečiai pluošto $f_2=6,55$ MPa. Sraigtiniai varžtai – M12 x 80 mm, 4.8 klasės, kurių takumo riba yra 320 MPa, didžiausias stipris – 400 MPa. Varžtų užbetonavimui betono skiedinys JMG – PC(1), kurio stipris gniuždant po 28 parų ≥ 85 MPa. Dviejų komponentų epoksidinės dervos gniuždomasis stipris – 56,5 MPa [11].

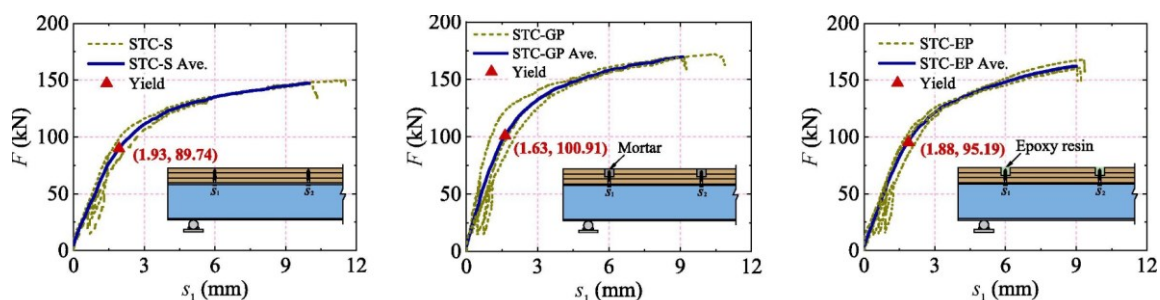
Po atliktų bandymų, gauti rezultatai parodė, kad jungties standumo padidėjimas tiesiogiai padidino perdangos laikomąją galią. Paprastos varžtinės jungties (STC-S) nustatytas standumas yra 46,45 kN/mm, epoksidine derva dalinai užpilditos varžtinės jungties (STC-EP) standumas – 55,18 kN/mm, o geriausi rezultatai gauti naudojant dalinai užbetonuojamą jungtį (STC-GP), kurios standumas siekė 68,93 kN/mm [11].

Perdangos vidurio tarpatramio deformacija ir laikomoji galia iki nustatyto takumo ribos taško, kada laikomoji galia dar didėja, tačiau prasideda plastinės deformacijos, naudojant paprastą varžtinę jungtį buvo mažiausia – 89,75 kN laikomoji galia, ir 20,31 mm įlinkis. Naudojant dalinai užpildytus varžtus epoksidine derva, perdangos laikomoji galia buvo 95,19 kN, deformacija siekė 21,55 mm, o geriausi rezultatai gauti naudojant dalinai užbetonuojamą jungtį, kurios laikomoji galia siekė 100,91 kN ir 21,34 mm deformaciją – (žr. 10 pav.) [11].



10 pav. Jungties standumo įtaka vidurio tarpatramio perdangos įlinkiui [11]

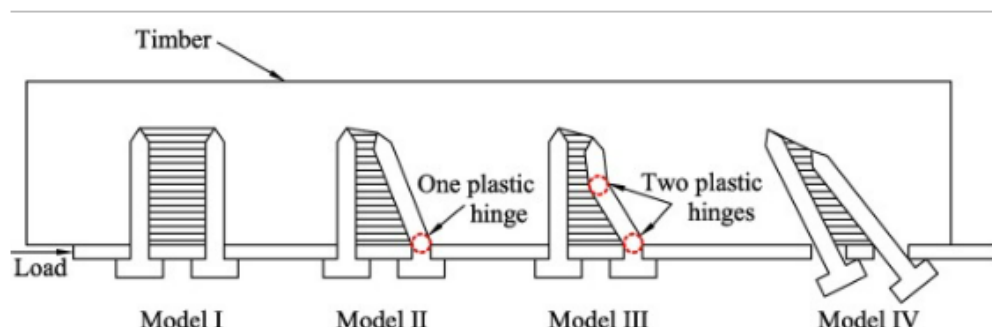
Jungties su mažesniu standumu įtaką perdangos deformacijoms galima pastebėti ir ties sijos galu, kur dėl ne pilnos kompozitinės sąveikos, metalinė sija ir CLT perdangos plokštė praslysta viena kitos atžvilgiu. Naudojant paprastą varžtinę jungtį, praslydimas tarp elementų siekė 1,93 mm, dalinai epoksidine derva užpilditos varžtinės jungties praslydimas buvo 1,88 mm, o naudojant dalinai užbetonuotą varžtinę jungtį, praslydimas siekė 1,63 mm – (žr. 11 pav.)



11 pav. Jungties standumo įtaka ties sijos galu elementų praslydimui vienas kito atžvilgiu[11]

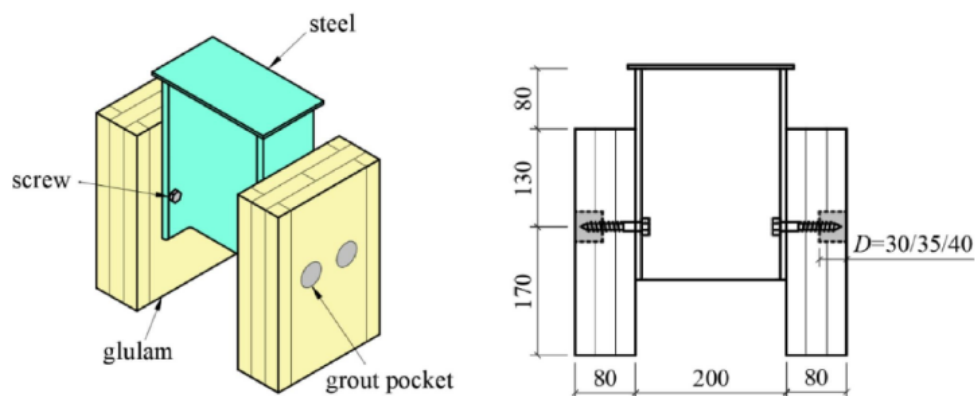
1.3.2. Sraigtinių varžtų sujungimai

Sraigtiniais varžtais sujungtų medžio ir plieno perdangų tyrimai parodė, kad atliekant trumpalaikės apkrovos bandymus, perdangos turi didelę galią ir pradinį standumą. Atliekant ilgalaikius apkrovos bandymus, nustatyta, kad sraigtais sujungtos kompozitinės medžio ir plieno perdangos valkšnumas, veikiant ilgalaikiai apkrovai, gali atitikti eksploataavimo reikalavimus ir gali būti prognozuojamas. Siekiant išsiakinti sraigtinių šlyčių jungčių mechanines savybes, sukuriami 4 galimi varžtų suirimo būdai, kaip parodyta 12 pav. Kai varžtas statmenas – globalus praslydimas (I būdas), irimas su vienu plastiniu lankstu (II būdas), irimas susidarant dviem plastiniam lankstam (III būdas), kai varžtas tvirtinimas kampu (IV būdas). Išstūmimo testas parodė, kad varžto suirimo būdai ir veikimas priklauso nuo jo ilgio ir skersmens santykio. Didėjant ilgio ir skersmens santykiui, varžto suirimo būdas pereina iš II būdo į III būdą, taip pagerindamas varžtų stiprumą ir lankstumą [15, 18, 19].



12 pav. Varžtų suirimo būdai [15]

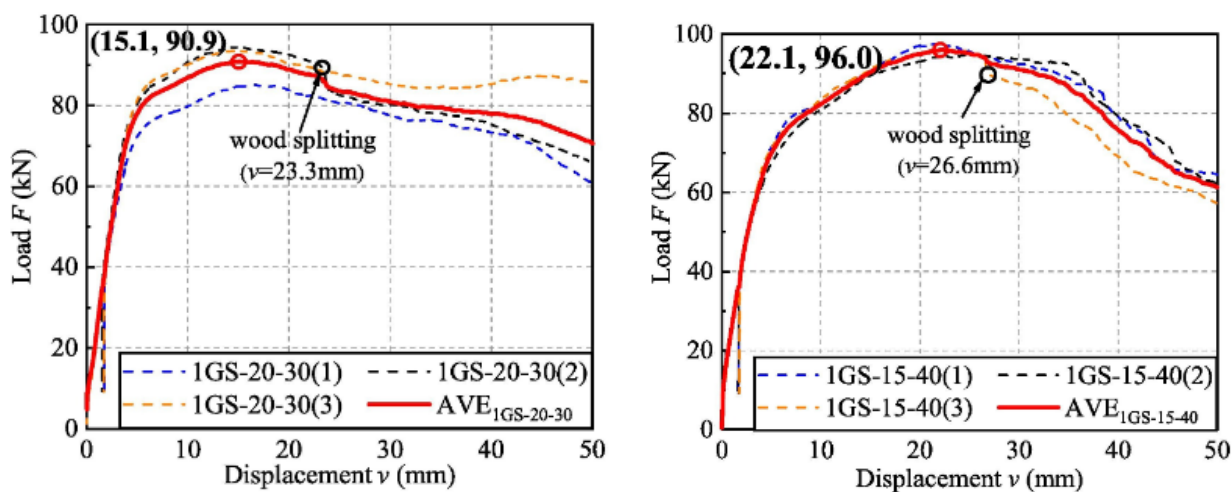
Y. Zhao'o ir kt., atliko išstūmimo bandymus su 9 grupių bandiniais, kuriose 6 grupės buvo su vienos eilės jungtimis ir 3 grupės su dviejų eilių jungtimis. Kiekvienoje grupėje buvo 3 pasikartojantys bandiniai, dėl rezultatų palyginamumo ir nenumatytų atvejų. Iš viso buvo 27 paruošti bandiniai, naudojamas karštai valcuotas H profilis, kurio takumo riba $f_y = 252,48$ MPa, ribinis stipris $f_u = 429,62$ MPa. CLT plokštės gniuždomasis stipris $f_c = 41,89$ MPa, o lygiagrečiai pluošto $f_{ce} = 5,95$ MPa. Sraigtiniai varžtai – M12 x 80 mm, 4.8 klasės, kurių takumo riba yra 320 MPa, didžiausias stipris – 400 MPa. Varžtų užbetonavimui betono skiedinys JMG – PC(1), kurio stipris gniuždant po 28 parų ≥ 85 MPa [15].



13 pav. Sraigtinių varžtų šlyjamoji jungtis[15]

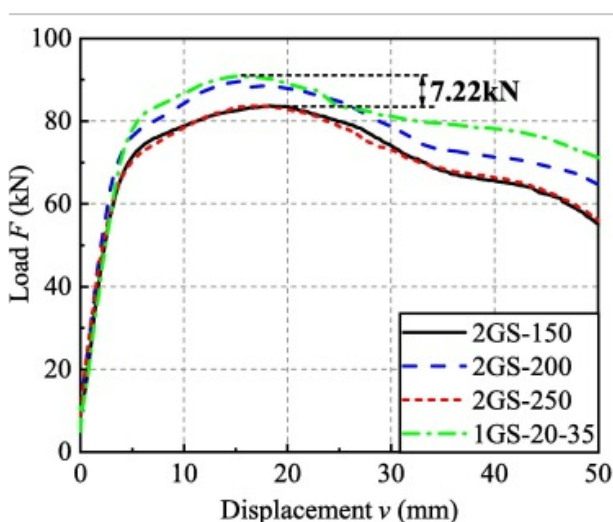
Sraigtinio varžto sriegio užbetonavimas gali apriboti varžto sukimasi ir valdyti III suirimo būdą. Dalinio varžto užbetonavimo, palyginti su pilnu užbetonavimu, jungtis gali atlaikyti statybinę apkrovą skiedinio kietėjimo laikotarpiu, tačiau turi mažesnę standumą [15].

Atlikus tokio tipo jungties išstūmimo bandymus tarp 9 skirtingų bandinių grupių, apkrovos ir praslydimo atsako sklaida kiekvienoje grupėje yra ganėtinai maža. Naudojant 20 mm skersmens ir 30 mm įgilinimo skylę, buvo pasiektas mažiausias praslydimas tarp medžiagų, kuris siekė 15,1 mm ir atlaikė 90,9 kN jėgą. Naudojant 15 mm skersmens ir 40 mm įgilinimo skylę, gautas didesnis praslydimas – 22,1 mm ir didžiausia 96 kN jėga – (žr. 14 pav.) Sraigtinių varžtų suirimas bandiniuose, naudojant dalinį užbetonavimą, buvo III suirimo būdas. Gauti rezultatai parodė, kad užbetonavimo skylės gylis ir skersmuo veikia varžtų laikomąją galią, praslydimą tarp medžiagų ir plastinių lankstų susidarymą. Pradinis bandinių standumas labiausiai buvo susijęs su kryžminės klijuotos medienos reakcijos jėga, o užbetonavimo gylis didelės įtakos tam neturėjo. Didinant užbetonavimo skylės skersmenį, bet išlaikant vienodą skylės įgilinimą, pradinis bandinių standumas padidėjo 26,02%, antrinis standumas padidėjo 43,86%, didžiausia apkrova padidėjo 8,21% lyginant su neužbetonuotu sraigtinio varžtu[15].



14 pav. Bandinio apkrovos ir praslydimo diagrama[15]

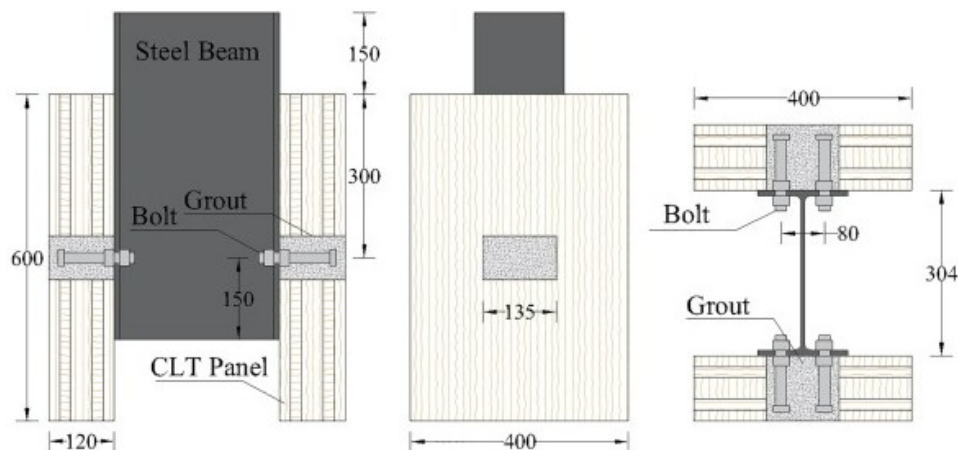
Kai varžtas buvo veikiamas šlyties jėgos, varžto antgalio sukimasi stabdė skiedinio užbetonavimas. Kuo didesnis skiedinio užbetonavimo spindulys, tuo mažesnis gniuždomasis įtempis aplinkiniam klijuotam sluoksniui ir tuo mažesnė klijuoto sluoksnio vietinė gniuždymo deformacija. Todėl, padidėjus skiedinio užbetonavimo spinduliui, atitinkamai geresnis buvo varžtų antgalių tvirtinimo efektas skiedinio užbetonavimui, padidėjo bandinių antrinis standumas ir didžiausia apkrova, tai rodo, kad varžtų antgalių įtvirtinimas labiausiai prisidėjo prie jungties standumo. 2 eilių jungtis turinčių bandinių apkrova buvo gauta padalijus išmatuotą apkrovą iš jungčių eilių skaičiaus. Iš 15 pav. matyti, kad, palyginti su bandiniu 1GS-20-35, didžiausia apkrova (F_{max}) bandinių 2GS-150, 2GS-200 ir 2GS-250 atitinkamai sumažėjo 7,85 %, 2,72 % ir 7,94 %. Tai rodo, kad H formos plieno judėjimo žemyn metu, dėl kelių eilių varžtų montavimo paklaidos, H formos profilio juosta gali nesiliesti su visais varžtais vienu metu, todėl varžtai apkrovą perneša paeiliui, dėl to sumažėja laikomoji galia [15].



15 pav. Atstumo tarp varžtų išilgine kryptimi įtaka jungčiai [15]

1.3.3. Varžtinės jungtys

A.A. Chiniforush'as ir kt., taip pat tyrė ilgalaikį plieno – medienos kompozito šlyjamosios jungties elgesį. Ilgalaikės apkrovos išstūmimos bandymus atliko su keturių skirtingų tipų jungtimis: varžtais, sraigtais, įtemptais varžtais ir užbetonuojamais varžtais [20]. Taip pat A. Hassanieh'as ir kt., tyrinėjo šlyjamąją jungtį su užbetonuojamais varžtais CLT plokštėje. Pilnai užbetonuotų varžtinių jungčių standumas, palyginti su sraigtinėmis jungtimis, gali pagerinti STC sistemos efektyvumą, nes jungčių standumas yra pagrindinis kompozitinių medinių konstrukcijų projektavimo parametras. Varžtinę jungtį sudaro du pagrindiniai komponentai: varžtai, sumontuoti ant plieninių sijų viršutinės juostos naudojant porą veržlių (virš ir žemiau sijos juostos), ir cementinis skiedinys, kuris užpildo kišenes arba tuštumą, kurią riboja medinės grindų plokštės ir plieninės sijos juosta – (žr. 16 pav.) Varžtinės jungtys palengvina STC grindų statybą, nes sumažina virš galvos atliekamus darbus, kurių reikia norint sumontuoti daug įvairių tvirtinimo detalių, o pasibaigus konstrukcijos eksploatavimo laikui galima lengvai išmontuoti kompozicines grindis [14].

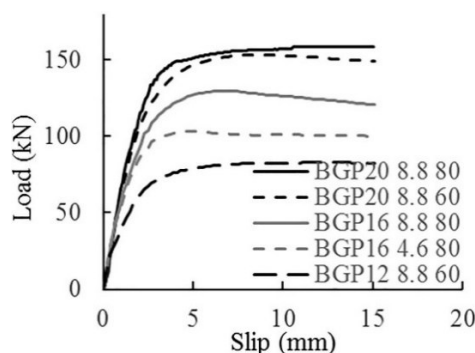


16 pav. Varžtinė, pilnai užbetonuojama jungtis[14]

Visų bandinių skiedinio „kišenė“ buvo 135 mm pločio, tačiau bandinių kišenių ilgis svyravo nuo 60 mm iki 80 mm. CLT plokštės buvo pagamintos iš eglės medienos lamelių. Pagrindiniai kintamieji buvo varžto jungties skersmuo, takumo stipris ir skiedinio kišenių dydis. Vidutinis apkrovos slydimo atsakas ir pradinio standumo vidurkis, iki didžiausio standumo ir didžiausios apkrovos, gauti atlikus trijų identiškų STC jungčių su varžtinėmis užbetonuojamomis jungtimis bandymus. Varžtų užbetonavimui naudojamas cementinis skiedinys, kurio gniuždomasis stipris f_{cm} 55 MPa, tamprumo modulis $E_c = 37$ GPa. Varžtinės jungtys buvo 4.6 ir 8.8 klasės plieno, kurių minimali takumo riba buvo atitinkamai 240 ir 640 MPa. Plieninė sija naudota iš 300PLUS klasės plieno, kurio takumo riba yra 320 MPa, ribinis stipris 440 MPa.

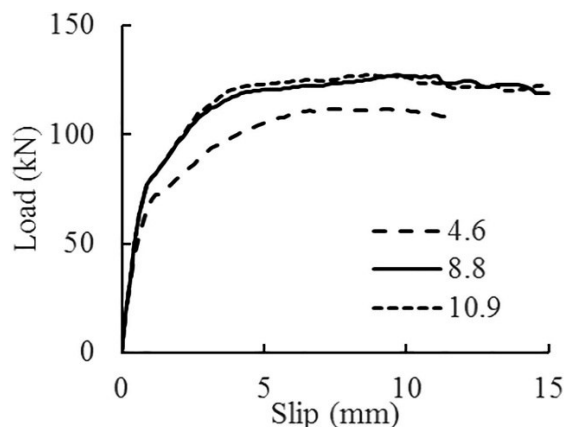
Gauti rezultatai parodė, kad varžto skersmuo yra vienas iš svarbiausių medienos ir plieno jungčių konstrukcijos elgsenos ir suirimo būdo parametru. Varžto ilgis turi nedidelę įtaką apkrovos slydimo reakcijai, standumui ir didžiausiai apkrovai. Plieninių profilių juostose pastebėta liekamoji deformacija (lenkimas), buvo iškelta hipotezė, kad varžto skersmens ir juostos storio santykis gali turėti tam tikros įtakos jungčių standumui ir didžiausiai apkrovai [14].

Naudojant 12 mm skersmens ir 8.8 klasės varžtą gautas pradinis slydimo modulis, 53 kN/mm ir didžiausia apkrova pasiekta 82,9 kN. Išbandant 16 mm skersmens, 4.6 klasės varžtus, pradinis slydimo modulis ir didžiausia apkrova buvo didesnė, atitinkamai 58,68 kN/mm ir 103,4 kN. Geriausi gauti rezultatai pasiekti naudojant 20mm skersmens 8.8 klasės varžtus, kur pradinis slydimo modulis buvo 77,19 kN/mm, didžiausia apkrova pasiekė 159,7 kN (žr. 17 pav.) [14].



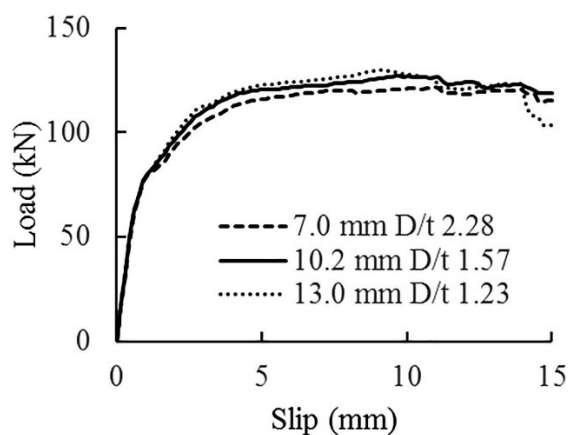
17 pav. Jėgos ir praslydimo diagrama naudojant skirtingų skersmenų ir klasių varžtus[14]

Jungčių su 4.6 klasės varžtais standumas ir didžiausia keliamoji galia yra 20% ir 14% mažesnė nei jungčių su 8.8 klasės varžtais. Be to, pastebimas nedidelis skirtumas tarp jungčių su varžtais, kurių klasė yra 8.8 ir 10.9. Daroma išvada, kad varžtų takumo vertės padidinimas virš tam tikro lygio (šiuo atveju apie 600 MPa), turi nedidelį poveikį užbetonuojamų jungčių apkrovai ir standumui. Taip yra todėl, kad padidinus varžtų takumo ribą, suirimo režimai perkeliama nuo varžtų jungčių plastinių deformacijų į kitus suirimo būdus, susijusius su medienos plokštės arba skiedinio gniuždymu (žr. 18 pav.) [14].



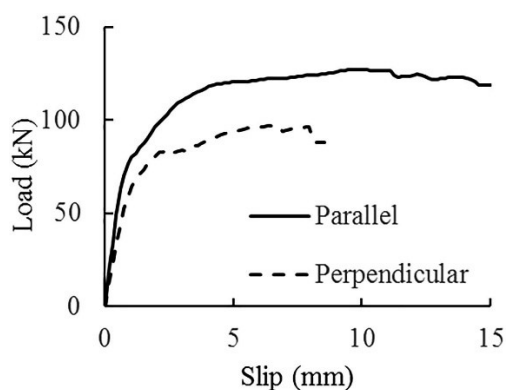
18 pav. Apkrovos ir praslydimo kreivė tarp skirtingų varžtų klasių[14]

Naudojant 16 mm skersmens varžtinę jungtį, išanalizuoti 7, 10,2 ir 13 mm juostos storiai. Pagal atliktų bandymų rezultatus, juostos sienelės storis turėjo mažą įtaką pradiniam jungties standumui ir didžiausiai apkrovai – (žr. 19 pav.)



19 pav. Juostos sienelės storio įtaka jungties standumui ir didžiausiai apkrovai[14]

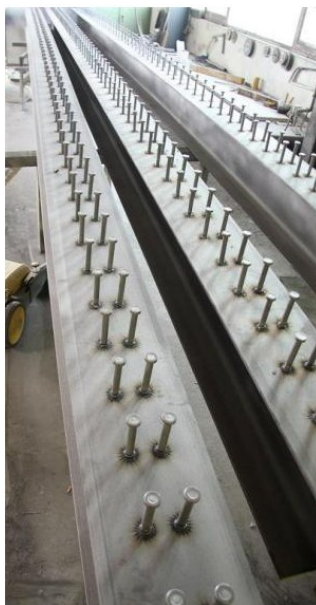
Norint išsiaiškinti reikšmingą apkrovos krypties įtaką atsižvelgiant į pluošto kryptis išoriniuose CLT sluoksniuose, buvo analizuojami užbetonuojamų varžtinių jungčių modeliai, kurių varžto skersmuo yra 16 mm ir skiedinio gniuždymo stipris – 55 MPa. Apkrova taikoma lygiagrečiai ir statmenai CLT išorinių sluoksnių pluoštui. Pastebėta, kad CLT lamelių orientacija apkrovos krypties atžvilgiu turi didelę įtaką STC jungčių elgsenai, o jungties pradinis standumas ir didžiausia keliamoji galia statmenai pluošto kryptčiai yra atitinkamai 33% ir 25% mažesnė nei lygiagrečiai pluošto kryptčiai (žr. 20 pav.) [14].



20 pav. CLT pluošto krypties įtaka jungties standumui ir didžiausiai apkrovai[14]

1.3.4. Galvelinės jungės

Galvelinės jungės (angl. Headed studs) – pats populiariausias šlyjamosios jungties tipas, plačiausiai naudojamas plieno – betono kompozituose, ir yra apibrėžtas Europos standartuose (Eurokodas 4). Jungės gamybos metu virinamos prie laikančiųjų elementų. Toks gamybos procesas gali būti automatizuotas ir lengvai atliekamas tiek gamyklose, tiek statybvietėje, todėl šios jungtys yra taip plačiai naudojamos – (žr. 21 pav.) Jungės stiprumo riba gali būti išskaičiuojama kaip suirimo ribos apkrova, padalinta iš jungių skaičiaus. Galvelinės jungės laikomoji galia priklauso nuo strypo skersmens, jungės aukščio ir jos tempiamojo stiprio [21].



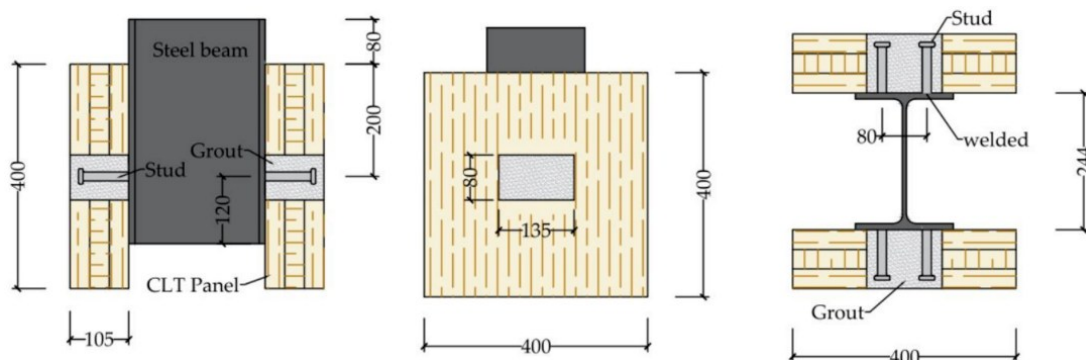
21 pav. Galvelinės jungės[22]

Tokio tipo šlyjamoji jungtis plieno ir medžio kompozitinėse perdangose dar nėra plačiai naudojama, tačiau vis daugiau yra atliekama tyrimų ir bandymų, kaip tokio tipo jungtys veikia kompozitinės perdangos mechanines savybes ir elgseną.

Nors tipinės medžio ir plieno sijų (STC) kaiščių jungtys – varžtai ir sraigčiai parodė idealų atsaką į apkrovą ir slydimą, prieš sujungiant daugumą jų reikia išgręžti tiek plieninių sijų flanšuose, tiek medinėse plokštėse, o tai reikalauja didesnio konstrukcijos tikslumo ir yra nepatogu montuoti [13].

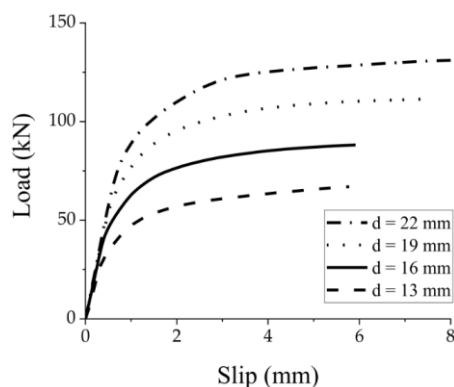
Medžio ir plieno kompozitinių perdangų galvelines šlyjamąsias jungtis tyrė E. Zhao'o ir kt., C. Loss'as ir kt., taip pat ieškojo optimaliausių šlyjamųjų jungčių kompozitinėms konstrukcijoms. Kryžmai klijuotos medienos plokštės patiria vertikalią apkrovą tiesiogiai, o horizontalią apkrovą į plieninę siją perduoda per šlyjamąją galvelinę jungtį, kurios visiškai atlaiko šlytį tarp medžiagų kontakto zonoje. E. Zhao'o ir kt., eksperimentiškai ištyrė galvelines jungtis atlikdami išstūmimo bandymus. Bandiniams buvo naudojama eglės medienos CLT plokštė, kurios tamprumo modulis 11,5 GPa, galvelinė jungtis, kurios plienas ML15, takumo riba 412,7 MPa, ribinis stipris 483,4 MPa. Betono skiedinio stipris gniuždant po 28 parų 55 MPa [17].

Galvelinių jungčių efektyvumą taip pat tyrė ir H. Zhang'as ir kt., Medinės plokštės ir plieninės sijos sujungimui STC sijose pasiūlytos užbetonuojamos smeigių jungčių (GSC) šlyties jungtys, susidedančios iš dviejų pagrindinių dalių – suvirintų šlyties smeigių ir ją supančio skiedinio. Smeigės suvirinamos tiesiai prie sijos flanšo be išankstinio gręžimo, tada į CLT plokštę įvedami grioveliai smeigės atitinkančiose vietose ir galiausiai griovelis užpildomas betono skiediniu, kad susidarytų GSC šlyties jungtis – (žr. 22 pav. Naudojant GSC šlyties jungtis, galima efektyviai sumažinti darbų apimtį, reikalingas įprastoms tvirtinimo detalėms montuoti STC grindų įrengimui, ir kompensuoti konstrukcijos tikslumo trūkumą [13].



22 pav. Šlyjamoji galvelinė jungtis su CLT plokšte [13]

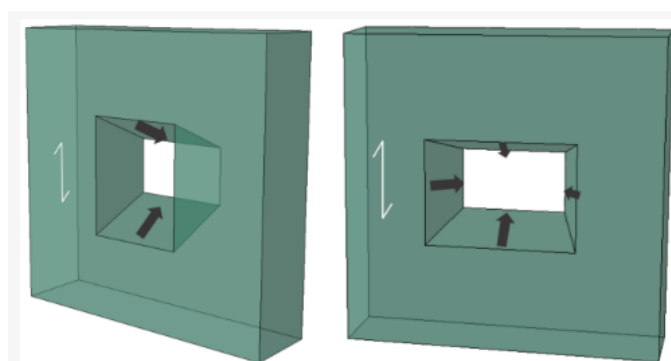
Galvelinės jungties skersmens įtaka jungčių šlyties charakteristikoms buvo įvertinta baigtinių elementų modeliavimu. Modeliuojant buvo atsižvelgta į 13, 16, 19 ir 22 mm skersmens smeiges. 23 pav. parodyta, kad baigtinių elementų apkrovos ir slydimo kreivėms būdingas pradinis tiesinis atsakas, po kurio eina netiesinė šaka, o tai rodo, kad kuo didesnis skersmuo, tuo didesnė GSC jungčių šlyties galia. Smeigių, kurių skersmuo 16, 19 ir 22 mm šlyties galia yra atitinkamai 31,61%, 66,23% ir 97,45% didesnė nei 13 mm skersmens smeigės [13].



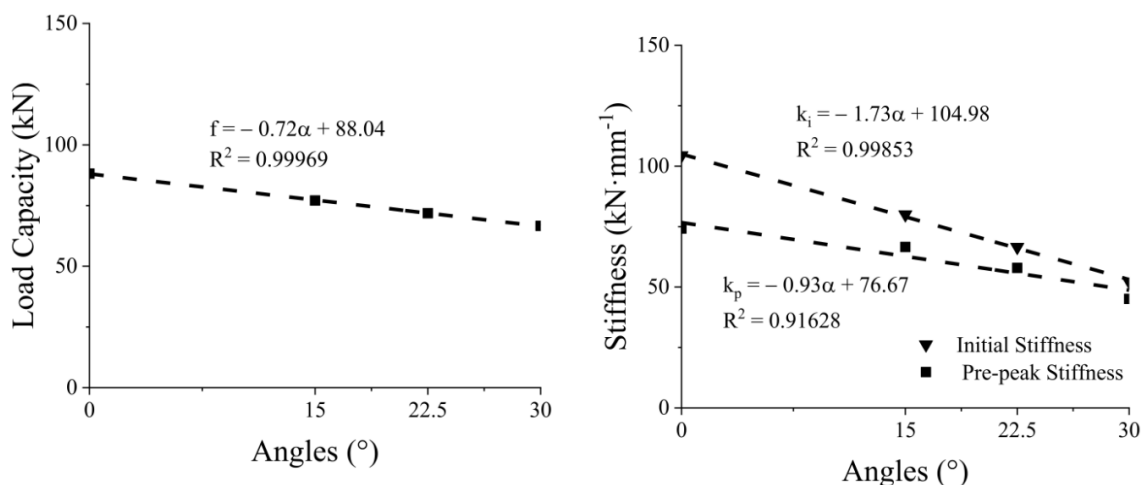
23 pav. Galvelinių jungčių su skirtingais jungės skersmenimis apkrovos slydimo atsakas [13]

Kompozitinėse perdangose šlyties jungtys turi atsispirti pakilimo efektui tarp viršutinės plokštės ir apatinės sijos, taip pat perduoti šlyties srautus tarp dviejų komponentų. Skiedinių griovelių kūginės konfigūracijos turėtų būti veiksmingas būdas pagerinti GSC jungčių atsparumą pakilimui. Taigi, siekiant įvertinti GSC jungčių šlyties charakteristikas ir atsparumą pakilimui, vertinamos kelių tipų kūginių griovelių konfigūracijos (15°, 22,5° ir 30°). GSC jungtys su vienakrypte ir dvikrypte kūgine konfigūracija – (žr. 24 pav.), rodo beveik tą patį apkrovos slydimo elgesį, o tai rodo, kad vienakryptis ir dvikryptis kūginis griovelis turi nedidelį poveikį GSC jungčių šlyties elgesiui.

Pagal gautus rezultatus kūginio griovelio kampas turi didelę įtaką tiek didžiausiai apkrovai, tiek standumui vertinant pakilimo efektą. Padidėjus injektavimo griovelio kampui nuo 0° iki 30°, tiek didžiausia apkrova, tiek standumas mažėja maždaug tiesiniu proporcingu ryšiu, pagal 25 pav [13].



24 pav. Kūginių griovelių konfigūracijos[13]

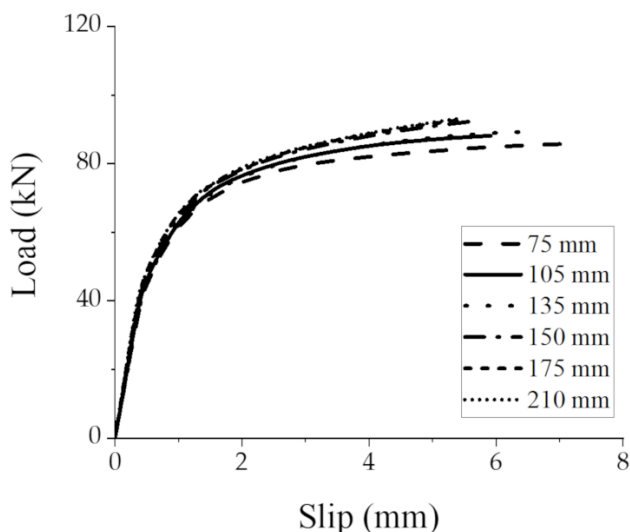


25 pav. Kūginių griovelių poveikis laikomajai galiai ir standumui[13]

Esant tokiam pačiam apkrovos lygiui, kuo didesnis kūginio griovelio kampas, tuo didesnė smeigių ašinė jėga; todėl naudojant kūginį griovelį galima efektyviai pagerinti GSC jungčių atsparumą pakilimui.

Atsižvelgiant į galimus skirtingus CLT plokščių storius, tiriama plokščių storio įtaka šlyjamajai jungčiai. Didžiausia apkrovos laikomoji galia GSC sujungimams su skirtingo storio CLT plokštėmis padidėjo nuo 85,78 kN iki 93,15 kN, kai CLT plokštės storis padidėjo nuo 75 iki 210 mm. Tai rodo, kad GSC sujungimų laikomoji galia nežymiai didėjo, kai CLT storis padidėjo nuo 75 mm iki 150

mm, tačiau, pasiekus 150 mm storį, laikomoji galia beveik nedidėja. CLT plokštės storis turi nedidelę įtaką GSC tipo jungties standumui – (žr. 26 pav.) [13].



26 pav. CLT plokštės įtaka jungties standumui[13]

1.4. Šlyjamųjų jungčių skaičiavimas pagal standartus

Medienos ir plieno kompozitinės konstrukcijos dėl savo skirtingų tarpusavio jungimo būdų skaičiuojamos naudojant įvairius standartus. Šlyjamosios varžtinės jungtys aprašomos Europos standarte - Eurokodas 5, galvelinės jungės ir varžtinės užbetonuojamos jungtys Europos standarte Eurokodas 4, bei Amerikos plieninių konstrukcijų instituto (AISC 360-16) [23-25].

1.4.1. Šlyjamųjų varžtinių jungčių skaičiavimas pagal Eurokodas 5.

Šlyties jungčių su plieninėmis plokštelėmis, kurių storis ne didesnis kaip 0,5d, laikomoji galia apskaičiuojama pagal (1.4.1.1) formulę. Jungčių su plieninėmis plokštelėmis, kurių storis yra d, laikomoji galia apskaičiuojama pagal (1.4.1.2) formulę. Varžtinės jungės charakteristinė laikomoji galia, atitinkanti vienos jungės vieną šlyties plokštumą, prilyginama mažiausiajai reikšmei. Principinė varžtinės jungties tvirtinimo schema (žr. 27 pav.) [23].

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_{1d}, 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right\} \quad (1.4.1.1)$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{f_{h,k} \cdot t_{1d} \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_{1d}^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}{2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}, \frac{f_{h,k} \cdot t_{1d}}{f_{h,k} \cdot t_{1d}} \right\} \quad (1.4.1.2)$$

čia: $F_{v,Rk}$ – vienos jungės charakteristinė laikomoji galia, kN;

$f_{h,k}$ – charakteristinis medinio elemento vietinis stipris, MPa;

t_1 – mažesnis iš dydžių: medinio šoninio elemento storis arba jungės įsmigimo gylis, mm;

t_2 – viduriniojo elemento storis, mm;

d – jungės skersmuo, mm;

$M_{y,Rk}$ – charakteristinis jungės takumo momentas, Nmm;

$F_{ax,Rk}$ – charakteristinė jungės ašinė ištraukiamoji galia MPa;

Su pluoštu lygiagrečios n varžtų eilės laikomoji galia pluošto kryptimi apskaičiuojama taikant efektyvųjį varžtų skaičių n_{ef} pagal (1.4.1.3) formulę.

$$n_{ef} = \min \left\{ n, 0,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \right\} \quad (1.4.1.3)$$

čia: a_1 – tarpas tarp varžtų pluošto kryptimi, mm;

d – varžto skersmuo, mm;

n – varžtų skaičius eilėje;



27 pav. Principinė varžtinės jungties schema [23]

1.4.2. Galvelinių jungių ir užbetonuojamų varžtų skaičiavimas pagal Eurokodas 4.

Galvelinės jungės ir užbetonuojamų varžtų (žr. 28 pav.) šlyjamoji galia nustatoma pagal (1.4.2.1) ir (1.4.2.2) formules, imant mažesnę reikšmę [24].

$$P_{Rd} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_V} \quad (1.4.2.1)$$

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot a \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_V} \quad (1.4.2.2)$$

$$a = 0,2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right), \text{ kai } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$$

$$a = 1, \text{ kai } \frac{h_{sc}}{d} \geq 4$$

čia: P_{rd} – jungės laikomoji galia, kN;

γ_v – dalinis koeficientas (1,25);

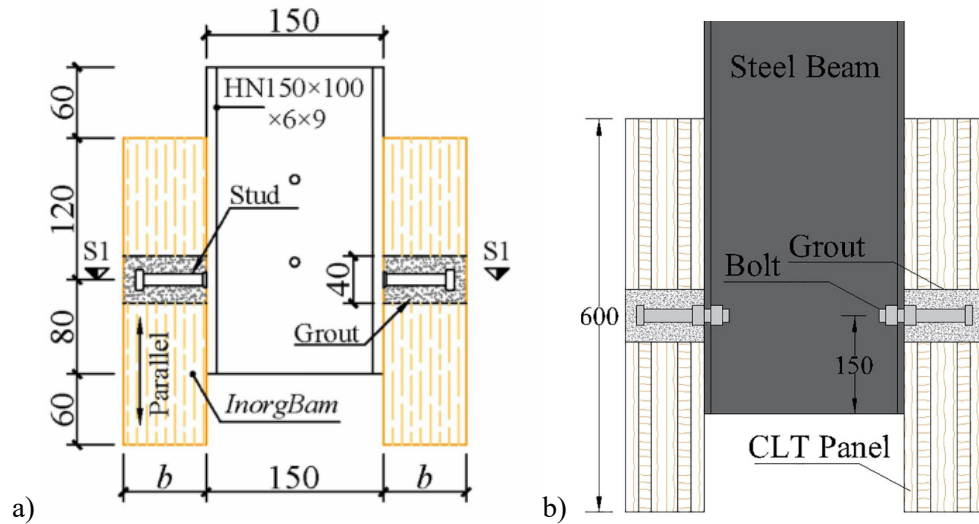
d – jungės skersmuo, mm;

f_u – jungės tempiamasis ribinis medžiagos stipris, MPa;

f_{ck} – charakteristinis cilindrinis betono gniuždomasis stipris, MPa;

h_{sc} – bendrasis jungės aukštis, mm;

E_{cm} – betono tamprumo modulis, GPa;



28 pav. Principinė jungių schema: a) Galvelinė jungė; [26] b) varžtinė užbetonuojama jungtis; [14]

1.4.3. Galvelinių jungių ir užbetonuojamų varžtų skaičiavimas pagal AISC 360-16.

Galvelinių jungių šlyjamoji galia pagal Amerikos plieninių konstrukcijų instituto standartą nustatoma naudojant (1.4.3.1) formulę [25].

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sa} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u \quad (1.4.3.1)$$

čia: Q_n – jungės laikomoji galia, kN;

A_{sa} – smeigės efektyvusis skerspjūvio plotas, mm²;

f'_c – charakteristinis cilindrinis betono gniuždomasis stipris, MPa;

E_c – betono tamprumo modulis, GPa;

f_u – jungės tempiamasis ribinis medžiagos stipris, MPa;

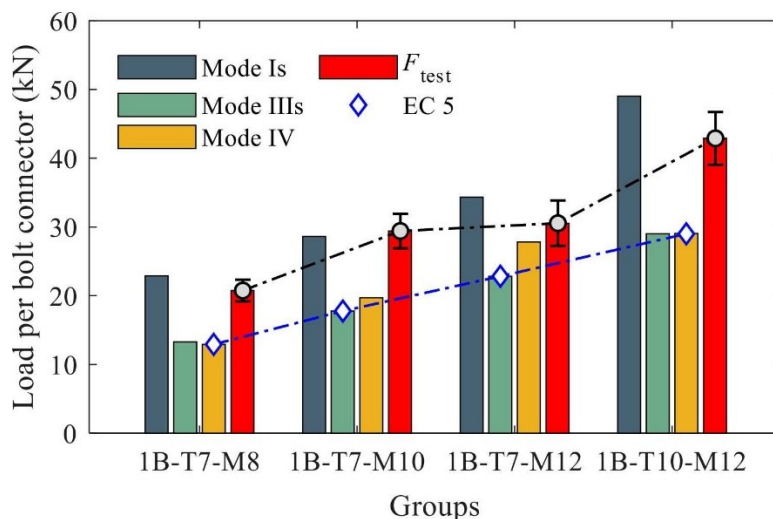
R_g ir R_p – pastovus parametras;

1.4.4. Šlyjamosios jungties skaičiavimų palyginimas

Šlyjamųjų jungčių apskaičiuota laikomoji galia yra lyginama su rezultatais, gautais atliekant išstūmimo bandymus. Priklausomai nuo padėties konstrukcijoje, šios jungtys patiria skirtingus apkrovimo lygius. Nustatyti šlyjamosios jungties laikomąją galią, buvo atliekami išstūmimo bandymai su skirtingomis šlyjamosios jungtimis. D.V. Bompas ir kt., A. Hassanieh'as ir kt., taip pat L. Chen'as ir kt., atliko bandymus, naudojant varžtines šlyjamasias jungtis, siekdami palyginti

skirtingas skaičiavimo metodikas su gautais bandymų rezultatais [27-31]. Šlyjamųjų galvelinių ir varžtinių užbetonuojamų jungčių bandymų ir skaičiavimų palyginimus atliko E. Zhao'o ir kt., S. M. Hosseini ir kt., taip pat M. Pavlovičius ir kt., [26, 32-34].

E. Zhao'o ir kt., atliko išstūmimo bandymus, o gautus rezultatus palygino su skaičiavimas pagal standartus. Remiantis Eurokodas 5 pateiktomis varžtinių šlyjamųjų sujungimų skirtingomis suirimo prielaidomis buvo atlikti bandymai, nustatyti laikomąją galią. Pagal bandymo rezultatus gautas varžtų vidutinis įtempimo stipris, kuris siekė 40,87 MPa (žr. 29 pav.) [26].



29 pav. Bandymų rezultatų palyginimas su Eurokodas 5 skaičiavimo metodika.[26]

Storos plieninės plokštės ir medienos jungčių suirimo režimai suskirstyti į tris režimus. Pirmajame režime nurodoma, kad jungtyje nesusidaro plastiniai lankstai, trečiame susidaro vienas plastinis lankstas, ketvirtame – du plastiniai lankstai. Eksperimentiniai rezultatai gauti didesni nei standarto trečio ir ketvirto suirimo režimai. Tai rodo, kad standarto prognozės linkusios būti konservatyvesnės. Standartas daro prielaidą, kad laikomoji galia yra minimali vertė esant trims suirimo režimams ir gali būti nekoreliuota su faktiniu suirimo būdu [26].

Atlikus galvelinių jungčių išstūmimo bandymus, gauti rezultatai palyginami pagal Eurokodas 5 ir AISC 360-16 standartų skaičiavimo metodiką (žr. 30 pav.).

Groups	F_{test} (kN)	EC 4		AISC 360-16	
		F_{1cal} (kN)	RE (%)	F_{1cal} (kN)	RE (%)
1S-T7-Φ10	27.91	30.36	8.8	24.19	-13.3 %
1S-T7-Φ13	37.73	51.30	36.0	40.88	8.4 %
1S-T10-Φ13	38.71	51.30	32.6	40.88	5.6 %

30 pav. Bandymų rezultatų palyginimas su Eurokodas 4 ir AISC 360-16 skaičiavimo metodika.[26]

Pagal bandymo rezultatus didžiausia laikomoji galia gauta 38,71 kN, mažiausia 27,91 kN. Apskaičiavus galvelinės jungės šlyjamąją galią pagal Eurokodas 4 gauta didžiausia laikomoji galia 51,3 kN, mažiausia 30,36 kN. Remiantis AISC 360 – 16 standartu, didžiausia laikomoji galia siekė 40,88 kN, mažiausia 24,19 kN.

Naudojant AISC 360-16 skaičiavimo metodiką gauti geresni jungties įverčiai, o prognozės pateko į 15% santykinę paklaidą. Eurokodas 4 pateikiama skaičiavimo metodika pervertino laikomąją galią, o santykinė paklaida svyravo nuo 8,8% iki 36%, ir nuo -4,8% iki 19%. Šie rezultatai rodo, AISC 360-16 standarto vertinimo metodas yra tinkamesnis galvelinių jungių skaičiavimui [26].

E. Zhao‘o ir kt., atliko dar vieną tyrimą, kuriame naudojo galvelines ir varžtines šlyjamąsias jungtis. Šiame tyrime buvo atliekamas išstūmimo bandymas, o gauti rezultatai palyginami su apskaičiuotomis reikšmėmis remiantis skirtingų standartų skaičiavimų metodikomis. Atlikus varžtinių jungčių bandymus, gauti rezultatai lyginami su Eurokodas 5 skaičiavimo metodika, kurioje taip pat įvertinami skirtingi jungties suirimo režimai (žr. 31 pav.) [17].

Group	F_{test} (kN)	$l_{ef,T}$ (mm)	$l_{ef,G}$ (mm)	F_{vJoh} (kN)			$F_{ax,Rk}/4$ (kN)	F_{cal} (kN)	F_{cal}/F_{test}
				Eq. (2a)	Eq. (2b)	Eq. (2c)			
1ST-T7-M10	69.47	45	/	90.04	41.66	38.68	7.30	45.98	0.66
1ST-T7-M12	69.51	61	/	105.64	50.73	53.11	10.51	61.24	0.88
1ST-T10-M12	113.31	75	/	157.60	70.01	53.11	12.66	65.77	0.58
1GP-T7-M10	75.26	24	21	90.04	41.66	38.68	8.96	47.65	0.63
1GP-T7-M12	78.16	40	21	105.64	50.73	53.11	12.28	63.02	0.81
1GP-T10-M12	114.78	54	21	157.60	70.01	53.11	14.40	67.51	0.59

31 pav. Bandymo metu gautų rezultatų palyginimas su Eurokodas 5 skaičiavimo metodika[17]

Pagal Eurokodas 5 skaičiavimo metodiką apskaičiuotos reikšmės lyginamos su eksperimentiniais rezultatais. F_{test} – išbandyta varžtinių jungčių maksimali laikomoji galia skirtingais atvejais, F_{cal} – apskaičiuota apkrova pagal standartą. Galima pastebėti, kad pagal standarto pateikiamą skaičiavimų metodiką nepakankamai įvertinama varžtinių ir dalinai užbetonuotų varžtinių jungčių laikomoji galia. Apskaičiuotos varžtinių jungčių laikomosios galios saugos ribos vidutiniškai siekė nuo 29% iki 32% [17].

Šio tyrimo metu buvo analizuojamos ir galvelinės užbetonuojamos šlyjamosios jungės. Bandymų rezultatai lyginami su 4 Eurokodo ir AISC 360-16 skaičiavimais (žr. 32 pav.). Atliekant skaičiavimus autoriai pažymi, kad nebuvo vertinamas skaičiavimuose dalinis saugos koeficientas γ [17].

Group	F_{test} (kN)	F_{cal} (kN)		
		GB 50017-2017	AISC 360-16	EC 4
1S-T7- Φ 10	103.23	106.31	96.81	121.49
1S-T7- Φ 13	112.68	179.66	163.62	205.32
1S-T10- Φ 13	135.91	179.66	163.62	205.32

32 pav. Rezultatų palyginimas su Eurokodas 4 ir AISC 360-16 skaičiavimo metodika.[17]

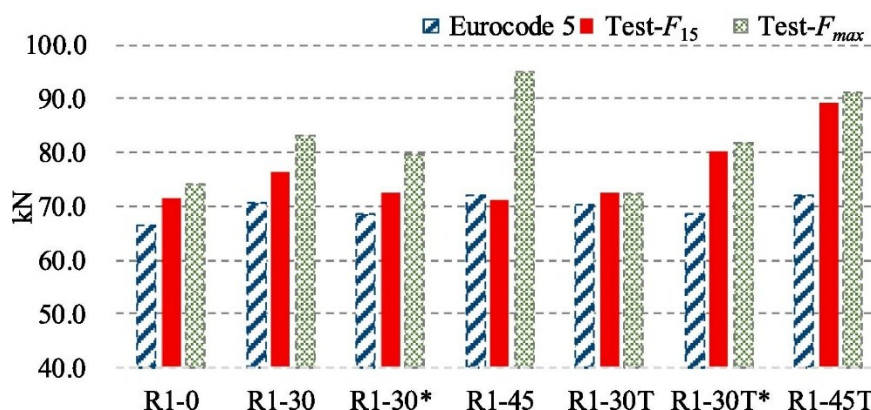
Atliktų bandymų didžiausia laikomoji galia siekė 135,91 kN, remiantis 4 Eurokodo skaičiavimais gauta laikomoji galia siekė 205,32 kN, o pagal AISC 360-16 gauta 163,62 kN. Laikomosios galios skirtumas pagal 4 Eurokodą buvo 51,06%, pagal AISC 360-16 siekė 20,38%. Pagal gautus rezultatus galima pastebėti, kad skirtingų grupių prognozuojama šlyties laikomoji galia, pagal skaičiavimus buvo pervertinta. Ši neatitikimą galėjo įtakoti priešlaikinis klijuotos medienos suirimo būdas, kuris riboja šlyjamosios jungties laikomąją galią [17].

L. Chen‘as ir kt. (žr. 33 pav.), taip pat C. L. Wang‘as ir kt. (žr. 34 pav.) atliko tyrimus su varžtinėmis šlyjamosiomis jungtimis. Gauti bandymų rezultatai buvo palyginti pagal Eurokodas 5 atliktus skaičiavimus [29, 35, 36].

Group number	Test ultimate load $F_{max,test}$ (kN)	GB		NDS-		Eurocode	
		50005–2017 (kN)	Error max(%)	2018 (kN)	Error max(%)	5 (kN)	Error max(%)
A-30–12–100	142.75	84.2	41.05	96.7	32.29	166.07	–16.33
B-50–12–100	212.24	101.1	52.35	96.7	54.46	166.07	21.75
C-70–12–100	240.88	125.0	48.10	96.7	59.87	166.07	31.05
D-50–8–100	155.44	51.4	66.92	55.8	64.11	99.28	36.13
E-50–16–100	265.34	158.6	40.24	163.6	38.34	166.07	37.41
F-50–12–150-II	257.46	101.1	60.72	96.7	62.46	183.80	33.50
F-50–12–150-III	277.65	101.1	63.57	96.7	65.19	183.80	28.61
G-50–12–200	262.20	101.1	61.43	96.7	63.14	213.83	18.44

33 pav. L. Chen‘o ir kt., bandymo ir skaičiavimų rezultatų palyginimas [29, 36]

Teoriniai skaičiavimai buvo atlikti septynioms šlyties bandinių grupėms su skirtingais parametrais. Didžiausia bandymų ribinė apkrova siekė 262,2 kN, tuo tarpu atliktų teorinių skaičiavimų pagal Eurokodas 5, to pačio bandinio reikšmė buvo 213,83 kN. Mažiausia pasiekta bandymo reikšmė buvo 142,75 kN, teorinė apskaičiuota reikmė bandinio siekė 166,07 kN. Lyginant rezultatus bandinio su mažiausiomis reikšmėmis, standarto teoriniai skaičiavimai buvo didesni nei testo bandymo, o rezultatų skirtumas buvo 16,33%. Geriausi gauti rezultatai tarp bandinio bandymo ir teorinio skaičiavimo skyrėsi 18,44%, tačiau teorinė reikšmė buvo gauta mažesnė, nei nustatyta bandymo metu [29].



34 pav. C. L. Wang'o ir kt., bandymo ir teorinių Eurokodas 5 skaičiavimų rezultatų palyginimas[35]

Chun-Lin Wang ir kitų atliktuose bandymuose matyti, kad išskyrus R1-45T grupę Eurokodas 5 rekomenduojamas skaičiavimo metodas gali geriau įvertinti maksimalią apkrovą F_{15} , esant 15 mm praslydimui. Palyginant su maksimalia apkrova F_{max} viso apkrovimo proceso metu, teoriniai skaičiavimo rezultatai yra konservatyvūs, siekiant užtikrinti konstrukcijų saugumą [35].

1.5. Literatūros analizės apibendrinimas

Išanalizavus įvairius literatūros šaltinius, galima teigti, kad medienos CLT ir plieno kompozito perdangos skirtingos šlyjamosios jungtys yra naudojamos daugelyje šalių. Atlikta nemažai tyrimų nustatyti šlyjamųjų jungčių laikomąją galią, kuriuose naudoti tiek teoriniai vertinimai pagal skirtingų standartų pateikiamas metodikas, tiek išstūmimo eksperimentiniai bandymai.

Lietuvoje, kol kas tokio tipo kompozitinės perdangos plokštės nėra nagrinėjamos, tačiau turi sąsajų su plieno – betono kompozitinėmis perdangomis. Norint išsiaiškinti kaip šlyjamosios jungtys veikia medienos – plieno kompozitinės perdangos stiprumą ir standumą, reikia atlikti daugiau naujų tyrimų ir bandymų, siekiant integruoti tokio tipo perdangas mūsų šalyje.

2. Tyrimų metodika

Pasirinktas analitinis tyrimo metodas, kuris taikomas tiriant medienos – plieno kompozitinių perdangų elgseną. Naudojant prognozavimo principus ir kompozitinės perdangos modeliavimą baigtinių elementų programa, bus analizuojama skirtingų šlyjamųjų jungčių įtaka elemento stiprumui ir standumui. Siekiant įvertinti realias konstrukcijų darbo sąlygas, bus kuriami baigtinių elementų modeliai, kurie apima įvairius šlyjamųjų jungčių tipus, geometrinius parametrus ir mechanines savybes.

Atliekant tyrimą bus remiamasi literatūros apžvalgoje aprašytais skaičiavimo metodais, pagal Eurokodas 4, AISC 360-16 standartus, taip pat analizuojamas Kinijos plieninių konstrukcijų projektavimo standartas GB 50017-2017 ir iš mokslininkų atliktų bandymų siūlomos empirinės skaičiavimo metodikos formulės. Atsižvelgiant į tai, kad antroji Eurokodų karta šiuo metu rengiama ir įsigalios nuo 2027 metų, darbe taip pat bus atliekama numatomų metodinių pakeitimų analizė, siekiant įvertinti, kaip naujoji Eurokodas 4 versija keičia šlyjamosios jungties laikomosios galios skaičiavimo metodus, kurie bus taikomi analitiniais skaičiavimams. Šie rezultatai bus lyginami su mokslininkų eksperimentiniais bandymų rezultatais, siekiant užtikrinti rezultatų tikslumą ir patikimumą. Atliekant tyrimą bus lyginama skirtingo skersmens ir mechaninių savybių galvelinių šlyjamųjų jungčių laikomoji galia.

Moksliniame darbe bus atliekama medienos – plieno kompozito perdangų analizė, naudojant baigtinių elementų programą. Baigtinių elementų metodas remiasi matematinių modelių naudojimu, kurių pagalba sprendžiamos iškiliusios problemos. Šis metodas leidžia išanalizuoti konstrukcijos elgseną tarp skirtingų jos sluoksnių, atsižvelgti į įvairias medžiagas, jų parametrus, taip pat ir apkrovų charakteristikas. Baigtinių elementų metodas leis sukurti tikslesnį supratimą apie medienos – plieno kompozitinių perdangų elgseną naudojant skirtingas šlyjamąsias jungtis.

Gauti skaičiavimų rezultatai bus palyginti su eksperimentiniais rezultatais, taip pat su skirtingomis skaičiavimo metodikomis. Palyginimas leis įvertinti skaičiavimų tikslumą, patikimumą, taip pat nustatyti, kurie metodai suteikia geresnius rezultatus nustatytose sąlygose.

2.1. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal Eurokodas 4

Šiame standarte pateikiama šlyjamosios galvelinės jungties laikomosios galios skaičiavimo metodika, pagal kurią nustatoma jungties laikomoji galia, kur iš dviejų formulių gauta, imama mažesnė reikšmė. Formulėse vertinamas jungtės plieno tempiamasis stipris, ir betono gniuždomasis stipris. Siekiant gauti skaičiavimų rezultatus, kuo artimesnius eksperimentinėms reikšmėms, nuspręsta laikyti galvelinės jungtės skaičiuotinio šlyjamojo stiprio dalinį koeficientą $\gamma_v = 1$ (Eurokodas 4, nurodo $\gamma_v = 1,25$). Bandinių parametrai yra pasirinkti remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 1 lentelėje [17].

1 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu [17]

Eil. Nr.	1	2	3	4	5
Žymėjimas	f_u	f_{ck}	E_{cm}	d	h_{sc}
Matavimo vnt.	MPa	MPa	GPa	mm	mm
I	483,4	55	35,2	10	70
II	483,4	55	35,2	13	70
III	483,4	55	35,2	13	100

Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.1.1) formulę:

$$P_{Rd} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)}{\gamma_V} = \frac{0,8 \cdot 483,4 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 10^2}{4} \right)}{1} = 30357,52 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 30,37 \text{ kN}; \quad (2.1.1)$$

Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.1.2) formulę:

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot a \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_V} = \frac{0,29 \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{55 \cdot 35,2 \cdot 10^3}}{1} = 40350,6 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 40,35 \text{ kN}; \quad (2.1.2)$$

$$a = 0,2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right), \text{ kai } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$$

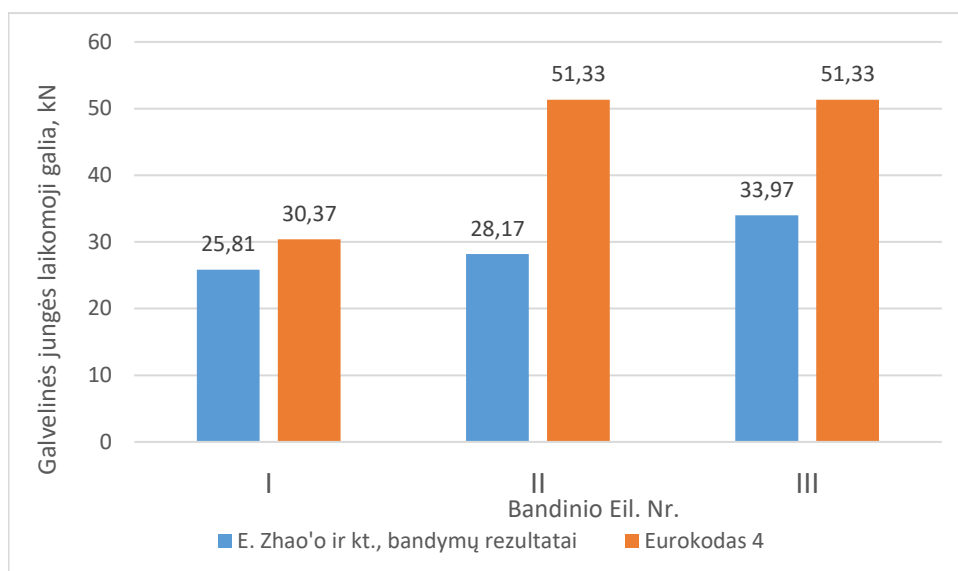
$$a = 1, \text{ kai } \frac{h_{sc}}{d} \geq 4$$

$$\alpha = 1, \text{ nes } \frac{h_{sc}}{d} = \frac{70}{10} = 7; 7 \geq 4$$

Parenkama mažesnioji reikšmė iš (2.1.1) ir (2.1.2) formulėse apskaičiuotų rezultatų. Skaičiavimai analogiškai atliekami ir su kitais bandiniais.

Atlikus skaičiavimus, 10 mm skersmens (I bandinys) jungės laikomoji galia 30,37 kN, tai yra 17,67% daugiau, nei atlikto bandymo metu gauta reikšmė. Naudojant 13 mm skersmens (II ir III bandiniai) apskaičiuota vienoda laikomoji galia yra 51,33 kN. Galima pastebėti (žr. 35 pav.), kad visais atvejais pagal Eurokas 4 gautos reikšmės yra didesnės už atliktų bandymų. Apskaičiavus II ir III bandinių laikomąją galią gauta tokia pati reikšmė, tačiau pagal atliktų bandymų rezultatus šių bandinių reikšmė skiriasi, atitinkamai II bandinio pagal Eurokodas 4 laikomoji galia gauta 82,22% didesnė, o III bandinio 60,56%. Eurokodas 4 skaičiavimo metodikoje koeficientas α įvedamas, kad atsižvelgti į jungės geometriją, kur vertinamas jos aukščio ir skersmens santykis, dėl kurio ne visa kontaktinė zona gali aktyviai perduoti šlyties jėgas (kai $3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$), tačiau pagal reikalavimus bendras jungės aukštis negali būti mažesnis kaip $3d$ (d yra jungės skersmuo), todėl jeigu šios sąlygos laikomasi, tai jungės ilgis neturi įtakos jungės stiprumui. Lyginant su atliktais bandymų rezultatais galima pastebėti, kad bendras jungės ilgis turi įtaką stiprumui ir laikomajai galiai. II bandinio bendras jungės ilgis 70 mm, o nustatyta laikomoji galia 28,17 kN, III bandinio ilgis 100mm, laikomoji galia siekė 33,97 kN.

Padidinus jungės ilgį 30 mm, laikomoji galia padidėjo 5,8 kN, kas yra 20,59%. Galima teigti, kad Eurokodas 4 skaičiavimo metodika pervertina jungės laikomąją galią, nes yra vertinama tik plieno ir betono suirimo budai.



35 pav. Eksperimentinių bandymų ir Eurokodas 4 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.2. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal 2027 metų Eurokodas 4

Nors standartas dar yra ruošiamas ir įsigalios nuo 2027 metų, jau galima rasti informacijos apie atnaujinimus ir pakeitimus. Atnaujintame standarte pateikiama šlyjamosios galvelinės jungties laikomosios galios skaičiavimo metodika, kurioje pastebėti pakeitimai. Pagal (2.2.1) formulę vertinamas plieno tempiamasis stipris, pagal (2.2.2) formulę vertinamas betono gniuždomasis stipris. Pakeitimai atlikti (2.2.2) formulėje, kur α koeficientas pakeičiamas k_{cc} koeficientu, taip pat pridodamas k_c koeficientas [37].

$$P_{Rd,s} = \frac{0.8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_v} \quad (2.2.1)$$

$$P_{Rd,c} = \frac{k_c \cdot 0.29 \cdot k_{cc} \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \quad (2.2.2)$$

čia: P_{Rd} – jungtės laikomoji galia, kN

γ_v – dalinis koeficientas, priimamas 1.0;

d – jungtės skersmuo, mm;

f_u – jungtės tempiamasis ribinis medžiagos stipris, MPa;

f_{ck} – charakteristinis cilindrinis betono gniuždomasis stipris, MPa;

E_{cm} – betono tamprumo modulis, GPa;

k_c – koeficientas įvertinantis betono būklę; kai betonas įtrūkęs $k_c = 0.8$, kai betonas neįtrūkęs $k_c = 1$;

k_{cc} – redukcijos koeficientas įvertinantis betono relaksaciją – 1;

Jungtės laikomoji galia parenkama pagal mažesnę reikšmę. Galvelinės jungtės skaičiuotinio šlyjamojo stiprio dalinio koeficiento γ_v , priimama reikšmė lygi 1.0 (Eurokodas 4, nurodo $\gamma_v = 1,25$). Bandinių parametrai yra pasirinkti remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 1 lentelėje [17].

Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.2.3) formulę:

$$P_{Rd,s} = \frac{0,8 \cdot f_{td} \cdot (\pi \cdot d^2 / 4)}{\gamma_V} = \frac{0,8 \cdot 483,4 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 10^2}{4} \right)}{1} = 30357,52 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 30,37 \text{ kN}; \quad (2.2.3)$$

Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.2.4) formulę, kai betonas be įtrūkimų:

$$P_{Rd,c} = \frac{k_c \cdot 0,29 \cdot k_{cc} \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_V} = \frac{1 \cdot 0,29 \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{55 \cdot 35,2 \cdot 10^3}}{1} = 40350,6 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 40,35 \text{ kN}; \quad (2.2.4)$$

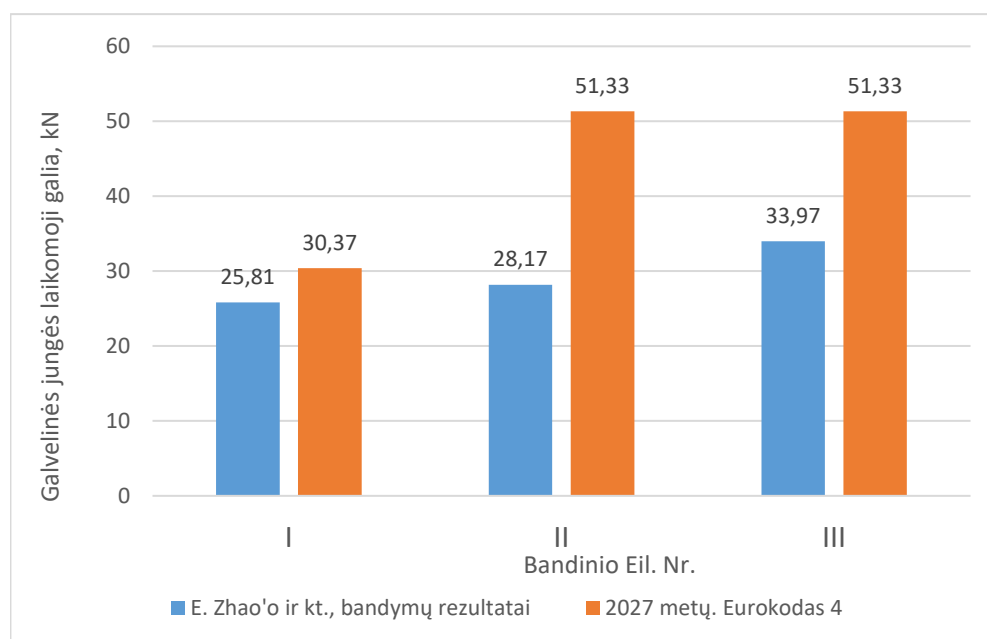
Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.2.5) formulę, kai betonas su įtrūkiais:

$$P_{Rd,c} = \frac{k_c \cdot 0,29 \cdot k_{cc} \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_V} = \frac{0,8 \cdot 0,29 \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{55 \cdot 35,2 \cdot 10^3}}{1} = 32280,53 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 32,28 \text{ kN}; \quad (2.2.5)$$

Skaiciuojant jungės laikomąją galią priėmus, kad betonas yra su įtrūkiais, jungės laikomoji galia sumažinama 20%, tačiau imant mažesniąją reikšmę iš (2.2.3) ir (2.2.4 – 2.2.5) formulių, mažesnė reikšmė gaunama plieno suirimo atveju.

Atlikus skaičiavimus 10 mm skersmens (I bandinys) jungės laikomoji galia 30,37 kN, tai yra 17,67% daugiau, nei bandymo metu gauta reikšmė. Naudojant 13 mm skersmens (II ir III bandiniai) apskaičiuota vienoda laikomoji galia yra 51,33 kN.

2027 m. Eurokodas 4 standarte, taip pat kaip ir šiuo metu naudojamo standarto skaičiavimų rezultatai gauti identiški (žr. 36 pav.). Galima pastebėti, kad ir naujajame Eurokodas 4 standarte nėra vertinama galvelinės jungės ilgio įtaka laikomajai galiai nustatyti, tačiau pagal atnaujintus reikalavimus, bendras jungės aukštis negali būti mažesnis kaip 3,9d (d yra jungės skersmuo). Galima teigti, kad naujos kartos Eurokodas 4 skaičiavimo metodika taip pat pervertina jungės laikomąją galią ir reikšmingų pakeitimų neatlikta, tačiau yra galimybė įvertinti laikomąją galią kai betonas yra su įtrūkiais.



36 pav. Eksperimentinių bandymų ir 2027 metų Eurokodas 4 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.3. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal AISC 360-16

Standarte pateikiama šlyjamosios galvelinės jungties laikomosios galios skaičiavimo metodika, pagal kurią vertinamas jungtės plieno tempiamasis stipris ir betono gniuždomasis stipris. R_g ir R_p koeficientai parenkami pagal galvelinių jungių tvirtinimo sąlygas. R_g koeficiento galimos reikšmės 1; 0.8; 0.7. R_p koeficiento galimos reikšmės 0.75, 0.6, gauta jungtės laikomoji galia imama mažesnė reikšmė. Bandinių parametrai yra pasirinkti remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 1 lentelėje [17, 25].

Galvelinės jungtės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.3.1) formulę:

$$Q_n = (0,5 \cdot A_{sa} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}) \leq (R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u) \quad (2.3.1)$$

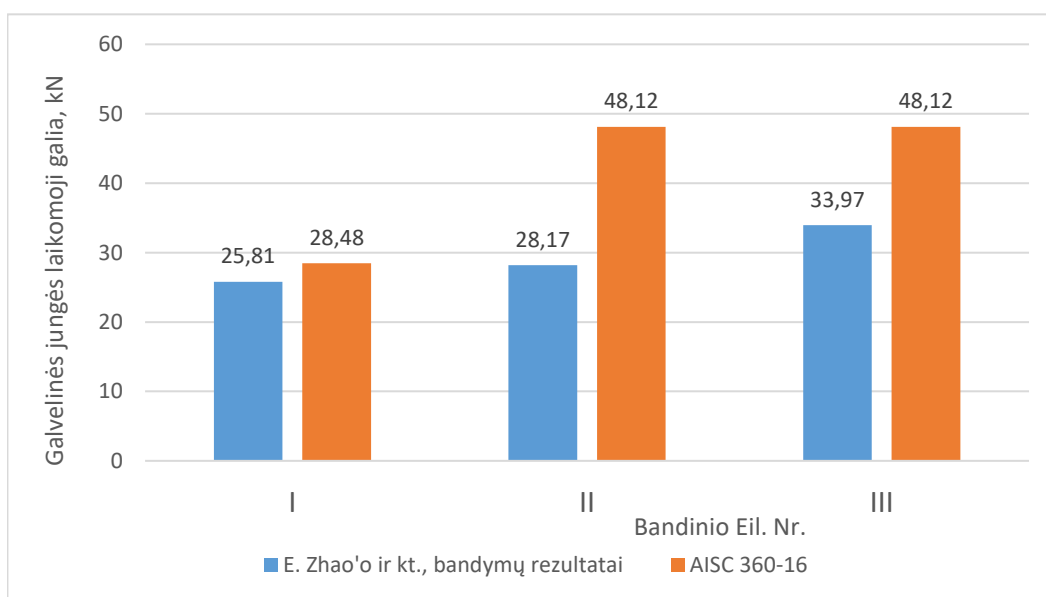
$$Q_n = (0,5 \cdot 78,54 \cdot \sqrt{55 \cdot 35,2 \cdot 10^3}) \leq (0,85 \cdot 0,75 \cdot 78,54 \cdot 483,4) = 54640 \text{ N} \geq 28475 \text{ N}$$

$$Q_n = 54640 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 54,62 \text{ kN} \geq 28475 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 28,48 \text{ kN}$$

$$Q_n = 28,48 \text{ kN}$$

Parenkama mažesnioji reikšmė iš formulėje apskaičiuotų rezultatų. Skaičiavimai analogiškai atliekami ir su kitais bandiniais.

Remiantis gautais rezultatais, 10 mm skersmens (I bandinys) jungtės laikomoji galia 28,48 kN, tai yra 10,34% didesnė nei nustatyta eksperimentiniu būdu. Naudojant 13 mm skersmens (II ir III bandiniai) apskaičiuota laikomoji galia buvo 48,12 kN. Galima pastebėti (žr. 37 pav.), kad visais atvejais pagal AISC 360-16 apskaičiuotos reikšmės yra didesnės už eksperimentinius rezultatus. II ir III bandinių laikomoji galia gauta vienoda, tačiau pagal atliktų bandymų rezultatus šių bandinių reikšmė skiriasi, atitinkamai II bandinio pagal AISC 360-16 laikomoji galia gauta 70,82% didesnė, o III bandinio 41,65%. Pažymėtina, kad šio standarto metodika taip pat neįvertina jungtės ilgio įtakos laikomajai galiai nustatyti. Galima teigti, kad šio standarto skaičiavimo metodika turi polinkį pervertinti jungties laikomąją galią.



37 pav. Eksperimentinių bandymų ir AISC 360-16 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.4. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal GB50017-2017 standartą

Tai Kinijos plieninių konstrukcijų projektavimo nacionalinis standartas, kuriame nustatomi konstrukcijų projektavimo reikalavimai plieno ir betono kompozitiniams elementams. Šio standarto galvelinių jungčių skaičiavimo metodika panaši į Eurokodas 4 ir AISC 360-16 standartų pateikiamas metodikas. Pagal šio standarto skaičiavimo metodiką vertinamas plieno tempiamasis ir betono gniuždomasis stipriai, o gauta reikšmė imama mažesnė. Bandinių parametrai yra pasirinkti remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 1 lentelėje [17, 38].

Galvelinės jungtės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.4.1) formulę:

$$N_v = 0,43 \cdot A_{sa} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq 0,7 \cdot A_{sa} \cdot F_u \quad (2.4.1)$$

$$N_v = (0,43 \cdot 78.54 \cdot \sqrt{55 \cdot 35,2 \cdot 10^3}) \leq (0,7 \cdot 78.54 \cdot 483.4)$$

$$N_v = 46990 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 46.99 \text{ kN} \geq 26576,3 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 26.58 \text{ kN}$$

$$N_v = 26.58 \text{ kN}$$

čia: N_v – jungtės laikomoji galia, kN;

A_{sa} – smeigės efektyvusis skerspjūvio plotas, mm²;

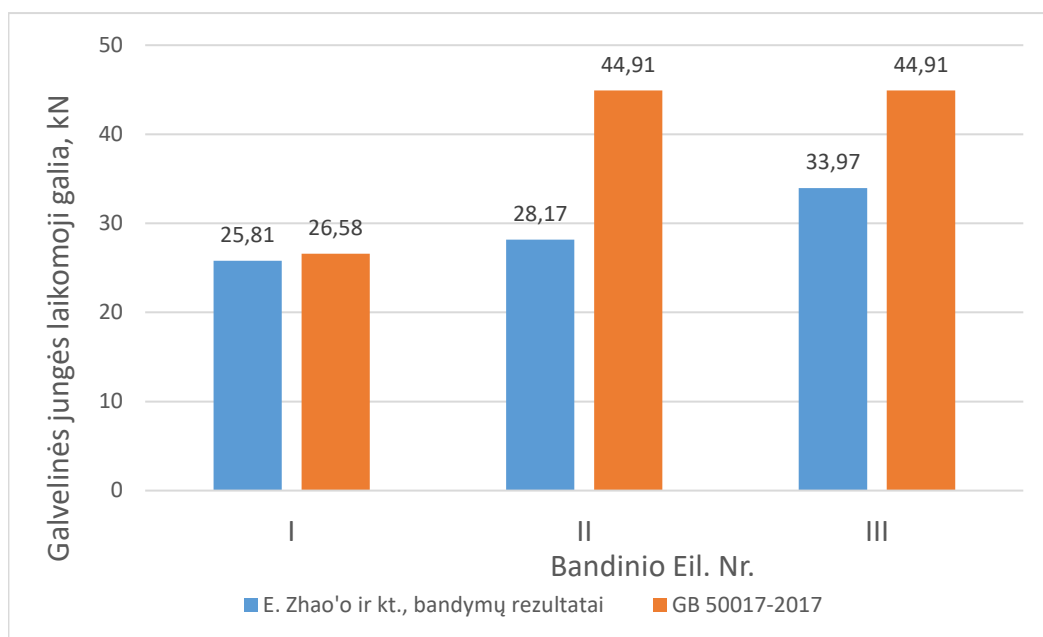
f'_c – charakteristinis cilindrinis betono gniuždomasis stipris, MPa;

E_c – betono tamprumo modulis, GPa;

f_u – jungtės tempiamasis ribinis medžiagos stipris, MPa;

Apskaičiuota jungtės laikomoji galia nustatoma parenkant mažesnę reikšmę iš dviejų formulėje gautų reikšmių.

Apžvelgiant skaičiavimų rezultatus, 10 mm skersmens (I bandinys) jungtės laikomoji galia 26,58 kN, tai yra 2,98% didesnė nei nustatyta eksperimentiniu būdu (25,81 kN). Naudojant 13 mm skersmens (II ir III bandiniai) apskaičiuota laikomoji galia buvo 44,91 kN. Galima pastebėti (žr. 38 pav.), kad visais atvejais pagal standartą apskaičiuotos reikšmės yra didesnės už eksperimentinius rezultatus. II ir III bandinių apskaičiuota laikomoji galia yra vienoda, tačiau pagal atliktų bandymų rezultatus šių bandinių reikšmė skiriasi, atitinkamai II bandinio laikomoji galia gauta 59,42% didesnė, o III bandinio 32,2%. Nors metodika pateikia artimus rezultatus mažesnio skersmens jungtims, tačiau didesnio skersmens jungčių laikomoji galia yra pervertinama. Taip pat metodikoje neįtraukti parametrai, susiję su jungties ilgiu, kuris pagal eksperimentus turi įtakos laikomajai galiai.



38 pav. Eksperimentinių bandymų ir GB 50017 – 2017 skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.5. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal E. Zhao'o ir kt., skaičiavimo metodiką

Pagal atliktus bandymus E. Zhao'o ir kt., pastebėjo, kad užbetonuotas skiedinio blokas veikia kaip svirtis, kai įvyksta galvelinės jungės plastinė deformacija. Viršutinė ir apatinė bloko dalys suspaudžia CLT plokštę, dėl to atsiranda plokštės deformacijos kontakto zonose. Norėdami ištirti CLT plokštės vietinį gniuždymą medžio ir plieno užbetonuojamoje galvelinėje jungtyje tyrėjai pasiūlė supaprastintą teorinę formulę, skirtą numatyti jungties laikomąją galią, atsižvelgiant į CLT plokštės suirimo būdą, taikomą apvalioms užbetonuojamoms skylėms. Skiedinio bloko suirimas ir CLT plokštės suirimas atsirastų tada, kai galvelinė jungė pasiektų ribinę apkrovą. Gniuždymo įtempis viršutiniame skiedinio bloko paviršiuje apskaičiuojamas pagal momentų balanso principus, kaip parodyta (2.5.1) formulėje. Gniuždymo įtempis skiedinio apatiniame paviršiuje σ_{lower} lygus klijuotos medienos gniuždymo stipriui, lygiagrečia pluošto kryptimi [17].

$$\sigma_{upper} = \frac{\sigma_{lower}}{2} - \frac{3 \cdot M_{y,Rk}}{D \cdot b^2} \quad (2.5.1)$$

čia: σ_{lower} – gniuždymo įtempis apatiniame skiedinio bloko paviršiuje, MPa;

σ_{upper} – gniuždymo įtempis viršutiniame skiedinio bloko paviršiuje, MPa;

$M_{y,Rk}$ – charakteristinis jungės takumo momentas, Nmm;

D – skiedinio bloko skersmuo, mm;

b – CLT plokštės storis, mm [17];

Charakteristinis jungės takumo momentas apskaičiuojamas pagal Eurokodas 5 pateiktą metodiką, kaip parodyta (2.5.2) formulėje.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} \quad (2.5.2)$$

čia: f_u – jungės tempiamasis ribinis medžiagos stipris, MPa;

d – jungės skersmuo, mm [23];

Jungės laikomoji galia apskaičiuojama pagal (2.5.3) formulę.

$$f_v = \frac{(\sigma_{lower} - \sigma_{upper})}{2} \cdot D \cdot b \quad (2.5.3)$$

Bandinių parametrai pasirinkti remiantis E. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti lentelėje [17].

2 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis E. Zhao'o ir kt., siūloma skaičiavimo metodika [17]

Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Žymėjimas	f_u	f_{ck}	E_{cm}	d	h_{sc}	$f_{c,par}$	D	b
Matavimo vnt.	MPa	MPa	GPa	mm	mm	Mpa	mm	mm
I	483,4	55	35,2	10	70	41,5	30	70
II	483,4	55	35,2	13	70	41,5	30	70
III	483,4	55	35,2	13	100	41,5	30	100

Charakteristinio takumo momento skaičiavimas pagal (2.5.4) formulę

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 483,4 \cdot 10^{2,6} = 57733,5 \cdot 10^{-3} N \cdot mm = 57,73 kN \cdot mm \quad (2.5.4)$$

Gniuždymo įtempio viršuje skaičiavimas pagal (2.5.6) formulę

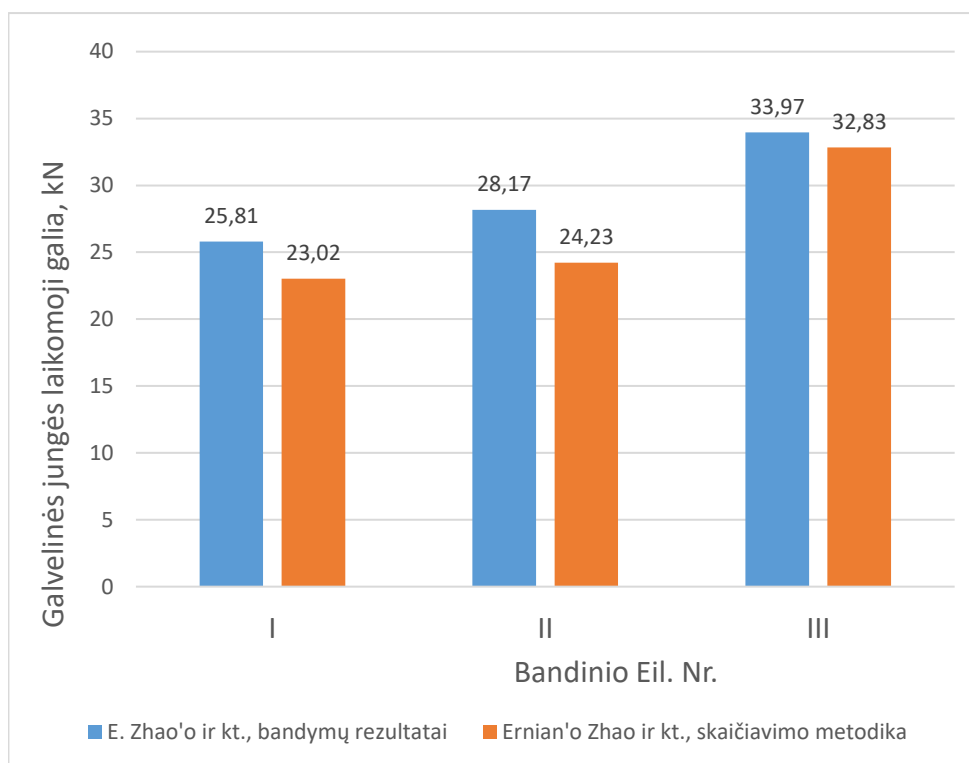
$$\sigma_{upper} = \frac{\sigma_{lower}}{2} - \frac{3 \cdot M_{y,Rk}}{D \cdot b^2} = \frac{41,5}{2} - \frac{3 \cdot 57733,5}{30 \cdot 70^2} = 19,57 MPa \quad (2.5.6)$$

Jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.5.7) formulę.

$$f_v = \frac{(\sigma_{lower} - \sigma_{upper})}{2} \cdot D \cdot b = \frac{(41,5 - 19,57)}{2} \cdot 30 \cdot 70 = 23023,5 \cdot 10^{-3} N = 23,02 kN \quad (2.5.7)$$

Skaičiavimai analogiškai atliekami ir su kitais bandiniais.

Pagal gautus rezultatus, 10 mm skersmens (I bandinys) jungės laikomoji galia 23,02 kN, tai yra 10,81% mažesnė nei nustatyta eksperimentiniu būdu (25,81 kN). Naudojant 13 mm skersmens (II bandinys) apskaičiuota laikomoji galia 24,23 kN, kuri yra mažesnė 13,99% nei gauta bandymo metu (28,17 kN). III bandinio laikomoji galia gauta 32,83 kN, kai bandymo metu nustatyta reikšmė 33,97 kN. III bandinio laikomoji galia mažesnė 3,36 %. Pastebima (žr. 39 pav.), kad skaičiavimo metodikos gauti rezultatai glaudžiai sutampa su eksperimentiniais rezultatais, didžiausias skirtumas siekė 13,99%. Tyrėjų siūloma teorinė formulė, paremta įtempių pusiausvyros ir skiedinio bloko deformacijų modelių tikslingai prognozuoja jungties laikomąją galią, įvertinant klijuotos medienos plokštės storio įtaką ir skiedinio bloko skersmenį.



39 pav. Eksperimentinių bandymų [26] ir E. Zhao'o ir kt., skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.6. Šlyjamosios jungties laikomosios galios analizė pagal Ding'o ir kt., skaičiavimo metodiką

Siekdami nustatyti galvelinių jungių laikomąją galią Ding'as ir kt., atliko eksperimentinius išstūmimo bandymus, tirdami jungių suirimo būdus, apkrovos ir poslinkio santykį. Remiantis eksperimentiniais rezultatais buvo sukurtas skaitmeninis modelis ir atlikti išsamūs parametriniai tyrimai, įvertinantys betono stiprumo, jungės takumo ribos, skersmens ir ilgio santykio kitimą konstrukcijos eksploatacinėmis savybėmis. Naudojant eksperimentinius ir skaitmeninius rezultatus tyrėjai pasiūlė naują galvelinės jungės laikomosios galios nustatymo empirinę formulę, kurioje jungės skersmuo kinta nuo 16mm iki 30, takumo riba kinta nuo 345 MPa iki 500 MPa, o betono gniuždomasis stipris kinta nuo 20 MPa iki 100 MPa. Tyrėjų siūlomas galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pateiktas (2.6.1) formulėje [39].

$$P_u = (0,2 \cdot d^{1,7} - 10) \cdot f_{cu}^{0,8-0,15 \cdot \ln(d-10)} \cdot (0,002 \cdot f_y + 0,24) \quad (2.6.1)$$

čia: P_u – jungės laikomoji galia, kN;

f_{cu} – charakteristinis (kubinis) betono gniuždomasis stipris, MPa;

f_y – plieno stipris pagal takumo ribą, MPa;

d – jungės skersmuo, mm;

Bandinių parametrai pasirinkti remiantis Ding'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 3 lentelėje [39].

3 lentelė. Skaičiavimo duomenys remiantis Ding'o ir kt., siūloma skaičiavimo metodika [39]

Eil. Nr.	1	2	3
Žymėjimas	f_{cu}	f_y	d
Matavimo vnt.	MPa	MPa	mm
I	33,1	380	16
II	33,1	380	19
III	33,1	380	22

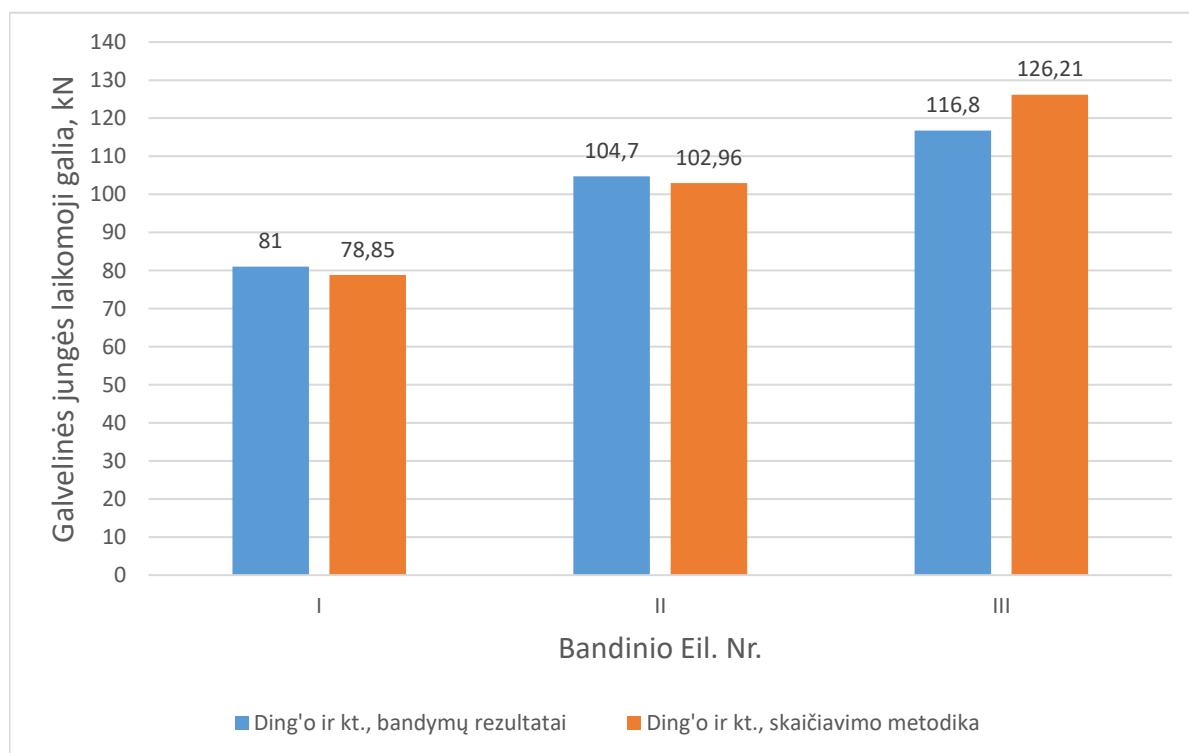
Galvelinės jungės laikomosios galios skaičiavimas pagal (2.6.2) formulę.

$$P_u = (0,2 \cdot d^{1,7} - 10) \cdot f_{cu}^{0,8-0,15 \cdot \ln(d-10)} \cdot (0,002 \cdot f_y + 0,24) \quad (2.6.2)$$

$$P_u = (0,2 \cdot 16^{1,7} - 10) \cdot 33,1^{0,8-0,15 \cdot \ln(16-10)} \cdot (0,002 \cdot 380 + 0,24) = 78,85 \text{ kN}$$

Skaičiavimai analogiškai atliekami su kitais bandiniais.

Pagal gautus rezultatus, 16 mm skersmens (I bandinys) jungės laikomoji galia 78,85 kN, tai yra 2,65% mažesnė nei nustatyta eksperimentiniu būdu (81 kN). Naudojant 19 mm skersmens (II bandinys) apskaičiuota laikomoji galia 102,96 kN, kuri yra mažesnė 1,66% nei gauta bandymo metu (104,7 kN). Apskaičiuota III bandinio laikomoji galia 126,21 kN, kuri 8,06% yra didesnė už bandymo metu nustatytą reikšmę 116,8 kN. Pastebima (žr. 40 pav.), kad I ir II bandinių gauti rezultatai glaudžiai sutampa su eksperimentiniais, tačiau III bandinio laikomoji galia yra pervertinta. Tyrėjų siūloma teorinė formulė, su mažesnio skersmens jungėmis yra konservatyvi, reikšmės artimos eksperimentiniams rezultatams. Didesnio skersmens jungės laikomoji galia pervertinta, tai gali turėti įtakos dėl formulėje taikomo logaritminio nario.



40 pav. Eksperimentinių bandymų ir Ding'o ir kt., skaičiavimo metodikos rezultatų palyginimas

2.7. Šlyjamosios jungties laikomosios galios skaičiavimų metodikos palyginimas

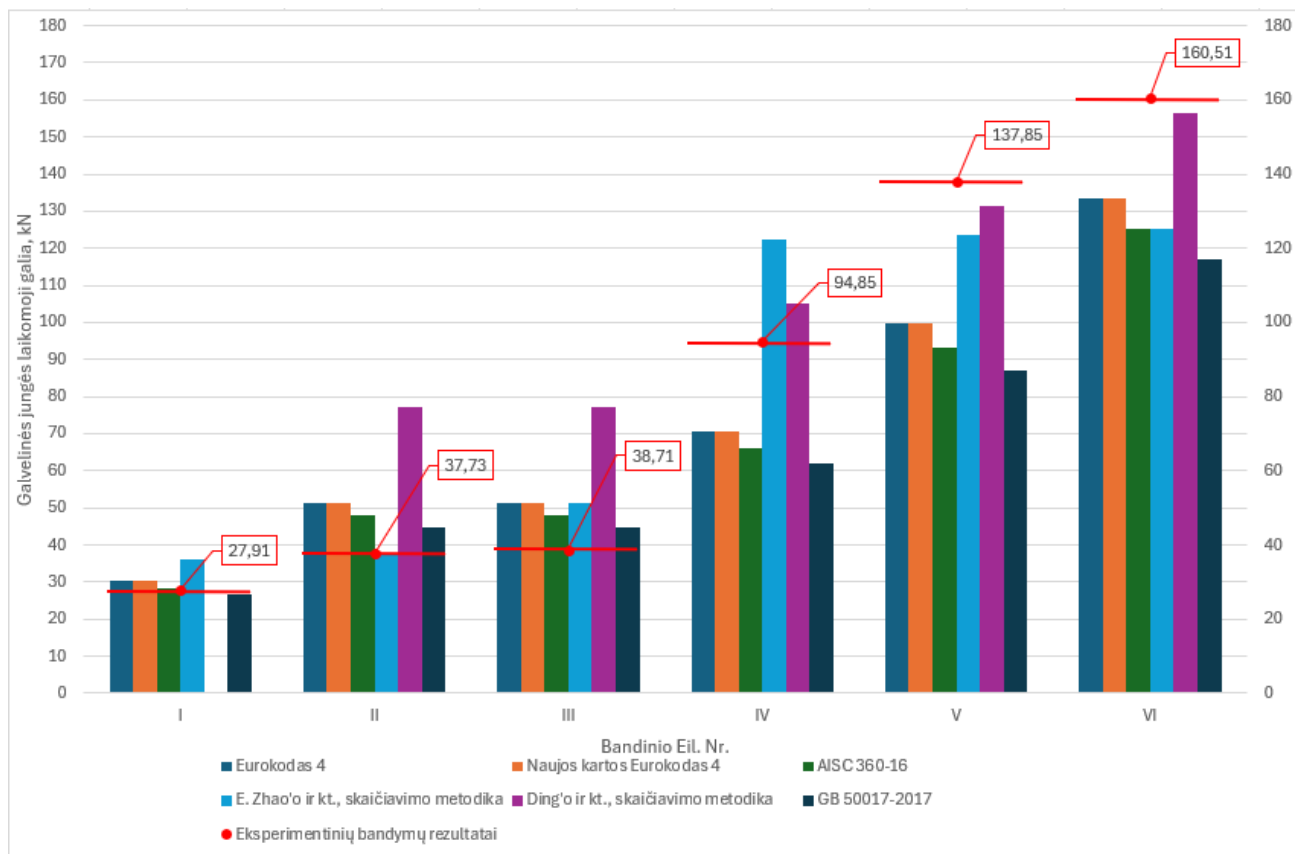
Projektuojant konstrukcijas naudojamos skaičiavimo metodikos, kuriose dažniausiai remiamasi atliktų eksperimentiniu rezultatais. Siekiant patikrinti teorinius kriterijus, kuriais aprašomi deformacijų ir įtempių būviai, naudojami eksperimentiniai bandymai. Dėl sudėtingų suirimo procesų, jungčių konfigūracijos, teoriškai išvesti skaičiavimo metodai gali būti netikslūs, todėl reikalinga juos patikrinti atliekant eksperimentinius bandymus.

Galvelinės jungtės laikomosios galios skaičiavimo metodų palyginimas leis įvertinti, kuris iš metodų yra tinkamiausias praktiniam pritaikymui. Remiantis atliktais eksperimentiniais išstūmimo bandymais, rezultatai lyginami su teoriškai apskaičiuotomis reikšmėmis, naudojant anksčiau paminėtas skaičiavimo metodikas. Norint apskaičiuoti jungtės šlyties laikomąją galią, reikia žinoti bandinių parametrus, kurie pasirenkami remiantis mokslinėmis publikacijomis [26, 40]. Išanalizavus publikacijas, rezultatų palyginimui buvo pasirinkti 6 skirtingi bandiniai, kurių pagrindinės charakteristikos pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimo rezultatų palyginimui pasirinktų bandinių parametrai.

Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Žymėjimas	f_u	f_y	f_{ck}	f_{cu}	E_{cm}	d	h_{sc}	$f_{c,par}$	D	b
Matavimo vnt.	MPa	MPa	MPa	MPa	GPa	mm	mm	Mpa	mm	mm
I	483,4	412,7	69,5	55,6	35,2	10	60	49,68	40	70
II	483,4	412,7	69,5	55,6	35,2	13	60	49,68	40	70
III	483,4	412,7	69,5	55,6	35,2	13	90	49,68	40	100
IV	439,14	342,32	82,32	65,86	34,97	16	100	66,8	60	120
V	439,14	342,32	82,32	65,86	34,97	19	100	66,8	60	120
VI	439,14	342,32	82,32	65,86	34,97	22	100	66,8	60	120

Pasirinktos skaičiavimo metodikos patikimumas nustatytas remiantis apskaičiuotu šlyjamosios jungties laikomosios galios nuokrypiu nuo eksperimentiškai gautos bandinio reikšmės (žr. 41 pav.).



41 pav. Eksperimentinių bandymų ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas

Analizuojant rezultatus pateiktus 41 pav., galima pastebėti, kad nuo I iki III bandinių, visos skaičiavimo metodikos pervertino jungčių laikomąją galią. Artimiausi rezultatai gauti analizuojant I bandinį, tačiau laikomoji galia buvo pervertinta. Didžiausias neatitikimas nustatytas naudojant Ding'o ir kt., skaičiavimo metodiką. Artimiausi rezultatai nustatyti naudojant AISC 360-16 ir Eurokodas 4 skaičiavimo metodikomis. Vertinant IV ir VI bandinių rezultatus, skaičiavimo metodikos laikomąją galią įvertino konservatyviau.

Ding'o ir kt., siūloma metodika beveik 2 kartus pervertino 13 mm ir 16 mm skersmens galvelinių jungių laikomąją galią lyginant su eksperimentinėmis ir kitomis skaičiavimo metodikomis, kai 19 mm ir 22 mm jungių laikomoji galia buvo artimiausia atliktiems bandymams. Kitos skaičiavimo metodikos 10 mm ir 13 mm jungių laikomąją galią taip pat pervertino, tačiau 16 mm 19 mm ir 22 mm jungių laikomoji galia buvo nuvertinta.

E. Zhao'o ir kt., pateikta skaičiavimo metodika įvertina CLT plokštės suirimo būdą, dėl kurio gaunami tikslesni rezultatai. Naudojant bandinius su mažesnio (70 mm) storio CLT plokštė nagrinėtų standartų skaičiavimo metodikos pervertina jungės laikomąją galią, nes yra vertinama tik plieno arba betono suirimo būdai. Šis neatitikimas gali būti siejamas su CLT plokštės priešlaikiniu suirimu, dėl kurio sumažėja jungės laikomoji galia. Padidinus plokštės storį, jungės laikomoji galia padidėja, sumažinama plokštės suirimo tikimybė.

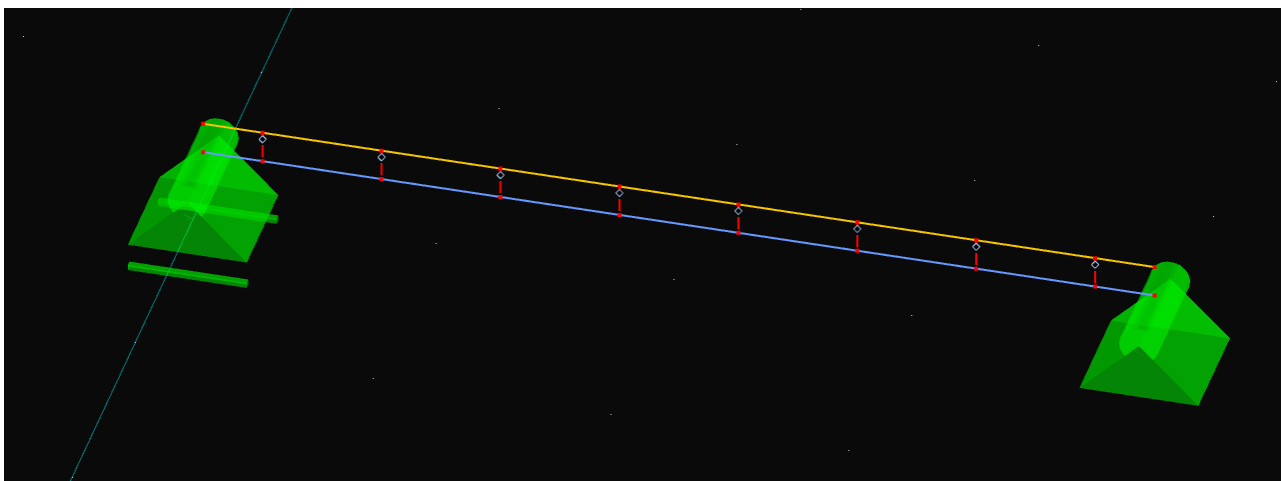
Norit kuo tiksliau nustatyti jungės laikomąją galią, reikėtų vertinti ne tik plieno ir betono suirimo būdus, tačiau ir galimą CLT plokštės suirimą, kuris gali turėti reikšmingos įtakos jungės laikomajai galiai – bei rezultatų tikslumui. Remiantis skaičiavimų rezultatais, kai plokštės storis 100 mm, jungių

laikomoji galia vertinama konservatyviau, gaunamos mažesnės reikšmės nei atliktų eksperimentų. Skaičiuojant tokio tipo šlyjamosios jungties laikomąją galią pagal standartus, galima būtų įvesti papildomą kintamąjį, kuris įvertintų ne tik betono ir plieno suirimą, tačiau ir kryžmai klijuotos medienos plokštės gniuždomąjį stiprį.

2.8. Kompozitinės perdangos modeliavimo principai

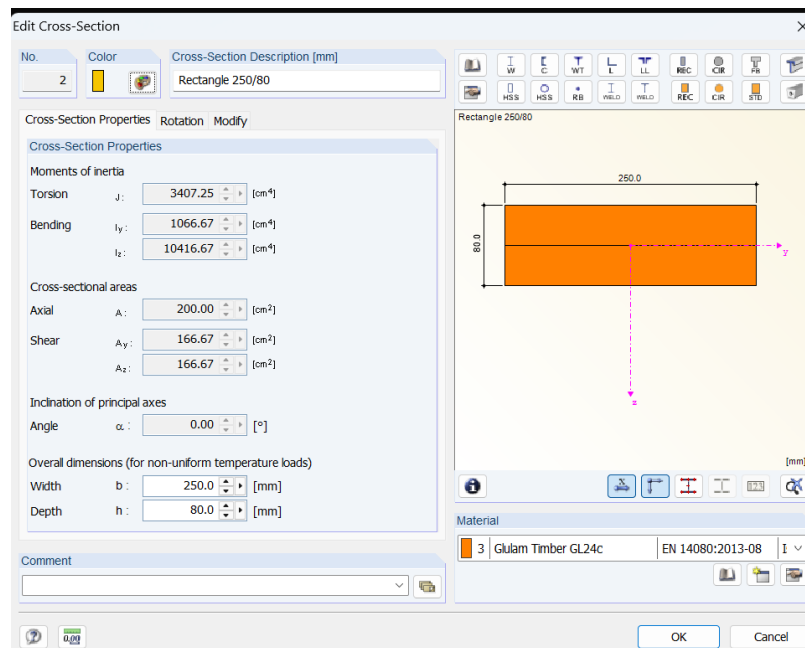
Medžio ir plieno kompozitinės perdangos modeliavimui DLUBAL RFEM 5 programoje nėra daug pritaikytų metodų. Projektuojant tokio tipo konstrukciją, svarbiausias aspektas yra teisingas elementų tarpusavio sujungimas, ir šlyjamosios jungties standumo aprašymas. Pasirinktoje programos versijoje šlyjamosios jungtys modeliuojamos kaip standūs ryšiai (angl. Rigid links). Standūs ryšiai naudojami sujungti elementus tarpusavyje, kai elemente yra atstumas tarp apkrovos ir veikimo linijos, atramos ir skerspjūvio sunkio centro. Naudojant standžius ryšius visi deformacijų skirtumai tarp jo galų yra eliminuojami, todėl pasisukimai galiniuose mazguose yra vienodi, poslinkiai perduodami be santykinės deformacijos, vidinės jėgos perduodamos tiesiogiai.

RFEM modelyje paviršiai gali būti modeliuojami kaip dvimatės plokštumos, kurių storis pasirenkamas pagal kompozitinės plokštės sudėtį, arba kaip linijinis elementas, kurio savybės aprašomos per skerspjūvio charakteristikas. Elemento tipo pasirinkimas priklauso nuo konstrukcijos geometrijos ir projektavimo tikslų. Šie elementai tarpusavyje gali būti sujungti standžiais ryšiais, kurių pagalba galima atlikti skirtingų elementų analizę.



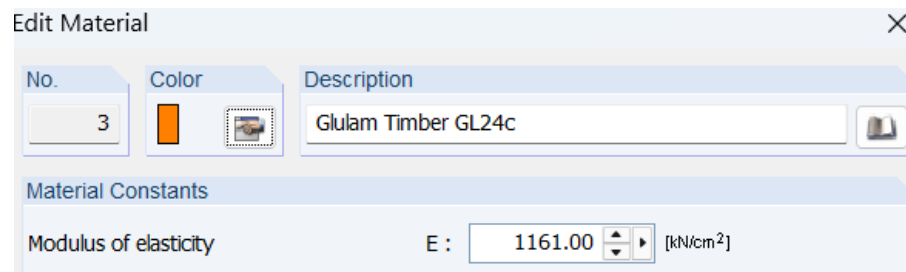
42 pav. Kompozitinės perdangos plokštės skaičiuojamoji schema, naudojant linijinius elementus

CLT plokštė baigtinių elementų programoje modeliuojama kaip linijinis elementas, kurio savybės aprašomos per skerspjūvio charakteristikas. Pagal atliktą eksperimentinį bandymą, nustatomi plokštės plotis ir aukštis (žr. 43 pav.).



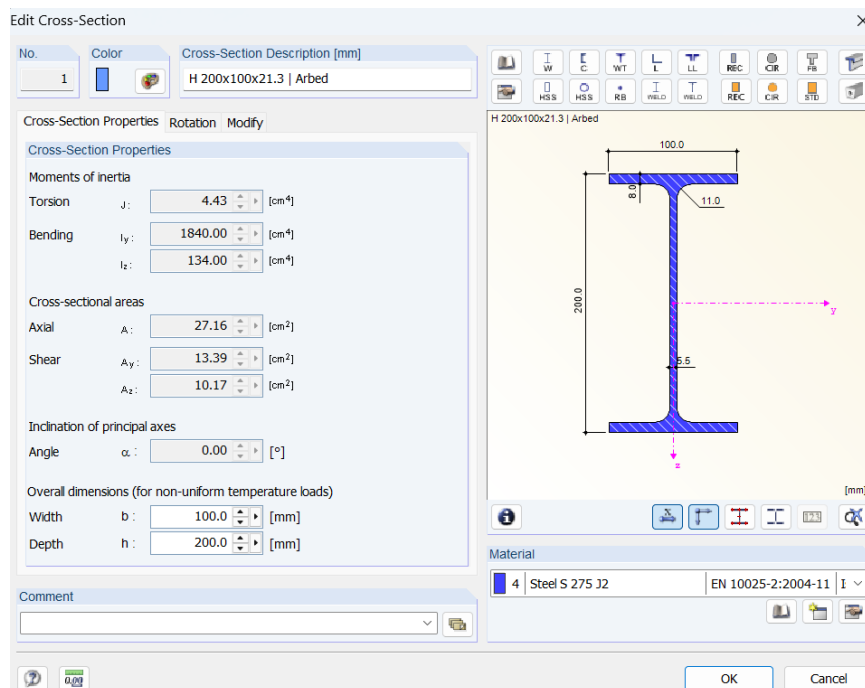
43 pav. CLT plokštės skerspjūvio nustatymas

Nustačius skerspjūvio charakteristikas, pasirenkama medžiaga, iš kurios sudarytas elementas. Programoje medžiagos pasirinkimas nėra sudėtingas, tačiau tiesioginės CLT plokštės medžiagos nėra, todėl pasirenkama alternatyvi medžiaga, o jos pagrindinės charakteristikos aprašomos rankiniu būdu (žr. 44 pav.).



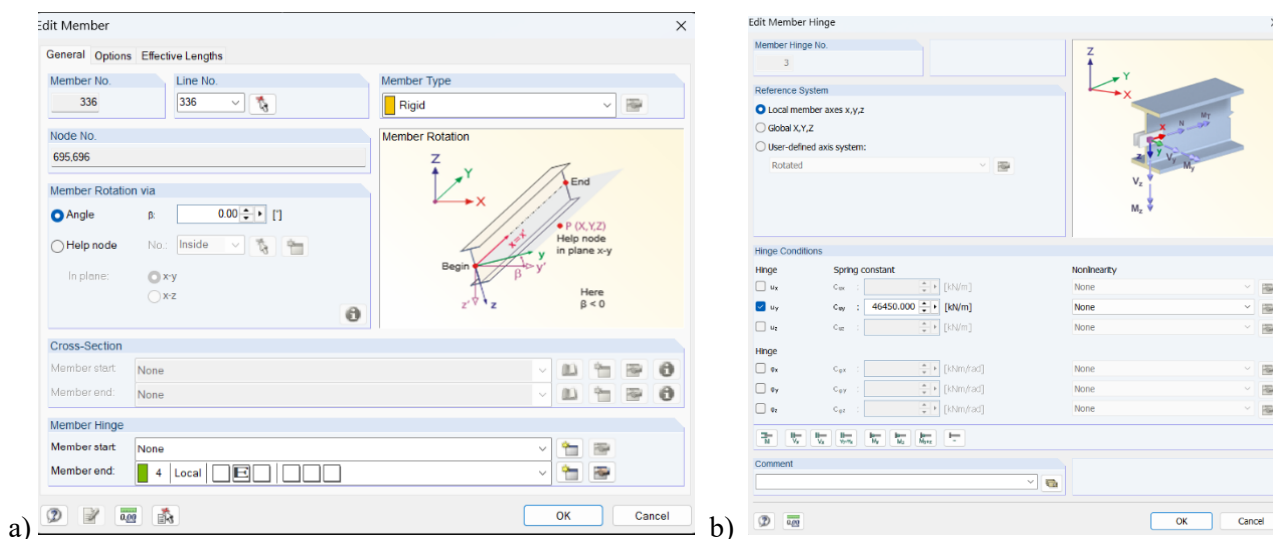
44 pav. CLT plokštės tamprumo modulio nustatymas

Plieninė sija baigtinių elementų programoje modeliuojama kaip ir CLT plokštė. Skerspjūvis pasirenkamas iš profilių bibliotekos, o plieno klasė atitinkamai iš medžiagų katalogo (žr. 45 pav.).



45 pav. Plieninės sijos skerspjūvio ir medžiagiškumo nustatymas

Nustačius pagrindines projektuojamų elementų charakteristikas, virš plieninės sijos sumodeliuojama CLT plokštė. Plieninės sijos ir plokštės sąveika modeliuojama pasitelkiant standaus ryšio elemento tipą, kuris sukuria idealų ryšį tarp plokštės mazgo ir sijos ašies. Tiriami jungtis nėra visiškai standi šlyties kryptimi, todėl standaus ryšio pabaigos taške – toje pusėje, kuri sujungta su plokšte, įvedamas dalinis atlaisvinimas naudojant „Member hinge“ funkciją. Atlaisvinimas taikytas vietinei elemento poslinkio kryptiai, atitinkančiai šlyties deformacijų kryptį kompozitinėje perdangoje. Priskirtas spyruoklinis standumas, kuris apibūdina realios jungties standumą, o likę laisvės laipsniai elemente išlaikomi standūs (žr. 46 pav.).



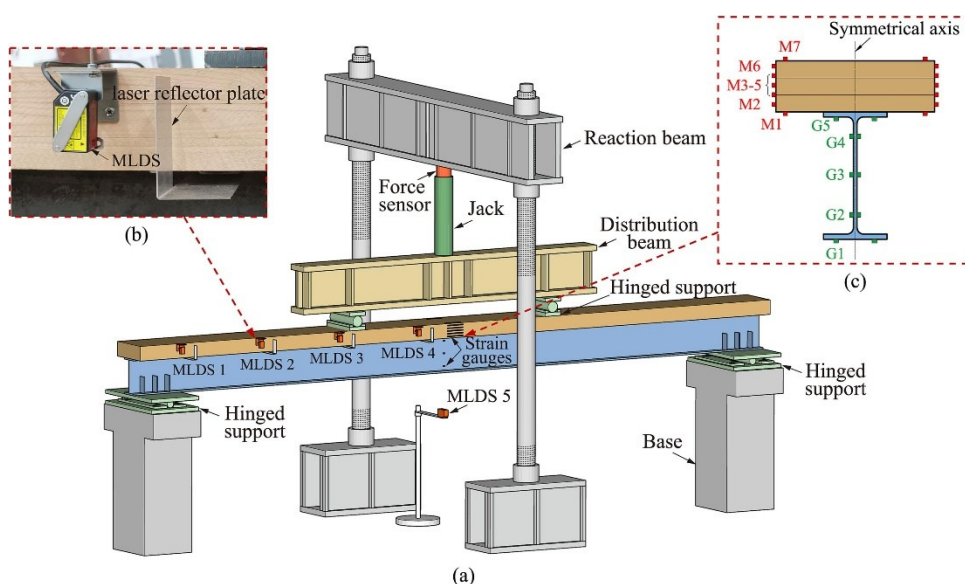
46 pav. Jungties charakteristikos: a) standaus ryšio elementas, b) standaus ryšio poslinkio spyruoklinis standumas

Apkrovų modeliavimas RFEM programoje panašus kaip ir kitose baigtinių elementų skaičiavimo programose. Nustatytos apkrovos yra priskiriamos skaičiuojamajame modelyje suprojektuotoms konstrukcijoms.

2.8.1. Skaičiuojamojo modelio validacija

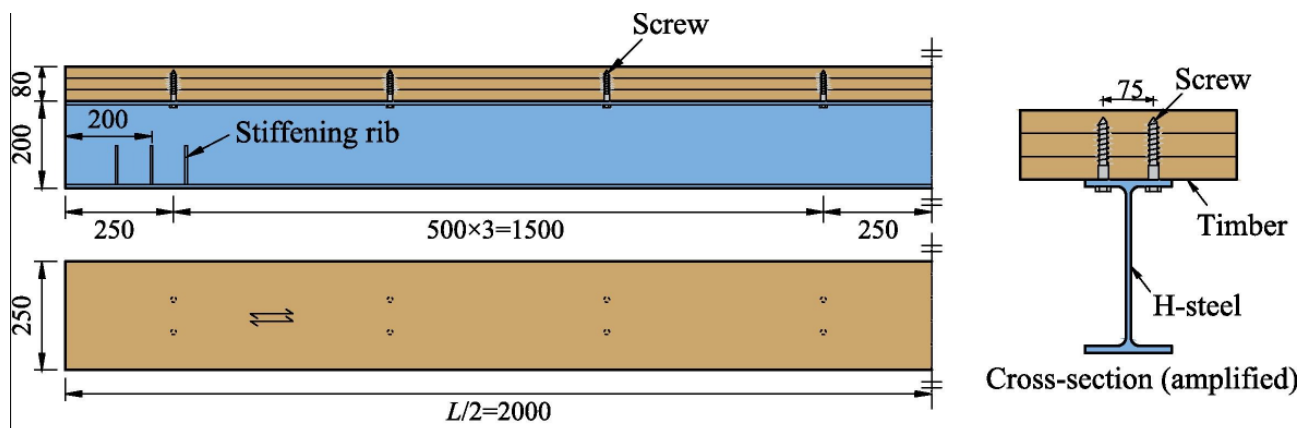
Šiuolaikinėje inžinerinėje praktikoje įvairių konstrukcijų analizė grindžiama skaitiniais metodais. Didėjant konstrukcijų įvairumui, geometrijos sudėtingumui, baigtinių elementų skaičiuojamieji modeliai tampa pagrindiniu įrankiu konstrukcijų elgsenai prognozuoti. Baigtinių elementų pagrindu sukurtos programinės įrangos yra tikslios, tačiau jų tikslumas priklauso, kaip taisyklingai ir patikimai yra sukurtas skaičiavimo modelis. Modelio patikimumas lemia, ar skaitinė analizė atspindi konstrukcijos darbą, apkrovų perdavimą ir deformacijas. Netinkamai parinkti elementų tipai, klaidingi elementų sujungimai, medžiagiškumas gali lemti dideles rezultatų paklaidas. Šios klaidos gali ne tik iškreipti rezultatus, bet ir nulemti neteisingus projektavimo sprendimus, kurie gali turėti neigiamus padarinius visam statiniui.

Y. Zhao'o ir kt., atliko eksperimentinį medžio ir plieno kompozitinių perdangų tyrimą, kurio metu siekė nustatyti šlyjamųjų jungčių standumo įtaką kompozitinės perdangos stiprumui ir standumui. Analizuojant skirtingų standumų šlyjamąsias jungtis, buvo atlikti keturių taškų lenkimo bandymai (žr. 47 pav.) [11].



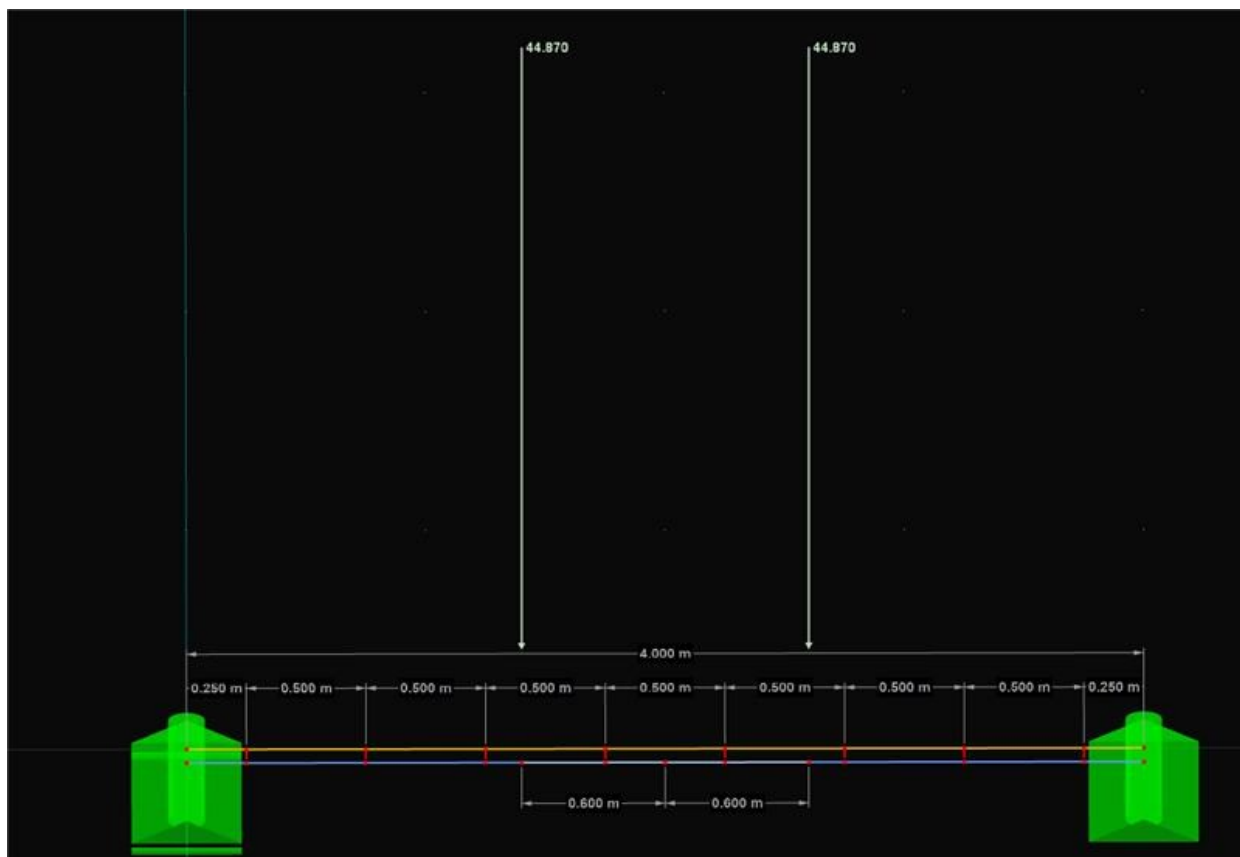
47 pav. Kompozitinės perdangos keturių taškų lenkimo bandymas[11]

Eksperimento metu buvo naudojama CLT plokštė, H profilio plieninė sija ir trijų tipų varžtinės šlyjamosios jungtys. CLT plokštės plotis 250 mm, aukštis 80 mm, nustatytas vidutinis tamprumo modulis lygiagrečiai pluošto siekė $11,61 \cdot 10^3$ MPa, gniuždomasis stipris atitinkamai 41,34 MPa. Bandymo metu naudota H profilio 4 m plieninė sija, kurios aukštis 200 mm, plotis 100 mm, sienelės storis 5,5 mm, flanšo storis 8mm, plieno markė S275. Šlyjamųjų jungčių standumas 46,45 kN/mm, 68,93 kN/mm ir 55,18 kN/mm. Bandinyje jungės išdėstytos žingsniu, kas 500mm, nuo sijos galų atitraukiant 250mm, dviem eilėmis (žr. 48 pav.) [11].



48 pav. Kompozitinės perdangos bandinys[11]

Analizuojant kompozitinę perdangą, naudojama iš eksperimentinių bandymų gauta didžiausia jėga, kuri buvo nustatyta pasiekus plieninės sijos takumo ribą. Kompozitinės perdanga apkraunama dviem taškinėmis jėgomis siekiant atitikti eksperimentinių bandymų metu atliktus lenkimo bandymus. Perdangos skaičiuojamoji schema pateikta 49 pav.



49 pav. Kompozitinės perdangos skaičiuojamoji schema

Bandinių parametrai pasirinkti remiantis Y. Zhao'o ir kt., atliktu tyrimu ir pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Eksperimentinių bandymų ir baigtinių elementų skaičiavimo rezultatų palyginimui pasirinktų bandinių parametrai [11].

Eil. Nr.	1	2	3
Žymėjimas	k_s	F	u
Matavimo vnt.	kN/mm	kN	mm
STC – S	46,45	89,74	20,31
STC – GP	68,93	100,91	21,34
STC – EP	55,18	95,19	21,55

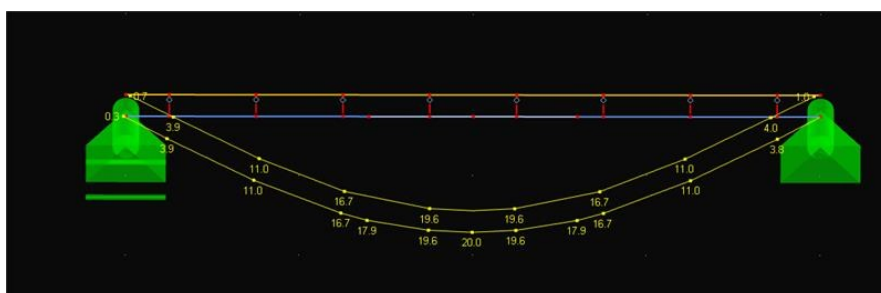
k_s – jungties standumas kN/mm;

F – apkrovos jėga, kN;

u – kompozitinės sijos įlinkis, mm.

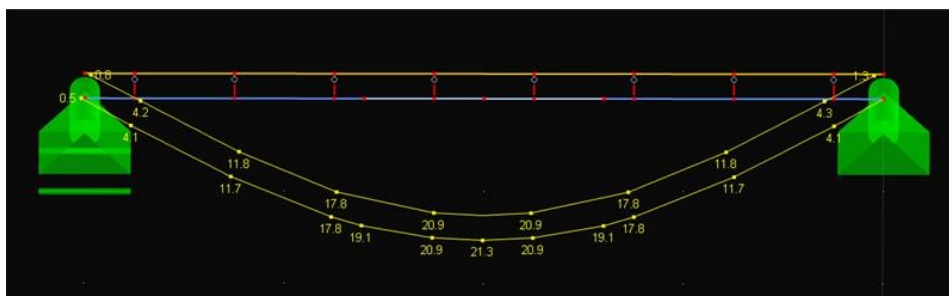
STC – šlyjamųjų jungčių bandinių žymėjimas pagal mokslinę publikaciją;

Atlikus kompozitinės perdangos analizę baigtinių elementų programa DLUBAL, naudojant šlyjamąją jungtį STC – S, gautas vidurio tarpatramio įlinkis 20 mm (žr. 50 pav.). Eksperimentinių bandymu metu šios jungties vidurio tarpatramio įlinkis siekė 20,31 mm. Analizuojant kompozitinę perdangą DLUBAL programa, nustatyta 1,53% mažesnė deformacija nei eksperimento metu.



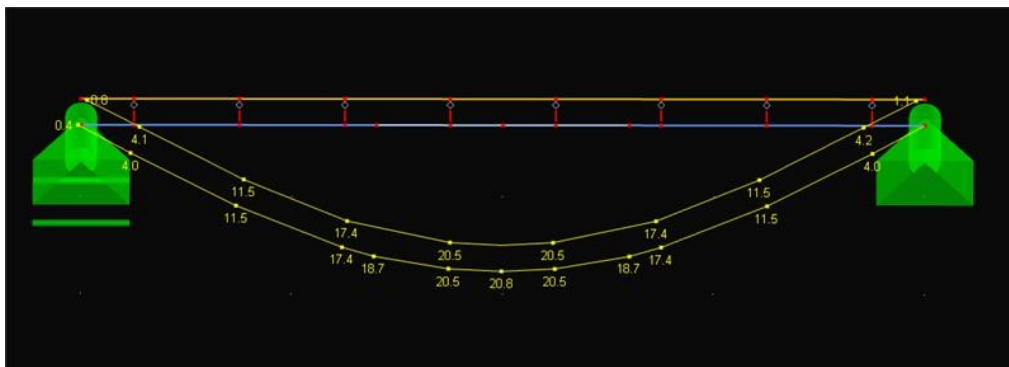
50 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – S vidurio tarpatramio įlinkis

Išanalizavus kompozitinę perdangą baigtinių elementų programa DLUBAL, naudojant šlyjamąją jungtį STC – GP, gautas vidurio tarpatramio įlinkis 21,3 mm (žr. 51 pav.). Eksperimentinių bandymu metu šios jungties vidurio tarpatramio įlinkis siekė 21,34 mm. Baigtinių elementų prognozuotas įlinkis praktiškai sutampa su eksperimento metu išmatuotu įlinkiu.



51 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – GP vidurio tarpatramio įlinkis

Kompozitinės perdangos, kurioje naudojamos STC – EP šlyjamosios jungtys, baigtinių elementų programa nustatytas vidurio tarpatramio įlinkis 20,8 mm – (žr. 52 pav.). Eksperimento metu šios perdangos įlinkis gautas 21,55 mm. Baigtinių elementų programa nustatytas įlinkis 3,48% yra mažesnis už eksperimentinio bandymo reikšmę.



52 pav. Bandinio su šlyjamosiomis jungtimis STC – EP vidurio tarpatramio įlinkis

Skaiciuojamojo modelio patikimumas vertinamas lyginant baigtinių elementų analizės ir eksperimentinių bandymų rezultatus. Atlikus trijų skirtingų bandinių palyginimą, DLUBAL programa, nustatyta, kad kompozitinės perdangos vidurio tarpatramio įlinkiai gauti mažesni, arba labai artimi, lyginant su eksperimentiniais bandymų rezultatais. Naudojant STC – S šlyjamąsias jungtis, kompozitinės perdangos nustatytas įlinkis buvo 1,48% mažesnis, išanalizavus STC – GP jungties įtaką gautas 0,2% mažesnis įlinkis, taip pat STC – EP jungties deformacija gauta 3,48% mažesnė už eksperimentinių bandymų reikšmes. Rezultatų skirtumui įtakos galėjo turėti naudojamos CLT plokštės vidutinės tamprumo modulio reikšmės. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad sudarytas skaitinis modelis patikimai įvertina kompozitinės konstrukcijos elgseną, o nustatyti nuokrypiai yra nedideli. Remiantis šiomis prielaidomis, skaičiuojamąjį modelį galima laikyti tinkamu tolimesnei medžio ir plieno kompozitinės perdangos analizei.

2.9. Kompozitinės perdangos atskirų elementų analizė

Medžio ir plieno kompozitinė perdanga yra sudaryta iš kelių medžiagų, turinčių skirtingas charakteristikas, kurių poveikis bendram konstrukcijos darbui taip pat skiriasi. Naudojant baigtinių elementų skaičiavimo programinę įrangą, galima išanalizuoti šias konstrukcijas veikiančias jėgas, nustatyti nuo apkrovos atsirandančias deformacijas. Atskirų perdangos elementų – CLT plokštės ir plieninių sijų laikomoji galia ir standumas nagrinėjami atskirais etapais, o šlyjamųjų jungčių įtaka kompozitinei perdangai vertinama papildomai.

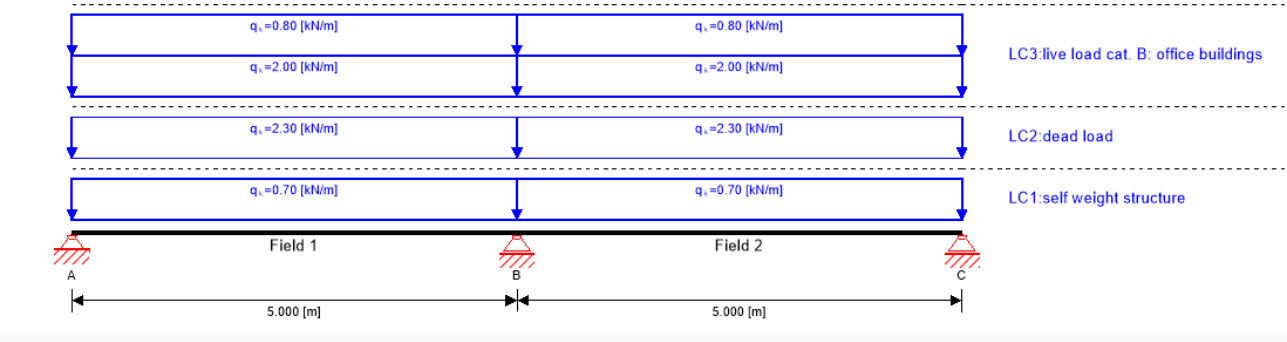
2.9.1. CLT plokštės projektavimas

Siekiant atlikti išsamią CLT plokštės analizę, projektavimas buvo atliktas naudojant programinę įrangą „Calculatis by StoraEnso“, kurioje galima projektuoti įvairių tipų medinius elementus. Perdangos plokštės analizė atlikta naudojant grindų ir stogų (angl. floor and roof) elementų projektavimo metodiką. Plokštė modeliuota kaip daugiaatramis linijinis elementas (1 m pločio juosta), dirbantis skersine kryptimi tarp atramų. Atramos vaizduoja plokštės atrėmimą ant plieninės sijos. Skaiciavimams taikytos nuolatinės ir kintamos apkrovos. Atliekant plokštės analizę buvo patikrinti saugos ir tinkamumo ribiniai būviai.

CLT plokštės analizė atlikta pagal 6 lentelėje pateiktus duomenis ir 53 pav pateiktą skaičiuojamąją schemą.

6 lentelė. CLT plokštės skaičiavimo duomenys

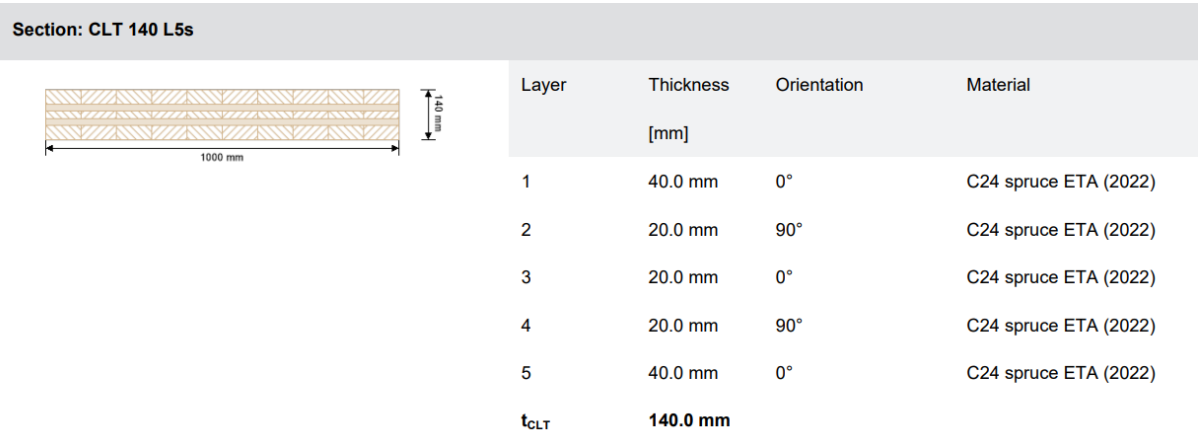
Aprašymas	Parametras
Plokštės tarpatramis	5 m
Nuolatinės apkrovos	CLT plokštės savasis svoris – pagal plokštę; Grindų detalė – 2,3 kN/m ² ;
Kintamos apkrovos	Naudojimo B kategorija – 2 kN/m ² ; Pertvaros 0,8 kN/m ² ;
Ribinis įlinkis nuo visų apkrovų	L/300



53 pav. Perdangos plokštės skaičiuojamoji schema

CLT plokštės sluoksnių sudėtis ir mechaninės savybės parinktos remiantis gamintojo techniniais duomenimis. Vidurinių sluoksnių lamelės laikytos suklijuotos per briaunas.

Atlikus CLT plokštės analizę, parinktas bendras 140 mm storio skerspjuvis, kurį sudaro 5 sluoksniai, medienos atskirų lamelių klasė C24, išorinių sluoksnių storis 40 mm, vidurinių sluoksnių storis 20 mm (žr. 54 pav.).



54 pav. CLT plokštės skerspjuvio charakteristikos

Gauti rezultatai parodė, kad vertinant stiprumo sąlygą, plokštės išnaudojimas siekė 51 %. Vertinant pagal tinkamumo ribinį būvį, plokštės išnaudojimas charakteristinio derinio atveju siekė 73 %, o ilgalaikių deformacijų 90 % (žr. 55 pav.).

Global utilization ratio		
ULS	51 %	ULS Fire 0 %
		SLS 90 %

55 pav. CLT plokštės išnaudojimas pagal ULS ir SLS

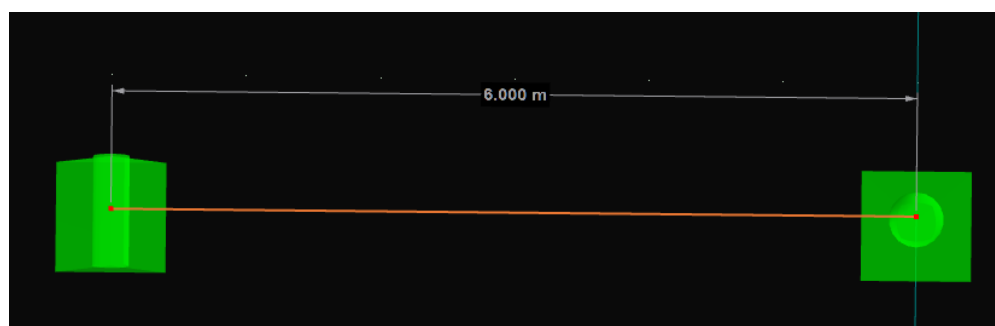
Pagal stiprumo sąlygą plokštės skerspjūvis nėra pilnai išnaudojamas, tačiau vertinant bendrą konstrukcijos išnaudojimą, jis siekia 90 %. Parinkta CLT plokštė tenkina abi sąlygas, o gauti rezultatai rodo, kad plokštė gali būti naudojama tolimesniam kompozitinės perdangos ir plieninės sijos projektavimui.

2.9.2. Plieninės sijos projektavimas

Siekiant atlikti išsamią plieninės sijos analizę, projektavimas buvo atliktas naudojant programinę įrangą DLUBAL RFEM 5. Plieninė dviatramė sija modeliuojama kaip linijinis elementas. Pasirinktas H formos IPE skerspjūvis, kurio ilgis 6 m. Pagrindiniai parametrai pateikiami 7 lentelėje, skaičiuojamoji schema pateikta 56 pav.

7 lentelė. Plieninės sijos skaičiavimo duomenys

Aprašymas	Parametras
Sijos plieno klasė	S355
Sijos tarpatramis	6 m
Nuolatinės apkrovos	Plieninės sijos savasis svoris – pagal profilį; CLT plokštės savasis svoris – 0,7 kN/m ² ; Grindų detalė – 2,3 kN/m ² ;
Kintamos apkrovos	Naudojimo B kategorija – 2 kN/m ² ; Pertvaros 0,8 kN/m ² ;
Ribinis įlinkis nuo visų apkrovų	L/300



56 pav. Plieninės sijos skaičiuojamoji schema

Plieninės sijos analizė atliekama naudojant DLUBAL, RF-STEEL EC3 elementų modulį. Šis modulis skirtas plieninių konstrukcijų skerspjūvių ir strypinių elementų projektavimui, remiantis Eurokodas 3 konstrukcijų projektavimo standartu. Modulis leidžia atlikti plieninių elementų analizę pagal saugos ir tinkamumo ribinius būvius. Remiantis atlikta CLT plokštės analize ir skaičiuojamąja schema, plieninė sija apkraunama linijinėmis apkrovomis naudojant plokštės įtakos plotį, kuris yra 5 m.

Atlikus plieninės sijos analizę baigtinių elementų programa pagal pasirinktus parametrus, nustatytas optimalus sijos skerspjūvis IPE360. Plieninės sijos saugos ribiniam būviui išnaudojimas siekia 49 %, tačiau vertinant tinkamumo ribinį būvį, pasirinktos plieninės sijos išnaudojimas padidėja iki 76% (žr. 57 pav.).

CA1 - Design of steel members : ▾

2.1 Design by Load Case

Input Data

- General Data
- Materials
- Cross-Sections
- Intermediate Lateral Restraints
- Effective Lengths - Members
- Serviceability Data
- Parameters - Members

Results

- Design by Load Case
- Design by Cross-Section
- Design by Member
- Design by x-Location
- Governing Internal Forces by Member
- Parts List by Member

Load- ing	A	B	C	D	E	F	G
	Description	Member No.	Location x [m]	Design Ratio		Design According to Formula	DS
	Ultimate Limit State Design						
RC8	ULS (STR/GEO) - Permane	545	3.000	0.49	≤ 1	CS181) Cross-section check - Bending, shear and axial force acc. to 6.2.9.1	PT
	Serviceability Limit State Design						
RC7	RC1/p + 0.3RC2 + RC3	545	3.000	0.58	≤ 1	SE401) Serviceability - Combination of actions 'Characteristic' - z-direction	SC
RC9	SLS - Characteristic	545	3.000	0.76	≤ 1	SE401) Serviceability - Combination of actions 'Characteristic' - z-direction	SC
RC10	SLS - Frequent	545	3.000	0.42	≤ 1	SE402) Serviceability - Combination of actions 'Frequent' - z-direction	SF
RC11	SLS - Quasi-permanent	545	3.000	0.39	≤ 1	SE403) Serviceability - Combination of actions 'Quasi-permanent' - z-direction	SQ

Max: 0.76 ≤ 1

Details - Member 545 - x: 3.000 m - RC8

- Material Properties - Steel S 355 J2 | EN 10025-2:2004-11
- Cross-Section Properties - IPE 360 | Euronorm 19-57
- Design Internal Forces
- Cross-Section Classification - Class 1
- Design Ratio

	My,Ed	177.32	kNm		
Moment					
Yield Strength	fy	35.50	kN/cm ²		3.2.1
Partial Factor	γM0	1.000			6.1
Moment Resistance	Mpl,y,Rd	362.10	kNm		Eq. (6.13)
Shear Force	Vz,Ed	0.00	kN		
Effective Shear Area	Av,z	35.11	cm ²		6.2.6(3)
Shear Force Resistance	Vpl,z,Rd	719.57	kN		Eq. (6.18)
Criterion Vz,Ed / Vpl,z,Rd	vz	0.000		≤ 0.5	6.2.10(2)
Axial Force	NEd	8.93	kN		
Cross-Sectional Area	A	72.70	cm ²		
Axial Force Resistance	Npl,Rd	2580.85	kN		Eq. (6.6)
Web Heights	hw	334.6	mm		
Web Thickness	tw	8.0	mm		
Criterion 1	n	0.003		≤ 0.25	(6.33)
Criterion 2	nw	0.009		≤ 0.50	(6.34)
Moment Resistance	Mpl,y,Rd	362.10	kNm		Eq. (6.13)
Design Component for My	ηMy	0.49		≤ 1	(6.31)

11 - IPE 360 | Euronorm 19-57

Calculation Details... Nat. Annex... Graphics OK Cancel

57 pav. Plieninės sijos CLT plokštės išnaudojimas pagal ULS ir SLS

Pagal saugos ribinio būvio sąlygą sijos skerspjūvis nėra pilnai išnaudojamas, tačiau vertinant bendrą konstrukcijos išnaudojimą, jis siekia 76 %. Pasirinkta plieninė sija tenkina abi sąlygas, o remiantis gautais rezultatais plieninė sija gali būti naudojama tolimesniam kompozitinės perdangos projektavimui.

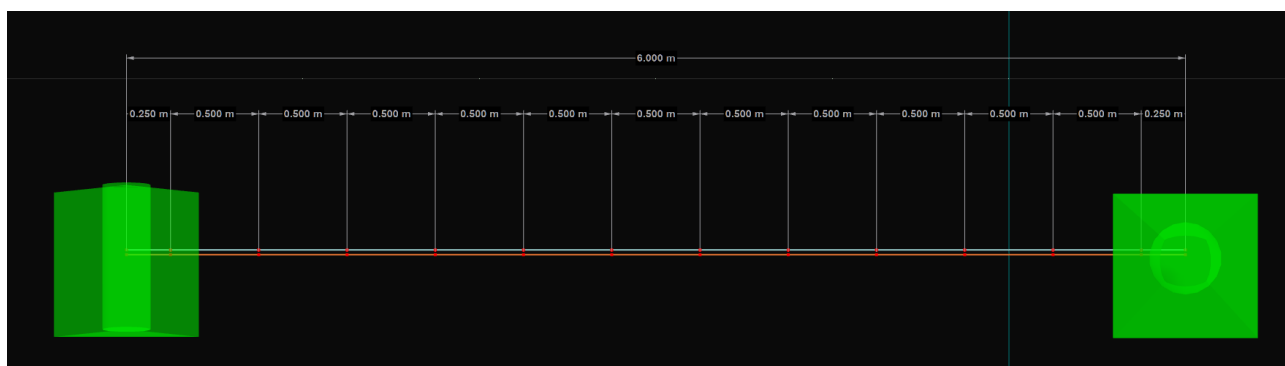
2.9.3. Kompozitinės perdangos analizė

Atlikus atskirų kompozitinės perdangos elementų analizę, naudojant baigtinių elementų programą DLUBAL toliau analizuojama šlyjamųjų jungčių įtaka kompozitinei perdangai tinkamumo ribiniam būviui įvertinti. Suprojektuoti kompozitinės perdangos atskiri elementai tenkina ribinių būvių sąlygas, todėl galima teigti, kad elementų laikomoji galia ne kompozitinėje sąveikoje, pagal pasirinktas apkrovas yra pakankama. Siekiant įvertinti šlyjamųjų jungčių įtaką kompozitinių perdangų stiprumui ir standumui, pasirinktos dviejų tipų šlyjamosios galvelinės jungtys. Galvelinių jungčių parametrai naudojami remiantis Y. Zhao'o ir kt., atliktais eksperimentiniais bandymais[17].

Analizuojamos kompozitinės sijos charakteristikos pateiktos 8 lentelėje, skaičiuojamoji schema pateikta 58 pav.

8 lentelė. Kompozitinės sijos skaičiavimo prielaidos

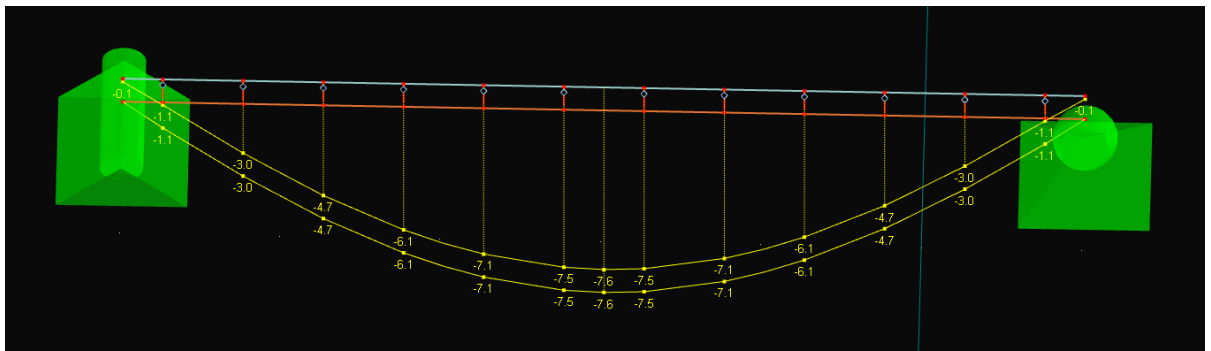
Aprašymas	Parametras
Plieninė sija	IPE 360
Sijos plieno klasė	S355
CLT plokštės storis	140 mm
CLT plokštės tamprumo modulis išilgai pluošto	$E_0 = 12 \cdot 10^3$ MPa
Nuolatinės apkrovos	Plieninės sijos savasis svoris – pagal profilį; CLT plokštės savasis svoris – $0,7 \text{ kN/m}^2$; Grindų detalė – $2,3 \text{ kN/m}^2$;
Kintamos apkrovos	Naudojimo B kategorija – 2 kN/m^2 ; Pertvaros $0,8 \text{ kN/m}^2$;
Galvelinės jungės 1S-T7- $\Phi 10$ standumas	$K_i = 86,53 \text{ kN/mm}$ [17]
Galvelinės jungės 1S-T10- $\Phi 13$ standumas	$K_i = 93,11 \text{ kN/mm}$ [17]
Galvelinių jungčių žingsnis	500 mm
Efektyvusis kompozitinės sijos plotis priimtas	$b_{\text{eff}} = 5 \text{ m}$



58 pav. Kompozitinės sijos skaičiuojamoji schema

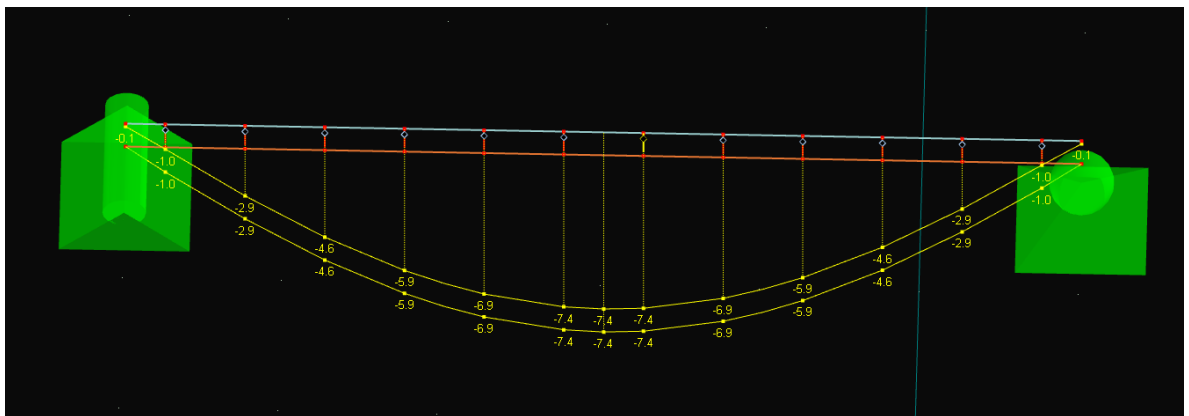
Plieninės sijos ir CLT plokštė modeliuojami kaip linijiniai elementai, pagal 2.8 skyriuje aptartą modeliavimo metodiką. Kompozitinių sijų projektavimui daroma prielaida, kad konstrukcija yra padengta ugniai atspariomis medžiagomis, todėl sijos nėra projektuojamos ugniaatsparumui.

Atlikus kompozitinės sijos analizę baigtinių elementų programa DLUBAL, naudojant galvelinę šlyjamąją jungtį 1S-T7- $\Phi 10$, gautas vidurio tarpatramio įlinkis 7,6 mm (žr. 59 pav.).



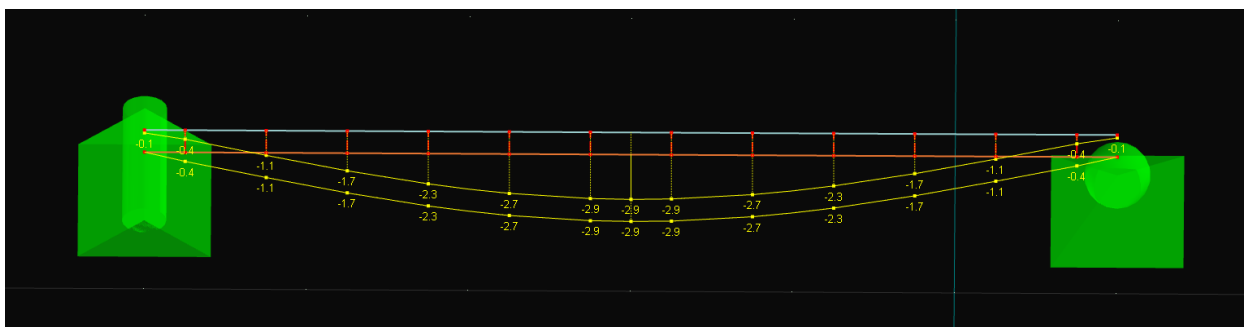
59 pav. Bandinio su galvelinėmis šlyjamosiomis jungtimis 1S-T7-Φ10 vidurio tarpatramio įlinkis

Išanalizavus kompozitinę siją, naudojant galvelinę šlyjamąją jungtį 1S-T10-Φ13, gautas vidurio tarpatramio įlinkis 7,4 mm (žr. 60 pav.).



60 pav. Bandinio su galvelinėmis šlyjamosiomis jungtimis 1S-T10-Φ13 vidurio tarpatramio įlinkis

Kompozitinės sijos analizė atlikta, darant prielaidą, kad šlyjamoji jungtis užtikrina pilną kompozitinę darbą tarp atskirų elementų, todėl elementai sujungiami standžiai, neįvedant jungties standumo. Atlikus tokio tipo jungties analizę, kompozitinės sijos įlinkis siekė 2,9 mm (žr. 61 pav.).



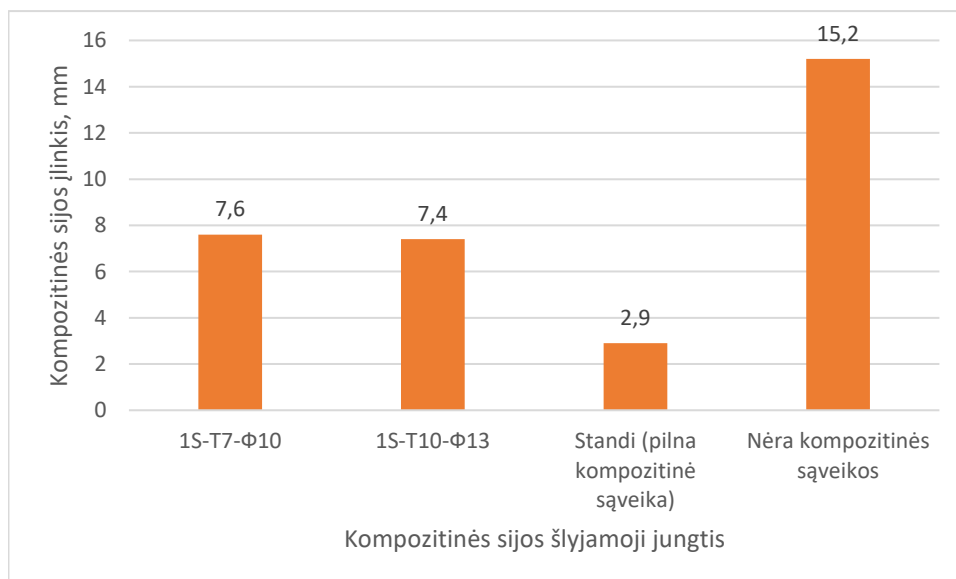
61 pav. Bandinio su standžiomis šlyjamosiomis jungtimis vidurio tarpatramio įlinkis

Kompozitinės sijos analizės rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Kompozitinių sijų projektavimo rezultatų suvestinė

Kompozitinės sijos jungtis	Kompozitinės sijos įlinkis, mm
1S-T7-Φ10	7,6
1S-T10-Φ13	7,4
Standi (pilna kompozitinė sąveika)	2,9
Nėra kompozitinės sąveikos	15,2

Remiantis gautais rezultatais, suprojektavus plieninę siją kaip atskirą kompozitinės perdangos elementą, sijos išnaudojimas pagal tinkamumo ribinį būvį siekė 76 % ir 15,2 mm įlinkį. Sujungus elementus galvelinėmis šlyjamosiomis jungtimis, kurios turėjo skirtingus standumus, pastebėta, kad plieninės sijos įlinkiai pradėjo mažėti. Naudojant 1S-T7-Φ10 šlyjamąsias jungtis, kurios standumas 86,53 kN/mm, kompozitinės sijos įlinkis sumažėjo iki 7,6 mm, kas yra 50 % mažiau už plieninės sijos deformaciją. Naudojant 1S-T10-Φ13 šlyjamąsias jungtis, kurios standumas 93,11 kN/mm, sijos įlinkis sumažėjo iki 7,4 mm, atitinkamai 51,3 % mažiau nei plieninės sijos. Padidinus jungties standumą 7,6 %, kompozitinės sijos įlinkis sumažėjo 2,63 %. Analizuojant kompozitinės sijos pilną sąveiką tarp atskirų elementų, sijos įlinkis sumažėjo iki 2,9 mm, arba 80,9 % (žr. 62 pav.).



62 pav. Kompozitinės sijos įlinkių palyginimas

Atlikus kompozitinės sijos analizę, galima teigti, kad šlyjamosios jungties standumas daro įtaką kompozitinės perdangos stiprumui ir standumui. Didėjant jungties standumui, mažėja perdangos deformacijos. Padidinus jungties standumą 7,6 %, kompozitinės sijos įlinkis sumažėjo 2,63 %. Naudojant šlyjamąsias jungtis, kurios užtikrina kompozitinę sąveiką tarp elementų, galima efektyviau išnaudoti ir optimizuoti naudojamus profilius ir elementus.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad plieninių sijų ir CLT plokštės sujungimui naudojamos galvelinės, varžtinės dalinai arba pilnai užbetonuojamos ir paprastos varžtinės šlyjamosios jungtys. Išanalizavus įvairius literatūros šaltinius pastebėta, kad šlyjamosios jungties laikomajai galiai įtakos turi:
 - jungties tipas;
 - jungtės skersmuo ir ilgis;
 - betono klasė, jeigu naudojama užbetonuojama jungtis;
 - plieno mechaninės savybės;
 - CLT plokštės mechaninės savybės;
2. Jungties laikomoji galia gali būti nustatoma remiantis standartų pateiktomis skaičiavimo metodikomis, taip pat mokslininkų siūlomomis empirinėmis formulėmis, arba eksperimentiniais bandymais. Remiantis standartų skaičiavimo metodikomis, skaičiuojant jungties laikomąją galią, įvertinami tik plieno arba betono suirimo galimi atvejai, o CLT plokštės suirimo atvejis nėra vertinamas. Atlikus šlyjamųjų jungčių laikomosios galios skaičiavimus pagal standartų metodikas, kai CLT plokštės storis buvo 70 mm, jungties laikomoji galia buvo pervertinta lyginant su eksperimentiniais bandymais. Padidinus CLT plokštės storį iki 100 mm, standartų skaičiavimo metodikos jungčių laikomąją galią įvertino konservatyviau. Mokslininkų E. Zhao'o ir kt., siūloma empirinė skaičiavimo metodika buvo tikslesnė nei standartų siūlomos metodikos, nes buvo įvertinamas ir CLT plokštės suirimo atvejis. Siekiant nustatyti jungties laikomąją galią remiantis standartų skaičiavimo metodikomis, reikėtų įvesti papildomus koeficientus, kurie galėtų įvertinti CLT plokštės mechanines savybes ir galimą jos suirimo atvejį.
3. Pagal priimtas apkrovas suprojektuoti kompozitinės perdangos atskiri elementai atitinka ribinių būvių reikalavimus ir gali būti naudojami ne kompozitinėje sąveikoje. Suprojektuotus elementus sujungus šlyjamosios jungtimis, kurios užtikrina bendrą kompozitinės konstrukcijos darbą, pastebėta, kad konstrukcijos deformacijos sumažėjo. Plieninės sijos ne kompozitinėje sąveikoje įlinkis siekė 15,2 mm, o naudojant šlyjamąją jungtį, deformacija sumažėjo iki 7,4 mm. Padidinus jungties standumą 7,6 %, kompozitinės sijos įlinkis sumažėjo atitinkamai 2,63 %. Darant prielaidą, kad atskiri elementai sujungti standžiai – pilna kompozitinė sąveika, kompozitinės sijos įlinkis sumažėjo iki 80,9 %. Galima teigti, kad šlyjamosios jungties standumas daro įtaką kompozitinių perdangų stiprumui ir standumui. Didėjant jungties standumui, mažėja perdangos deformacijos. Naudojant įvairias šlyjamąsias jungtis su skirtingais standumais, galima optimizuoti elementų skerspjuvius ir efektyviau išnaudoti konstrukcijas.

Literatūros sąrašas

1. LI, Hao; WANG, Brad Jianhe; WANG, Libin ir WEI, Yang. An experimental and modeling study on apparent bending moduli of cross-laminated bamboo and timber (CLBT) in orthogonal strength directions. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16 (2022), pp. e00874. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000067..>
2. CORPATAUX, Laurent; OKUDA, Shinya ir KUA, Harn Wei. Panel and plate properties of Cross-laminated timber (CLT) with tropical fast-growing timber species in compliance with Eurocode 5. *Construction and Building Materials*, vol. 261 (2020), pp. 119672. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820316779..>
3. ATAEI, A.; CHINIFORUSH, A. A.; BRADFORD, M. A.; VALIPOUR, H. R. ir NGO, T. D. Behaviour of embedded bolted shear connectors in steel-timber composite beams subjected to cyclic loading. *Journal of Building Engineering*, vol. 54 (2022), pp. 104581. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222005940..>
4. YANG, Ruyuan; LI, Haitao; LORENZO, Rodolfo; ASHRAF, Mahmud; SUN, Youfu ir kt., Mechanical behaviour of steel timber composite shear connections. *Construction and Building Materials*, vol. 258 (2020), pp. 119605. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182031610X..>
5. STRZELECKA, Julia; POLUS, Łukasz ir CHYBIŃSKI, Marcin. Theoretical and Numerical Analyses of Steel-timber Composite Beams with LVL Slabs. *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 33 (2023), pp. 64–84.
6. HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R. ir BRADFORD, M. A. Experimental and numerical investigation of short-term behaviour of CLT-steel composite beams. *Engineering Structures*, vol. 144 (2017), pp. 43–57. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616305144..>
7. VELLA, Nathan; KYVELOU, Pinelopi; BUHAGIAR, Spiridione ir GARDNER, Leroy. Innovative shear connectors for composite cold-formed steel-timber structures: An experimental investigation. *Engineering Structures*, vol. 287 (2023), pp. 116120. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623005345..>
8. ROMERO, Alfredo ir ODENBREIT, Christoph. Experimental investigation on novel shear connections for demountable steel-timber composite (STC) beams and flooring systems. *Engineering Structures*, vol. 304 (2024), pp. 117620. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624001822..>
9. WANG, Chun-Lin; ZHAO, Yong; YUAN, Yue ir MENG, Shaoping. Enhance the performance of steel-wood composite screw connections with fast-curing adhesive. *Journal of Building Engineering*, vol. 89 (2024), pp. 109336. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224009045..>
10. HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R. ir BRADFORD, M. A. Experimental and analytical behaviour of steel-timber composite connections. *Construction and Building Materials*, vol. 118 (2016), pp. 63–75. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307772..>

11. ZHAO, Yong; YUAN, Yue; WANG, Chun-Lin ir MENG, Shaoping. Experimental and finite element analysis of flexural performance of steel-timber composite beams connected by hybrid-anchored screws. *Engineering Structures*, vol. 292 (2023), pp. 116503. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623009185>..
12. AL-ZAIDEE, Salah ir AL-HASANY, Ehab. Finite Element Modeling and Parametric Study on Floor Steel Beam Concrete Slab System in Non-Composite Action. *Journal of Engineering*, vol. 24 (2018), pp. 95.
13. ZHANG, Henan ir LING, Zhibin. Finite Element Modeling on Shear Performance of Grouted Stud Connectors for Steel–Timber Composite Beams. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 3.
14. HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R. ir BRADFORD, M. A. Bolt shear connectors in grout pockets: Finite element modelling and parametric study. *Construction and Building Materials*, vol. 176 (2018), pp. 179–192. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181831095X>..
15. ZHAO, Yong; YUAN, Yue; WANG, Chun-Lin; ZHENG, Jihai ir ZHOU, Yongfeng. Experimental study on shear performance of steel-timber screw connectors with grout pockets. *Engineering Structures*, vol. 266 (2022), pp. 114535. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622006411>..
16. *Medinės Konstrukcijos. Sujungimai Mechaninėmis Tvirtinimo Detalėmis. Bendrieji Mechaninio Stiprio Ir Deformacijų Būdingųjų Savybių Nustatymo Principai (ISO 6891:1983) / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2000th Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2000.
17. ZHAO, Ernian; SONG, Qi; YAO, Jing-Ru ir ZHANG, Xin. Study of shear performance of steel-timber composite connection with different shear connectors. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21 (2024), pp. e04066. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952401218X>..
18. GONG, Shuhong; HU, Xiamin; AN, Minghui; CHEN, Gang; LIU, Hong ir kt., Shear characteristics of demountable bolt connectors in steel-cross laminated bamboo and timber composite beams. *Engineering Structures*, vol. 336 (2025), pp. 120489. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029625008806>..
19. LIU, Ruiyue; LIU, Jiatong; WU, Zhenzhen; CHEN, Ling ir WANG, Jiejun. A Study on the Influence of Bolt Arrangement Parameters on the Bending Behavior of Timber–Steel Composite (TSC) Beams. *Buildings*, vol. 12 (2022), nr. 11.
20. CHINIFORUSH, A. A.; VALIPOUR, H. R.; BRADFORD, M. A. ir AKBARNEZHAD, A. Long-term behaviour of steel-timber composite (STC) shear connections. *Engineering Structures*, vol. 196 (2019), pp. 109356. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619313306>..
21. CHAI, Wenhao; DI, Jin; LU, Youfu; QIN, Fengjiang; MEN, Pengfei ir kt., Experimental investigation on static mechanical performance of grouped-stud shear connectors in steel–UHPC composite beams. *Engineering Structures*, vol. 306 (2024), pp. 117836. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624003985>..
22. *Stud Welding*. Prieiga per: <https://www.bolte.gmbh/index.php/en/references/shear-connectors/229-shear-connectors-19x125-mm-on-steel-beams%207>..

23. Eurokodas 5. *Medinių Konstrukcijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Nuostatos. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2005th Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
24. Eurokodas 4. *Kompozitinių Plieninių-Betoninių Konstrukcijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės / Lietuvos Standartizacijos Departamentas*. 2005th Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
25. American Institute of Steel Construction. *Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16*. , 2016. Prieiga per: <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16w-rev-june-2019.pdf>..
26. ZHAO, Ernian; SONG, Qi; ZHANG, Xin ir LI, Shuming. Shear performance of H-shaped steel to novel inorganic-bonded bamboo composite connections: Experimental tests and prediction models. *Engineering Structures*, vol. 331 (2025), pp. 119975. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029625003669>..
27. HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R. ir BRADFORD, M. A. Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 122 (2016), pp. 367–378. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16300852>..
28. BOMPA, D. V.; CHIRA, A. ir ZWICKY, D. Constitutive modelling of deformation rate dependent response of steel timber shear connections. *Journal of Building Engineering*, vol. 98 (2024), pp. 111159. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022402727X>..
29. CHEN, Lin; YANG, Lu ir XU, Kelong. Experimental study on mechanical behaviour of stainless steel-timber composite shear connections. *Construction and Building Materials*, vol. 480 (2025), pp. 141532. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825016800>..
30. BOMPA, D. V.; KARIUKI, M.; UNGUREANU, V. ir ELGHAZOULI, A. Y. Disassembly capability and circularity potential of steel-timber floor connections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 235 (2025), pp. 109806. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X25004845>..
31. DEEVES, Brendan P. H. ir WOODS, Joshua E. Experimental investigation of steel-timber shear connections with self-tapping screws. *Construction and Building Materials*, vol. 492 (2025), pp. 142999. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825031502>..
32. HOSSEINI, Seyedeh Maryam; MASHIRI, Fidelis ir MIRZA, Olivia. Research and developments on strength and durability prediction of composite beams utilising bolted shear connectors (Review). *Engineering Failure Analysis*, vol. 117 (2020), pp. 104790. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630719307083>..
33. PAVLOVIĆ, Marko; MARKOVIĆ, Zlatko; VELJKOVIĆ, Milan ir BUDEVAC, Dragan. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 88 (2013), pp. 134–149. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13001314>..

34. STRZELECKA, Julia; POLUS, Łukasz ir CHYBIŃSKI, Marcin. Theoretical and Numerical Analyses of Steel-timber Composite Beams with LVL Slabs. *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 33 (2023), pp. 64–84.
35. WANG, Chun-Lin; LYU, Jiafeng; ZHAO, Jing ir YANG, Huifeng. Experimental investigation of the shear characteristics of steel-to-timber composite joints with inclined self-tapping screws. *Engineering Structures*, vol. 215 (2020), pp. 110683. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619340507>..
36. CHEN, Lin; YANG, Lu ir XU, Kelong. Experimental and numerical research on overall stability of stainless steel-timber composite beams. *Engineering Structures*, vol. 331 (2025), pp. 119982. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029625003736>..
37. Eurokodas 4. Kompozitinių Plieninių Ir Betoninių Konstrukcijų Projektavimas. 1-101 Dalis. Kompozitinės Vienasienės Bei Dvisienės Plieninės Ir Betoninės Konstrukcijos (Projektavimui Bus Taikomas Nuo 2027 M. Rugsėjo 30 D.) / Lietuvos Standartizacijos Departamentas. 2025th Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2025.
38. CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS, Beijing. GB 50017-2017. *Standard for design of steel structures* (2017).
39. DING, Fa-xing; YIN, Guo-an; WANG, Hai-bo; WANG, Liping ir GUO, Qiang. Static behavior of stud connectors in bi-direction push-off tests. *Thin-Walled Structures*, vol. 120 (2017), pp. 307–318. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823117305487>..
40. LI, Jiang; GONG, Shuhong; AN, Minghui; HU, Xiamin; MEI, Jiangtao ir kt., Shear performance of welded stud connections in steel-cross laminated bamboo and timber composite structures. *Structures*, vol. 75 (2025), pp. 108857. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235201242500671X>..