



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Akvilė Jaruševičiūtė

**KOMPOZITINĖS BETONO IR POLIMERINIŲ PROFILIUOČIŲ
PERDANGOS SEGMENTO DEFORMACIJŲ TYRIMAI**
**RESEARCH OF COMPOSITE CONCRETE AND POLYMER PROFILES
SLAB SEGMENT DEFORMATION**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų perdangos segmento deformacijų tyrimai**

Autorius **Akvilė Jaruševičiūtė**

Vadovas **Viktor Gribniak**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekami kopozitinė betono ir polmerinių profiliuotųjų perdangos segmento deformacijų tyrimai. Dažniausios kompozitinės konstrukcijos yra plieno ir gelžbetonio derinys, tačiau ne mažiau efektyvesnis yra polimerų ir betono derinys. Šis medžiagų derinys dažnai naudojamas pėsčiųjų tiltų statyboje. Polimerų ir betono kompozitinė konstrukcija yra lengva ir atspari aplinkos poveikiams, tačiau ji yra jautri šlyties jėgų poveikiui. Todėl iškyla problema, kaip užtikrinti profiliuotųjų laikomąją galią ties atramomis. Kopozitinės polimerinių profiliuotųjų ir betono konstrukcijos derinio skerspjuvio matmenys gali būti daug mažesni, nei naudojant įprastas medžiagas. Darbo tikslas – sukurti skaitinį modelį kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų perdangos segmento deformacijoms nustatyti ir optimizuoti atraminių mazgų formą. Atliktas konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį, atliktos literatūrinė, eksperimentinė ir skaitinė analizės, sukurti kompozitinės betono ir polimerinio profiliuotųjų perdangos bei atraminių mazgų skaitiniai baigtinių elementų modeliai. Darbas apibendrinamas galutinėmis išvadomis.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu, eksperimentinis tyrimas, skaičivimai baigtinių elementų programa, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 89 p. teksto be priedų, 59 iliustr., 11 lent., 26 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: atraminis mazgas, deformacija, kompozitinė perdanga, profiliuotis, stiklo pluoštu armuotas polimeras.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Steel and Composite Structures

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

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Research of deformation of composite concrete and polymer profiles slab segment**

Author **Akvilė Jaruševičiūtė**

Academic supervisor **Viktor Gribniak**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master's thesis, composite investigations of deformations of concrete and polymer profile slab segment are performed. The most common composite structures are a combination of steel and reinforced concrete, but a combination of polymers and concrete is not less effective. This combination of materials is often used in the construction of pedestrian bridges. The composite construction of polymers and concrete is resistant to environmental effects, but it is sensitive for shear forces. Therefore, there is a problem how to ensure the load-bearing capacity of the profiles at the supports. The composite polymer profiles and concrete slab's cross-sectional dimensions can be much smaller than composite slabs of conventional materials. The aim of the work is to create a numerical model for research the deformations of the concrete and polymer profile slab segment and to optimize the shape of the supporting nodes. Design of structure by probabilistic statistical method according to serviceability limit state, literature review, experimental and numerical analysis were performed, numerical finite elements models of composite concrete and polymer profile slab and supporting nodes were created. The work is summarized in the final conclusions.

The work consists of 6 parts: introduction, literature review, design of the structure by probabilistic statistical method, experimental research, calculations by finite element program, conclusions and suggestions. Thesis consists of 88 p. text without appendixes, 59 pictures, 11 tables, 26 bibliographical entries.

Keywords: composite slab, deformation, glass fiber reinforced polymer, profile, supporting node,

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1 Literatūros apžvalga	15
1.1 Pritaikymas statybos sektoriuje	15
1.2 Kompozitinių konstrukcijų pavyzdžiai Europoje	16
1.2.1 Įgyvendintos konstrukcijos Danijoje	16
1.2.2 Įgyvendintos konstrukcijos Prancūzijoje	18
1.2.3 Įgyvendintos konstrukcijos Olandijoje	19
1.3 FRP elementų gamybos būdai ir technologija	20
1.3.1 Vijimas	20
1.3.2 Pultruzija	22
1.4 Kompozitas	23
1.5 Betono ir polimerinių profiliuotųjų pėsčiųjų tilto tyrimo analizė	24
1.5.1 Medžiagos savybės	25
1.5.2 Valkšnumo testas	26
2 Konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį	35
2.1 Konstrukcijos skaičiuojamoji schema ir pradiniai duomenys	35
2.2 Įlinkio skaičiavimas	37
2.3 Atsargos funkcija ir dalinės išvestinės. Patikimumo skaičiavimas	37
2.4 Papildomų faktorių įtakos patikimumo koeficientui ir atsargai vertinimas	41
Skyriaus išvados	45
3 Eksperimentinis tyrimas	46
3.1 Kompozitinė betono ir GFRP profiliuotųjų perdanga	47
3.2 Medžiagų savybės	48
3.2.1 GFRP profiliuotųjų savybės	48
3.2.2 GFRP profiliuotųjų savybės, nustatytos eksperimento metu	49

3.2.3	Betonas	50
3.2.4	Jungties tarp GFRP profiliuoto ir betono stiprumas.	51
3.3	Projektavimo pritaikymas pėsčiųjų tiltams.....	52
3.3.1	Projektavimas pagal tinkamumo ribinį būvį.....	52
3.3.2	Projektavimas pagal saugos ribinį būvį	54
3.4	Eksperimento ir analitinė analizė	56
3.4.1	Keturių taškų lenkimo bandymas	56
3.4.2	TBT naudojimas po analizės	63
3.4.3	Skaitinė analizė naudojant baigtinių elementų programą.....	63
3.5	Teorinių, skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.....	64
	Baigiamosios pastabos būsimiems darbams	65
4	Skaičiavimai baigtinių elementų programa.....	67
4.1	Skaitinio modelio kūrimas pagal atliktą GFRP plokštelės tempimo bandymą	67
4.1.1	Tempiamos GFRP plokštelės eksperimento duomenys	67
4.1.2	Tempiamos GFRP plokštelės skaitinis modelis	68
4.1.3	Tempiamos GFRP plokštelės skaitinio modelio ir eksperimento rezultatų palyginimas	69
4.2	Kompozitinės plokštės skaičiavimo modelis.....	70
4.2.1	Kompozitinės perdangos skaitinis modelis	70
4.2.2	Kompozitinės perdangos skaitinio modelio ir eksperimento palyginimas.....	73
4.3	Kompozitinės perdangos atraminio mazgo parinkimas.....	73
4.3.1	Kompozitinės perdangos su atraminiais mazgais skaitinis modelis.....	74
4.3.2	Kompozitinės perdangos skaitinio modelio palyginimas.....	76
	Skyriaus išvados	82
5	Galutinės išvados ir pasiūlymai.....	83
5.1	Išvados.....	83
5.2	Pasiūlymai	84
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	86

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pėsčiųjų ir dviračių tiltas Koldinge, Danijoje (Ascione et al. 2016:12).....	16
1.2 pav. Pagrindinio kelio tilto atnaujinimas Karebaksminde, Danijoje (Ascione et al. 2016:12) ...	17
1.3 pav. Metro tunelio atnaujinimas Kopenhagoje, Danijoje (Ascione et al. 2016:13)	17
1.4 pav. Prancūzijoje esanti sraigtasparnio nusileidimo aikštelė (Ascione et al. 2016:13)	18
1.5 pav. Laikina Kretilės katedra, Prancūzijoje (Ascione et al. 2016:13).....	18
1.6 pav. Dviračių ir pėsčiųjų tiltas Floriadebruge, Olandijoje (Ascione et al. 2016:16)	19
1.7 pav. FRP užtvankos šliuzo vartai, įrengti Verkendame, Olandijoje (Ascione et al. 2016:16) ...	19
1.8 pav. Vijimo technologinio proceso schema (Williams 2000:13).....	21
1.9 pav. Pultruzijos procesas (Fiberline Composites 2003:4).....	22
1.10 pav. Projektuojamas pėsčiųjų tiltas: (a) vaizdas iš perspektyvos ar (b) skerspjūvis (Mendes et al. 2011:2970).....	24
1.11 pav. Tyrime išbandyto prototipo skerspjūvis (Mendes et al. 2011:2970).....	26
1.12 pav. Tyrime išbandyto prototipo šoninis vaizdas (Mendes et al. 2011:2971)	27
1.13 pav. Jungtis tarp SFRSCC pakloto ir GFRP profiliuotio (Mendes et al. 2011:2972)	27
1.14 pav. Jungties tarp montavimo eiliškumas (pagal Mendes et al. 2011:2972)	28
1.15 pav. Cemento maišas, naudotas apkrovai imituoti (a), apkrovimo aparatas (b) (Mendes et al. 2011:2972).....	29
1.16 pav. Skaitiklių išdėstymas prototipe (Mendes et al. 2011:2973)	29
1.17 pav. Laiko ir įlinkio santykis PROT_125 ir PROT_125 (Mendes et al. 2011:2973).....	30
1.18 pav. Valkšnumo elgsena: eksperimentiniai ir numatomi skaitiniai rezultatai (Mendes et al. 2011:2974).....	31
1.19 pav. Lenkiamojo standumo kitimas: eksperimentiniai ir numatomi skaitiniai rezultatai (Mendes et al. 2011:2974).....	32
2.1 pav. Kompozitinės perdangos fragmentas	35
2.2 pav. Parametrų įtaka įlinkiui (%)	40
2.3 pav. Parametrų įtaka įlinkiui (%) sumažinus h_c 2 kartus	42
2.4 pav. Parametrų įtaka įlinkiui (%) padidinus h_c 2 kartus.....	44
2.5 pav. Patikimumo koeficiento β kitimas didinant h_c	44
3.1 pav. Kompozitinė betono ir GFRP profiliuotio perdanga (Santos Neto & La Rovere 2010: 2555).....	46

3.2 pav. Parodomasis kompozitinės perdangos skerspjūvis (Santos Neto & La Rovere 2010: 2556)	47
3.3 pav. Išilginė ir skersinė GFRP profiliuoties sienelės ir juostos kryptys (Santos Neto & La Rovere 2010: 2556).	48
3.4 pav. GFRP profiliuoties 3 taškų lenkimo bandymas: (a) tarptraimis 82cm; (a) tarptraimis 41cm (Santos Neto & La Rovere 2007: 277)	49
3.5 pav. Jungties tarp betono ir GFRP profiliuoties bandymas(Santos Neto & La Rovere 2010: 2557)	51
3.6 pav. Bandinių suirimo atvejai: a) jungtis su derva <i>Sikadur 31</i> ir b) jungtis su <i>derva Sikadur 32 Gel</i> , sukombinuota su smėliu (Santos Neto & La Rovere 2010: 2558)	52
3.7 pav. Perdangos skerspjūvio transformavimas į ekvivalentišką GFRP medžiagą (Santos Neto & La Rovere 2010:2558)	53
3.8 pav. Lenkiamoji galia: (a) santykinių deformacijų pasiskirstymas; (b) įtempių pasiskirstymas; (c) įtempių susidarymas (Santos Neto & La Rovere 2010: 2559)	55
3.9 pav. Kompozitinės perdangos bandinio paruošimas: (a) putų polistirolu talpinimas tarp profiliuoties ir (b) dervos užtepimas ant profiliuoties viršutinės juostos (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)	57
3.10 pav. 4 taškų lenkimo bandymo įrenginys (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)	58
3.11 pav. Santykinių deformacijų matuoklių išdėstymas skerspjūvyje: betono viršuje, jungtyje tarp betono ir GFRP profiliuoties bei profiliuoties apačioje (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)	58
3.12 pav. Perdangos bandinys Nr. 1: jungties tarp betono ir GFRP profiliuoties suirimo atvejais (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)	60
3.13 pav. Perdangos bandinys Nr. 2: (a) deformacijos forma esant 100 kN apkrovai ir (b) gautas suirimo dėl šlyties atvejis profiliuotyje (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)	60
3.14 pav. Perdangos bandinys Nr. 3: (a) irtis dėl šlyties pasireiškė tik viename GFRP profiliuotyje (dešinėje plokštės pusėje) ir (b) išilginis plyšys betone virš to pačio profiliuoties (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)	61
3.15 pav. Perdangos bandinių grafikai: a)apkrovos ir poslinkio (vidutinių reikšmių) kreivė ir b) apkrovos ir maksimalių santykinių deformacijų (vidutinių reikšmių) kreivė (Santos Neto & La Rovere 2010: 2562)	62
3.16 pav. Perdangos bandinių grafikai: a)apkrovos ir praslydimo (vidutinių reikšmių) kreivė ir b) apkrovos ir maksimalių santykinių deformacijų jungtyje (vidutinių reikšmių) kreivė (Santos Neto & La Rovere 2010: 2562)	62
3.17 pav. Baigtinių elementų modelis, naudojamas 4 taškų lenkimo linijinei-elastinei analizei. (Santos Neto & La Rovere 2010: 2563)	64

3.18 pav. Apkrovos ir tarpatramio vidurio įlinkio grafikas: TBT, BE ir eksperimentinių analizių palyginimas (Santos Neto & La Rovere 2010: 2563).....	65
4.1 pav. 5 GFRP plokštelių bandinių tempimo bandymo apkrovos-poslinkio kreivės (F-u)	68
4.2 pav. GFRP plokštelės 3 bandinio (3) ir BE skaitinio modelio (T01) apkrovos-poslinkio (F-u) kreivės palyginimas.	69
4.3 pav. Kompozitinės GFRP profiluoties ir betono perdangos skaičiuojamoji schema	70
4.4 pav. Kompozitinė perdanga. Pjūvis 1-1	71
4.5 pav. Kompozitinė perdanga. Pjūvis 2-2	71
4.6 pav. Kompozitinės perdangos skaitinis modelis, sudarytas naudojant <i>Atena GiD</i> programą.....	72
4.7 pav. Kompozitinės perdangos struktūrinė schema.....	72
4.8 pav. Kompozitinės perdangos BE skaitinio modelio ir eksperimento palyginimas	73
4.9 pav. Kompozitinės perdangos skaičiuojamoji schema	74
4.10 pav. Atraminių mazgai 1) apibetonavimas tarp GFRP profiluoties viršutinės ir apatinės juostų; 2) 20 mm apibetonavimas nuo GFRP profiluoties; 3) GFRP profiluoties įbetonavimas į stačiakampę formą.....	74
4.11 pav. Skaitiniai kompozitinės perdangos modeliai su atraminiais mazgais: 1) apibetonavimas tarp GFRP profiluoties viršutinės ir apatinės juostų; 2) 20 mm apibetonavimas nuo GFRP profiluoties; 3) GFRP profiluoties įbetonavimas į stačiakampę formą	75
4.12 pav. Kompozitinės perdangos skaitinių modelių apkrovos ir vertikalios poslinkio kreivės: 0) pradinis modelis; 1) 01 atraminis mazgas; 2) 02 atraminis mazgas; 3) 03 atraminis mazgas.....	76
4.13 pav. Von Mises įtempiai GFRP profiluotyje: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.	77
4.14 pav. Von Mises'o įtempiai betone: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.	78
4.15 pav. Von Mises įtempiai betone: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.	79
4.16 pav. Normaliniai įtempiai jungtyje tarp GFRP profiluoties ir betono: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.	80
4.17 pav. Kompozitinės perdangos tangentiniai įtempiai: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.....	81

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. SFRSCC mišinio sudedamųjų dalių proporcijos į m^3 (pagal Mendes et al. 2011).....	25
1.2 lentelė. Reologinės ir mechaninės SFRSCC savybės (pagal Mendes et al. 2011).....	25
2.1 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai	39
2.2 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai sumažinus h_c 2 kartus.....	41
2.3 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai padidinus h_c 2 kartus.....	43
3.1 lentelė. Profiliuotųjų sienelės ir juostų bei individualių komponentų elastinės savybės (pagal Santos Neto & La Rovere, 2010)	48
3.2 lentelė. GFRP profiliuotųjų tamprumo ir Šlyties modulių reikšmės, gautos iš 3 taškų lenkimo bandymo (pagal Santos Neto & La Rovere 2007).....	50
3.3 lentelė. Ekvivalentiško GFRP transformuoto skerspjūvio savybės ($E = 32,86$ GPa, $G = 2.67$ GPa, $E_c = 26.07$ GPa, $n = E_c/E = 0.793$) (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).....	53
3.4 lentelė. Didžiausios apkrovos prognozės 4 taškų lenkimo bandymui (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).	56
3.5 lentelė. Betono gniuždomasis stipris ir tamprumo modulis, gauti iš cilindrinio bandinio bandymo rezultatų (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).....	59
4.1 lentelė. GFRP plokštelės tempimo bandymo tamprumo modulio rezultatai (pagal (Santos Neto & La Rovere 2007)	67

IVADAS

Problemos formulavimas

Šiais laikais kompozitinių medžiagų panaudojimo sritys yra labai plačios. Sujungus kelias derančias konstrukcines medžiagas, gaunamas mažesnis konstrukcijos svoris ir matmenys, didesnis stiprumas ir standumas, efektyvus medžiagų savybių panaudojimas, konstrukcijų transportavimo ir montavimo išlaidų sumažinimas. Bet kokių konstrukcijų elgsenos ypatumai yra sudėtingi ir nėra iki galo ištirti, ypač kompozitinių konstrukcijų. Dažnai kompozitinių konstrukcijų skaičiavimams yra naudojama patirtis eksploatuojant tokias konstrukcijas ir bandymų rezultatai.

Darbo aktualumas

Dažniausios kompozitinės konstrukcijos yra plieno ir gelžbetonio derinys, tačiau ne mažiau efektyvesnis yra polimerų ir betono derinys. Šis medžiagų derinys dažnai naudojamas pėsčiųjų tiltų statyboje. Polimerų ir betono kompozitinė konstrukcija yra lengva ir atspari aplinkos poveikiams, tačiau ji yra jautri šlyties jėgų poveikiui. Todėl iškyla problema, kaip užtikrinti profiliuotųjų laikomąją galią ties atramomis. Kompozitinės polimerinių profiliuotųjų ir betono konstrukcijos derinio skerspjuvio matmenys gali būti daug mažesni, nei naudojant įprastas medžiagas. Šios lengvesnės konstrukcijos deformacijos gali būti mažesnės nei įprastų konstrukcinių medžiagų.

Tyrimo objektas – kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų sijinio tilto perdangos segmentas.

Darbo tikslas – sukurti skaitinį modelį kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų perdangos segmento deformacijoms nustatyti ir optimizuoti atraminių mazgų formą.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti konstrukcijos projektavimą tikimybinio statistiniu metodu.
2. Atlikti kompozitinės perdangos eksperimento analizę.
3. Pagal eksperimentinio bandymo duomenis sukurti skaitinį modelį.
4. Ištirti kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų perdangos segmento deformacijas.
5. Sukurti kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų perdangos su skirtingais atraminių mazgų skerspjuviais skaitinius modelius.
6. Parinkti atraminių mazgų konstrukciją, atsižvelgiant į jų masę ir maksimalius įtempius.

Tyrimo metodai: literatūros apžvalga; eksperimentinis tyrimas; analitinis skaičiavimas; skaitinis modeliavimas (baigtinių elementų metodu); palyginamoji rezultatų analizė.

Darbo naujumas ir praktinis pritaikomumas

Per pastaruosius 20 metų, keletas inovatyvių sprendimų, Europoje ir už jos ribų, patvirtino kompozitinių konstrukcijų iš pluoštu armuoto polimero (*angl.* Fibre Reinforced Polymer or Plastics, toliau – FRP) pritaikomumą. Jau 1995 m. buvo išleistas N. Deskovic'o, T. C. Triantafillou'o, U. Meier'io tyrimas, kuriame buvo nagrinėjama betono ir pluoštu armuoto polimero kombinacija. Šiame darbe tiriami betoninės plokštės elgsena ir parenkamas optimalus betoninės plokštės aukštis, norint išvengti klupumo profiliuotųjų sienelėje ir šlyjamosios irties betone (Deskovic et al. 1995). Taip pat 2002 m. išleista C.E. Bakis'o, L.C. Bank'o ir kt. tiriamoji apžvalga, kuri nagrinėja pluoštu armuotų polimerų pritaikymas statyboms (Bakis et al. 2002). Tiek A. B. S. Santos'o Neto ir H. L. La Rovere'ės (Santos Neto & La Rovere 2010), tiek P. J.D. Mendes, J. A.O. Barros, J. M. Sena-Cruz ir M. Taheri (Mendes et al. 2011) nagrinėjamuose pėsčiųjų tilto segmento tyrimuose iškeliama stiklo pluoštu armuoto polimerinio (*angl.* glass fiber reinforced polymer, toliau – GFRP) profiliuotųjų sienelės suirimas. Todėl reikia imtis šią problemą išsprendžiančių tyrimų.

Šiame tiriamajame darbe nagrinėjamas kompozitinės GFRP profiliuotųjų ir betono perdangos segmento deformacijos. Labai dažnai dėl savo lengvumo ir atsparumo aplinkos poveikiams šios konstrukcijos naudojamos pėsčiųjų ir dviračių tiltų statyboms. Vien Europoje galima rasti daug tokių konstrukcijų pavyzdžių, kurie pateikti 1.2 poskyryje. Dėl GFRP profiliuotųjų jautrumo šlyties poveikiams, šiame tiriamajame darbe bus nagrinėjamas skaitinis atraminių mazgų modelis ir parenkamas atraminio mazgo sustiprinimas, norint išvengti pasikartojančių suirimų GFRP profiliuotyje dėl šlyties poveikio.

Struktūra

Tiriamąjį darbą sudaro penki skyriai. Pirmajame skyriuje atliekama literatūros apžvalga, aptariama stiklo pluošto profiliuotųjų gamybos technologija. Antrajame skyriuje atliekamas konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį, nustatoma, kurie dydžiai labiausiai lemia konstrukcijos patikimumą. Trečiame skyriuje aprašomas eksperimentinis tyrimas, naudojamos medžiagos, prietaisai, atliekami analitiniai skaičiavimai, kurie palyginami su eksperimento metu gautais rezultatais. Ketvirtame skyriuje analizuojami sukurti skaitiniai kompozitinės perdangos ir jos atraminių mazgų modeliai, kurie lyginami tarpusavyje ir su eksperimentinėmis reikšmėmis. Taip pat iš šiame darbe analizuojamų atraminio mazgo skerspjūvių parinkamas konstrukcijos atramose didžiausią teigiamą poveikį lemiantis atraminis mazgo skerspjūvis. Penktame skyriuje pateikiamos galutinės tiriamojo darbo išvados ir pasiūlymai.

1 Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiamas pluoštu armuotų konstrukcijų pritaikymą statybos sektoriuje, pritaikymo pavyzdžiai Europoje, aptariami pluoštu armuotų konstrukcijų gamybos būdai ir technologijos bei nagrinėjamas kompozitines perdangos fragmento tyrimas.

1.1 Pritaikymas statybos sektoriuje

Pagrindiniai FRP tipai yra stiklo pluoštu armuotas polimeras (*angl.* (Glass Fibre Reinforced Polymer, toliau – GFRP) ir anglies pluoštu armuotas polimeras (*angl.* Carbon Fibre Reinforced Polymer, toliau – CFRP). Šių medžiagų panaudojimas dažniausiai priklauso nuo specifinių veiksnių, tokių kaip greitas montavimas statybvietėje arba reikalingas didelis atsparumas agresyviems aplinkos poveikiams, o tai savo ruožtu sumažina bendras ir eksploatavimo išlaidas. Beje, nedidelis FRP konstrukcijų svoris palengvina montavimą, taip pat turi geotechninį pranašumą tokiais atvejais, kai konstrukcija remiasi į deformatyvų gruntą. Dėl geresnio stiprumo ir svorio santykio FRP galima didesnė apkrova lyginant su įprastomis statybinėmis medžiagomis.

Šiame kontekste FRP profiliuotų panaudojimas apvaskalų turinčiose bei daugiasluoksnėse konstrukcijose gali suteikti didelį privalumą statybos inžinerijos srityje. FRP kaip laikančios konstrukcijos yra plačiai naudojamos industrinių ir gyvenamųjų namų statybai. Šių medžiagų panaudojimas yra labai platus. FRP gali būti naudojamas kaip vartų elementas, pėsčiųjų arba transporto tiltų arba jo perdangos konstrukcijose.

Be anksčiau išvardintų pranašumų, pateikiami keletas pagrindinių FRP panaudojimų statiniuose privalumų (Fiberline Composites 2003):

1. Geresnės surenkamų gaminių paruošimo galimybės.
2. Sumažina eismo prastovą montavimo ir kėlimo metu.
3. Sumažina nelaimingų atsitikimų statyboje riziką.
4. Sumažina montavimo statybvietėje kaštus.
5. Konkurencinga kainos ir konstrukcijos gyvavimo ciklo santykis.
6. Baigtos konstrukcijos aukšta kokybė.
7. Lengvas konstrukcijų pritaikymas prie architektūrinės pastato formos.
8. Puikus prisitaikymas prie esamų konstrukcijų plėtos.
9. Puikus prisitaikymas prie plataus papildomų sprendimų, tokių kaip turėklų sistemos, šaligatviai, apsauginiai parapetai, stogo plokštės, balkonai, fasado denginiai, viadukai ar tiltų kraštinių elementų, pasirinkimo.
10. Lengvesnis konstrukcijų transportavimas į sunkiai pasiekiamas vietas, pavyzdžiui, nuniokotas stichinių nelaimių.

Dažniausiai statybos srityje naudojamos FRP gamybos technologijos yra pultruzija ir vakuuminė dervos infuzija, dar kitaip vadinama vakuuminis dervos liejimas (*angl.* Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding, toliau – VARTM). Kiti įprasti gamybos procesai: paruošimas, rankinis klojimas, gijų vyniojimas ir presavimas.

FRP rinkos idėją Europoje galima išvesti iš šių paskutinio penkerių metų laikotarpio duomenų: bendra metinė GFRP (stiklo pluoštu armuoto polimero) gamyba sudarė apie 1 mln. 35 % buvo skirta statybos sričiai.

1.2 Kompozitinių konstrukcijų pavyzdžiai Europoje

Keletas aktualių inžinerinių statinių, realizuotų (arba įgyvendinamų) Europoje, pavyzdžių, naudojant FRP, pateikiami toliau kaip iliustruojantys tokio tipo konstrukcijų paplitimą ir didėjantį susidomėjimą.

1.2.1 Įgyvendintos konstrukcijos Danijoje

Pėsčiųjų ir dviračių tiltas Koldinge, Danijoje iš 100 % pultruzijos būdu pagamintų GFRP profiliuotųjų pavaizduotas 1.1 pav. Tiltas yra 40 m ilgio ir 3,2 m pločio. Jo bendras svoris yra 120 kN. Laikomoji galia yra 5 kN / m². Tiltas buvo patikrintas po 15 metų tarnavimo, bet nebuvo rasta jokių pažaidų. Rangovas: *Fiberline Composites A/S*, Midelfartas, Danija, 1997 m.



1.1 pav. Pėsčiųjų ir dviračių tiltas Koldinge, Danijoje (Ascione et al. 2016:12)

1.2 pav. pavaizduotas pagrindinio kelio tilto atnaujinimas Karebaksmine, Danijoje.. Ant senos plieninės konstrukcijos buvo sumontuotas GFRP denginys pėsčiųjų ir dviratininkų tiltui iš 100 % pultruzijos būdu pagaminto GFRP profiliuotųjų, kurie buvo pakabinti šone, kad padidėtų laikomąją galią. Tai yra pirmasis Danijos transporto tiltas, pagamintas iš sudėtinio denginio. Jis pakeitė medinę dangą, kurią reikėjo atnaujinti maždaug kas 5 metus. Tilto montavimas buvo atliekamas naktį, kad

nesutrikdytų eismo. Tiltas buvo baigtas per porą valandų. Rangovas: *Fiberline Composites A/S*, Middelfartas, Danija, 2011 m.



1.2 pav. Pagrindinio kelio tilto atnaujinimas Karebaksminde, Danijoje (Ascione et al. 2016:12)

Metro tunelio atnaujinimas Kopenhagoje, Danijoje su pūstomis fenolinėmis GFRP grotelėmis pavaizduotas 1.3 pav. Grotelės buvo atnaujintų avariniai išėjimų dalis. Atnaujinimas buvo atliktas naudojant fenolinę dervą, kad būtų pasiekta reikalinga gaisringumo klasė. Rangovas: *Fiberline Composites A/S*, Middelfartas, Danija, 2012 m.



1.3 pav. Metro tunelio atnaujinimas Kopenhagoje, Danijoje (Ascione et al. 2016:13)

1.2.2 Įgyvendintos konstrukcijos Prancūzijoje

Prancūzijoje esanti sraigtasparnio nusileidimo aikštelė, pagaminta iš pultruzijos būdu pagamintų GFRP profiliuotųjų pavaizduota 1.4 pav. Labai efektyvus sprendimas atsižvelgiant į gaisrinę saugą, svorį ir greitą montavimą. Rangovas: *TH Composites*, Prancūzija.



1.4 pav. Prancūzijoje esanti sraigtasparnio nusileidimo aikštelė (Ascione et al. 2016:13)

Laikina Kretilės katedra, Prancūzijoje. GFRP tinklelio tipo konstrukcija pagaminta iš pultruzijos būdu pagamintų vamzdelių. Uždengtas paviršius yra 350 m² ploto. Panaudota 1775m vamzdelių. Konstrukcijos svoris – 5 kg/m². Projektuotojas: *Navier* laboratorija. Rangovas: konstrukcijų inžinerijos įmonė T.E.S.S., 2014 m.



1.5 pav. Laikina Kretilės katedra, Prancūzijoje (Ascione et al. 2016:13)

1.2.3 Įgyvendintos konstrukcijos Olandijoje

Dviračių ir pėsčiųjų tiltas Floriadebruge, Olandijoje pavaizduotas 1.6 pav. Tiltos konstrukcija sudaryta iš plieninių sijų, padengtų pultruzijos būdu pagaminto GFRP denginio (iš 500 mm x 55 mm skerspjūvio lentų). Tiltas yra 127,5 m ilgio ir 6 m pločio. Konstrukcija suprojektuota vežti iki 12t svorio transporto priemonės. Rangovas: *Aa-Dee, Schijndel*, Olandija. Kompozicinės denio medžiagos gamintojas: *Bijl Profielen B.V.*, Heiningenas, Olandija, 2012 m.



1.6 pav. Dviračių ir pėsčiųjų tiltas Floriadebruge, Olandijoje (Ascione et al. 2016:16)

Pirmieji FRP užtvankos šliuzo vartai, įrengti Verkendame, Olandijoje (žr. 1.7 pav.). Bendras vartų plotis yra 6 m. Kiekvienos plokštės matmenys: plotis 3,5 m, aukštis 6,5 m. Užsakovas: *Rijkswaterstaat SMOZ* komitetas. Pagaminta kartu su *Polymarin DSM* (dervos), PPG (stiklo pluošto armavimas) ir *Bekaert* (pultruzijos būdu pagaminti profiliuočiai), 2000 m.



1.7 pav. FRP užtvankos šliuzo vartai, įrengti Verkendame, Olandijoje (Ascione et al. 2016:16)

1.3 FRP elementų gamybos būdai ir technologija

Kompozitai, kurių pagrindinės sudedamosios medžiagos yra pluoštas ir derva yra gaminami mechaniniu arba rankiniu būdu. Praktikoje yra daug įvairių kompozitų gamybos metodų, kurių kiekvienas turi savo privalumus, apribojimus ir galimybes gaminti konkrečius produktus, tokius kaip armatūra, įvairūs profiliuočiai, automobilių dalys, stulpai, lėktuvų dalys ir kiti. Priklausomai nuo gamybos proceso, pluoštas yra sudrėkinamas ir laikomas dervose. Gamybos metu derva sumaišoma su įvairiais priedais ir modifikatoriais (pvz., katalizatoriai, pigmentai, UV spindulių inhibitoriai, antipirenai ir kt.) siekiant atitikti tinkamas kietėjimo savybes, klampumą, ilgaamžiškumą, spalvą ar išvaizdą.

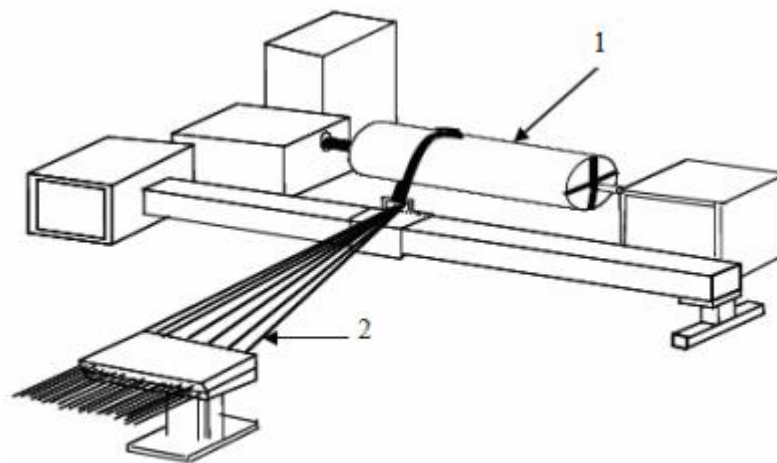
Toliau pateikti parametrai, kurie turi didelę įtaką trumpalaikėms ir ilgalaikėms kompozito savybėms:

1. Pluošto savybės ir pasiskirstymas.
2. Dervų savybės.
3. Priedų savybės.
4. Pluošto ir dervos tūrio santykis.
5. Gamybos parametrai: temperatūra, slėgis, kietėjimo laikas ir paviršiaus padengimas ir kt.

Šiuo metu gijų vijimas ir pultruzija yra dažniausiai naudojami technologiniai procesai gaminti kompozitines stiklo pluoštu armuotus polimerinius profiliuočius. Toliau pateikiami kiekvieno iš šių procesų aprašymai.

1.3.1 Vijimas

Vijimas (angl. filament winding) – gijų vyniojimo technologija dažniausiai naudojama tuščiaviduriams, apvaliems ar ovalios formos produktams gaminti. Šio proceso metu impregnuota arba sausa audinio juosta ar pluošto gija su įtempimu ir tam tikru kampu yra vyniojama ant reikiamo skersmens bei ilgio besisukančios gaminio formos (žr. 1.8 pav.). Gaminiai sukietai, jo viduje esanti forma yra išmontuojama. Norint pagreitinti stiklo pluoštu armuoto gaminio kietėjimo, neretai naudojami infraraudonųjų spindulių šildytuvai ar kitos kaitinamosios priemonės, kuriomis šildoma iš vidaus arba iš išorės.



1 – gaminio forma, 2 – stiklo pluošto gijos, pusverpaliai

1.8 pav. Vijimo technologinio proceso schema (Williams 2000:13)

Tradicinės stiklo pluošto vijimo technologinės mašinos gamina tik žiedine linkme arba įvairiu kampu vjamus pluošto gaminius, atžvilgiu sudaromosios. Naujos modernios gijų vyniojimo mašinos leidžia pluoštą paskirstyti 0° kampu, atžvilgiu išilginės gaminio ašies. Kompozicinės atramos dabar gali būti komponuojamos su optimalaus derinio žiedinių ir išilginių pluoštų paskirstymu

Gaminio formos gaminamos iš įvairių rūšių medžiagų, priklausomai nuo profiliuoties tipo:

1. Plieninės didelio tūrio dažnai naudojamiems profiliuoties.
2. Vienkartinės formos: faneros, aliuminio lakštai ir kiti nedideliems produktams, ribotos gamybos dalims ar prototipams.
3. Oro slėgio butelis (lanksti pūslė) naudojamas uždaroms dalims ar profiliuoties.

Vijimo technologijos privalumai:

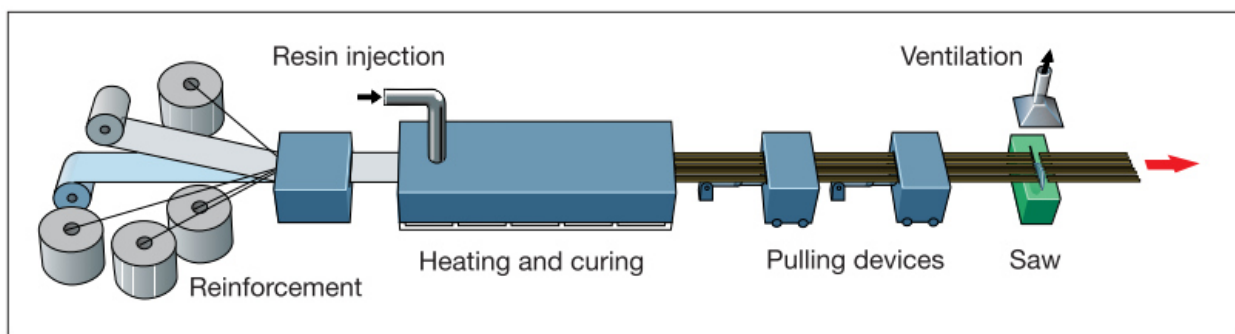
1. Greitas procesas.
2. Mažos žaliavų kainos, nes pluoštų nereikia apdoroti (t.y. nereikia pluošto austi į audinį).
3. Struktūrinės savybės gali būti labai geros, nes pluoštas gali būti pakankamai tiksliai formuojamas pritaikant apkrovas, t.y. įtempius.
4. Šiuolaikinės vyniojimo mašinos programinio valdymo būdu leidžia nustatyti tikslų armuojančios medžiagos kampą.
5. Kontroliuojamas dervos kiekis mechanizmais, tai leidžia nustatyti tikslų dervos kiekį.

1.3.2 Pultruzija

Pultruzija (*angl.* pultrusion), kildinamas iš žodžio „pull” (*liet.* traukti) ir žodžio „trusion“, bei žodžio „ekstrusion“ (*liet.* išspaudimas). Ekstruzija – tai vienodo profiliuotų gaminių (vamzdžių, plėvelių, strypų, juostų, siūlų) gavimas išspaudimo (ekstruderiu arba ekstruziniu presu) per šampą būdu. Pagrindiniai skirtumas tarp pultruzijos ir ekstruzijos procesų: ekstruzijos metu yra suformuojamas profiliuotis iš išlydytos medžiagos, o pultruzijos metu stiklo pluoštas impregnuojamas derva ir, veikiamas tam tikros jėgos, juda per šampą, kuris suformuoja stiklo pluošto profiliuotį

Pultruzijos technologija pasižymi nenutrūkstamu procesu, kurio metu stiklo pluošto siūlų matrica impregnuojama termoaktyviomis dervomis, o dervoje impregnuotas stiklo pluoštas toliau tiekiamas į įkaitintą prietaisą, kuris parinktas pagal formuojamo produkto geometrines ypatybes. (žr. 1.9 pav.) Visi profiliuotieji yra skersai sustiprinti stiklo pluošto audiniu. Profiliuoties centre išdėstytas stiklo gijų pluoštas, kuris atlaiko išilginius poveikius. Tokia struktūra atlaiko didesnius poveikius.

Kietinimo procesas vyksta įkaitusioje krosnyje, kuri sukieta dervas. Suformuotas stiklo pluošto profiliuotis supjaustomas reikiama ilgiais. Pultruzijos technologija leidžia per trumpą laiką pagaminti reikiamų charakteristikų elementą. Stiklo pluošto profiliuoties paviršiai padengti papildomu pluošto audiniu, kad būtų garantuotas UV ir oro sąlygų atsparumas.



1.9 pav. Pultruzijos procesas (Fiberline Composites 2003:4)

1.4 Kompozitas

Kompozitas apibūdinamas kaip medžiaga susidedanti iš nemažiau kaip dviejų skirtingų medžiagų komponentų. Atskirai šie komponentai gali būti netinkami naudoti statybinėse konstrukcijose, tačiau šių medžiagų kombinacijos rezultatas gali būti labai stipri ir standi medžiaga. Kompozitas kaip statybinė medžiaga yra žinoma ir naudojama pastatuose jau tūkstančius metų. Vienas iš pavyzdžių tai jau akmens amžiuje statytos trobelės iš molio ir šiaudų derinio. Šiais laikais kompozitinės medžiagos naudojamas ne tik pastatų, bet ir įvairios paskirties tiltų statybai, įskaitant ir pėsčiųjų tiltus. Paskutiniaisiais dešimtmečiais pėsčiųjų tiltams statyti buvo naudojamos įprastinės medžiagos tokios kaip plienas, medis arba gelžbetonis. Šių medžiagų jautrumas aplinkos poveikiui lemia konstrukcijos kainą, į kurią įeina konstrukcijos eksploatavimo ir atnaujinimo išlaidos. Spartesnės statybos poreikis paskatino naujų, lengvesnių, nesunkiai prižiūrimų, atsparesnių aplinkos poveikiams statybinių medžiagų bei sistemų kūrimą ir naudojimą. Šios naujos konstrukcinės medžiagos, taip pat vadinamos kompozitinėmis medžiagomis, pirmą kartą buvo panaudotos 19a. 6-ajame dešimtmetyje betoninių konstrukcijų stiprinimui.

Svarbi kompozitų, kurie naudojami šiandien, dalis yra įvairiais pluoštais armuotas plastmasė dar kitaip žinomas kaip pluoštu armuoti polimerai (*angl. fiber reinforced polymer (FRP)*). Dėl aukštų medžiagų savybių reikalavimų FRP taikymo sritis buvo apribota ties aviacija ir laivyba. Beje, ši medžiaga buvo per brangi kaip statybinė medžiaga lyginant su kitomis. Tačiau per kelis pastaruosius metus reikalavimai statybų srityje išaugo, todėl tai ženkliai sumažino FRP gamybos kainą bei paskatino šių medžiagų naudojimą statybos srityje. Šios medžiagos pradėtos naudoti įvairiose konstrukcijose, tokiose kaip pėsčiųjų tiltai, transporto tiltai, pastatų rėminės konstrukcijos, laiptai, bokštai, pėsčiųjų takai. Dėl FRP konstrukcinių elementų privalumų, yra keletas FRP konstrukcijų panaudojimo galimybių tiltų statyboje. FRP sistemos dažniausiai naudojamos remontui ir naujų tiltų statybai kaip betono armatūra; juostos ir lakštai konstrukcijų stiprinimui; tilto pakloto plokštės. Kelis pavyzdžius galime rasti ir Europoje: 114 m kabantis Aberfeldžio pėsčiųjų tiltas Aberfeldyje, Škotijoje; 40 m ilgio kabantis tiltas *Fiberline* tiltas Koldinge, Danijoje; 38 m span *Lleida* pėsčiųjų tiltas Ispanijoje.

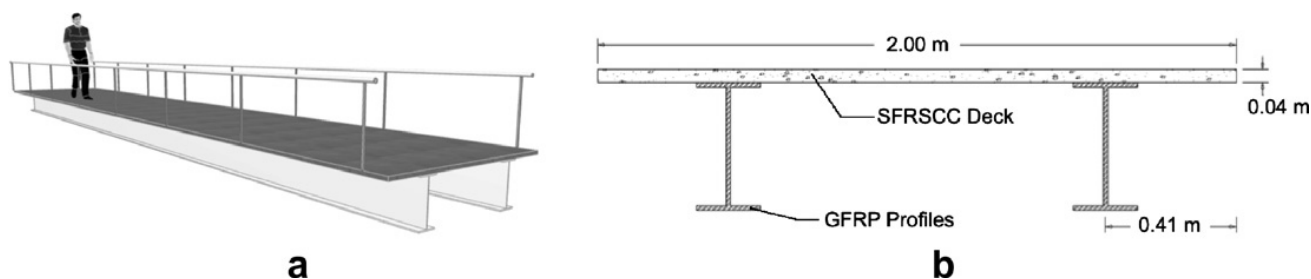
Kita svarbi inovacija naudojama tiltų statyboje yra savaimė susitankinantis betonas (*angl. self-compacting concrete (SCC)*). Tai betonas, kuris nereikalauja vibravimo ir tankinimo. SCC vertinimas dėl savo takumo be stabilumo praradimo. Jis gali tekėti savo svoriu, visiškai užpildydamas klojinį ir pasiekdamas pilną sutankinimą net jeigu gaminys yra suarmuotas. Pirmieji šios medžiagos tyrimai buvo atlikti 19 a. 8-jame dešimtmetyje Tokijo universitete, pripažįstant betono vientisumo ir visiško sutankinimo vibracija, kai armavimo procentas yra didelis, trūkumą. Tačiau pirmasis žinomas SCC taikymas buvo 10-tojo dešimtmečio pradžioje Japonijoje sukurtas prototipas. Nuo tada Europos šalys

parodė didelį susidomėjimą SCC plėtojimo galimybėmis. Jungtinėse Amerikos valstijose SCC taikymas tiltų statyboje buvo labai ribotas.

Neseniai tyrėjai sukūrė pluoštu armuotą savaime susitankinantį betoną (*angl. fiber reinforced selfcompacting concrete (FRSCC)*). Tai yra kompozitinė medžiaga, kuri susideda iš tam tikro pluošto (dažniausiai plieno arba sintetinių pluoštų) ir SCC betono. Šio medžiagų derinio privalumas yra suderinti puikias SCC ir pluoštų savybes. Plieno pluošto pridėjimas prie cemento pagrindą turinčio struktūros žymiai padidinti jo liekamąją stiprį po įtrūkių, tačiau sumažėja medžiagos takumas ir tinkamumas. Kad būtų išvengta FRSCC sudėtinių dalių atsiskyrimo, reikia naudoti tinkamą mišinį priimtas pagal projektavimo metodikas.

1.5 Betono ir polimerinių profiliuotųjų pėsčiųjų tilto tyrimo analizė

Savo moksliniame straipsnyje J. D. Mendes ir kt. (Mendes et al. 2011) tiria 12 m tarpatramio pėsčiųjų tilto imitaciją naudojant du mažesnius tilto prototipus iš plieno pluoštu armuoto savaime susitankinančio betono (*angl. steel fiber reinforced self-compacting concrete, toliau – SFRSCC*) ir stiklo pluoštu armuoto polimerinių (*angl. glass fiber reinforced polymer, toliau – GFRP*) „I“ formos profiliuotųjų. Norint įvertinti FRSCC ir GFRP medžiagų derinio efektyvumą pėsčiųjų tilto konstrukcijoje, buvo atliktas skaitinis modeliavimas ir eksperimentiniai bandymai. Pėsčiųjų tilto analizė buvo atlikta naudojant du stiklo pluoštu sustiprintus I formos polimerinius (GFRP) profiliuotuosius, išdėstytus išilgai ir sujungtus su plieno pluoštu armuotu savaime susitankinančiu betoniniu (SFRSCC) paklotu (žr. 1.10 pav.). SFRSCC paklotas skirtas atlaikyti gniuždymo įtempius, o GFRP profiliuotieji skirti atlaikyti tempimo įtempius. Jungtį tarp abiejų medžiagų užtikrina plieniniai inkariniai varžtai ir epoksidinė derva. SFRSCC sluoksnis taip pat turėtų padidinti konstrukcijos lenkiamąją standumą.



1.10 pav. Projektuojamas pėsčiųjų tiltas: (a) vaizdas iš perspektyvos ar (b) skerspjūvis (Mendes et al. 2011:2970)

Dėl labai mažo betono sluoksnio storio (40 mm), paklotas yra gana jautrus makro-įtrūkiams, susidariusiems kietėjimo metu, kai yra jungiamos abi medžiagos.

1.5.1 Medžiagos savybės

1.1 lentelėje galime matyti SFRSCC mišinio sudedamąsias dalis. 1.2 lentelė parodo šios medžiagos mechanines ir reologines savybes. Naudojamas 45 kg/m^3 , 35 mm ilgio, 0,55 mm diametro ir 1100 MPa tempiamojo stiprio plieno pluoštas lenktais galais. SFRSCC suformuoti naudojama metodika paremta trimis žingsniais:

- 1) Apibrėžtos rišiklio sudedamųjų dalių proporcijos;
- 2) Nustatytos kiekvieno užpildo proporcijos grūdėtam mišiniui gauti;
- 1) Rišiklis ir grūdėtasis mišinys sumaišomi tam tikromis proporcijomis, kol pasiekiamas tinkamas takumas, takumo greitis, užpildymo galimybė, užtikrintas atsparumas užsikimšimui ir atskyrimui leidžia nustatyti optimalų rišiklio kiekį betone.

GFRP profiliuočiai yra gaminami pultruzijos proceso metu ir sudaryti iš E-stiklo pluoštų, įterptų į poliesterio matricą. Remiantis keliais šios medžiagos atliktais tyrimais vidutinis tempiamasis stiprumas išilgai pluošto yra 500 MPa, o gniuždomasis stiprumas ta pačia linkme 375 MPa. Negana to, šiame tyrime buvo išbandyti du GFRP profiliuočiai, kurių Jungo modulio reikšmė siekė 34 GPa.

1.1 lentelė. SFRSCC mišinio sudedamųjų dalių proporcijos į m^3 (pagal Mendes et al. 2011)

Cementas (kg)	Kalkakmenio užpildas (kg)	Vanduo (kg)	Superplastiklis (kg)	Smulkus smėlis (kg)	Upės smėlis (kg)	Skalda (kg)	Pluoštas (kg)
380,54	326,17	126,83	6,09	362,59	574,58	510,05	45

1.2 lentelė. Reologinės ir mechaninės SFRSCC savybės (pagal Mendes et al. 2011)

Parametras	Reikšmė
Nuosmūkis	$Diametras = 80 \text{ cm}$
	$T50 = 4 \text{ s}$
V-piltuvėlis	$T = 9 \text{ s}$
L-dėžė	$H2/H1 = 0.8$
Gniuždomasis stipris	59,87 MPa
Tempiamasis stipris	10,20 MPa
Tamprumo modulis	32 GPa

1.5.2 Valkšnumo testas

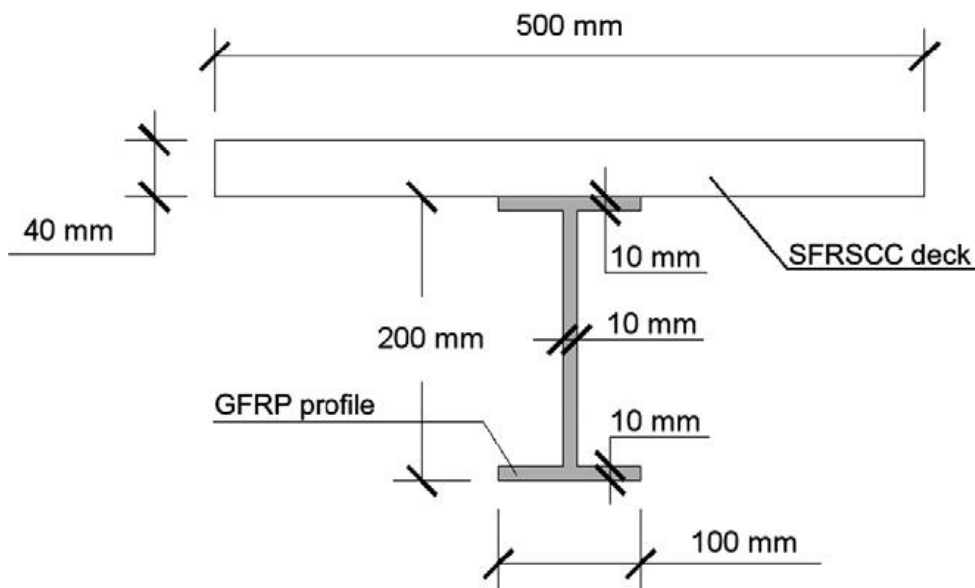
1.5.2.1 Valkšnumas

Valkšnumas – betono savybė ilginiui plastiškai deformuotis, veikiant nekintamajai ilgalaikiai apkrovai. Betono valkšnumas pasireiškia veikiant apkrovoms arba pradiniais įtempiais, kuriuos sukelia betono traukimas, išankstinis apspaudimas bei temperatūros pokytis (Bank et al. 2006). Nedidelis valkšnumas gali būti palankus, jei jis sumažina tempimo įtempius priešingu atveju gali atsirasti įtrūkiai. Valkšnumas priklauso nuo laiko, vis dėlto, deformacija gali būti suirimo priežastimi.

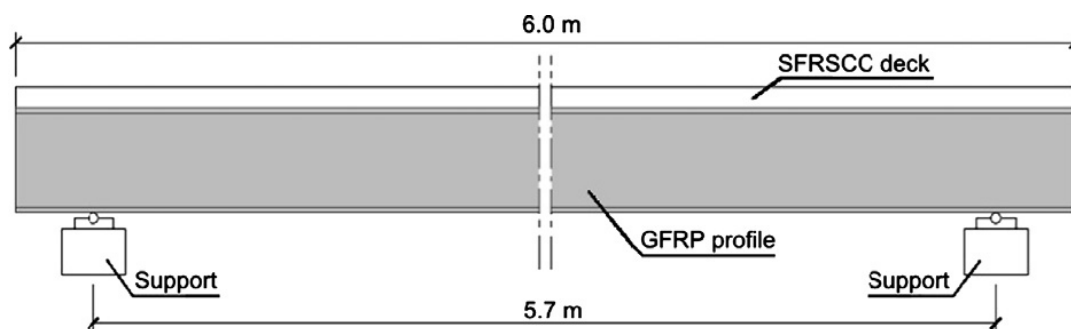
1.5.2.2 Pėsčiųjų tilto prototipas

Buvo sukurti du prototipai, kad būtų išsiaiškinta dabartinės pėsčiųjų tilto konstrukcinės sistemos elgsena.

Šių prototipų geometrija buvo remiantis 12 m pėsčiųjų tilto konstrukcine sistema. Deja, šio prototipo ilgis yra tik pusė originalaus tilto tarpatramio – 6 m, o SFRSCC pakloto plotis yra 0,5 m, 4 kartus mažesnis už realaus tilto plotį. Atliekant valkšnumo tyrimą, abiejų prototipų matmenys yra vienodi. Matmenis ir atrėmimo atvejį galime matyti 1.2 ir 1.3 pav.

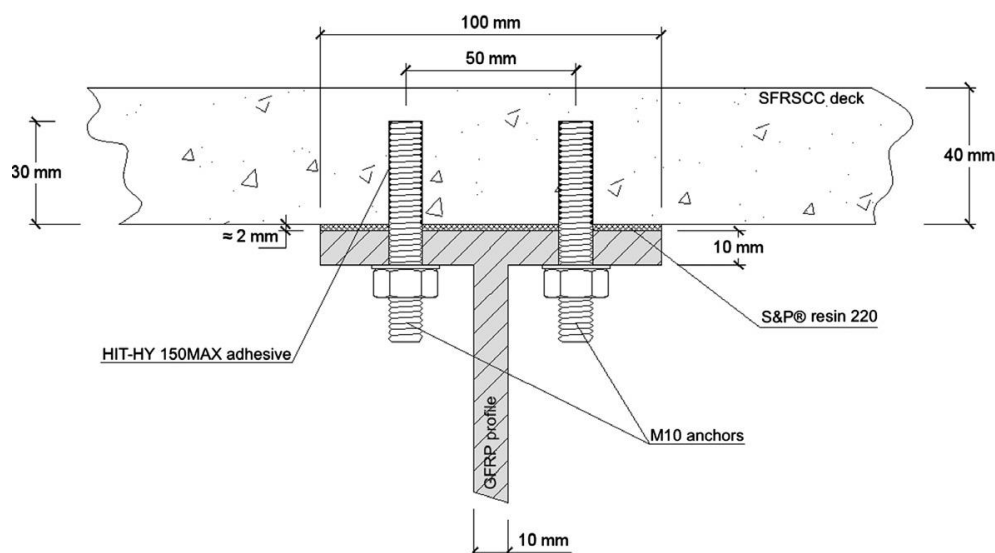


1.11 pav. Tyrime išbandyto prototipo skerspjūvis (Mendes et al. 2011:2970)

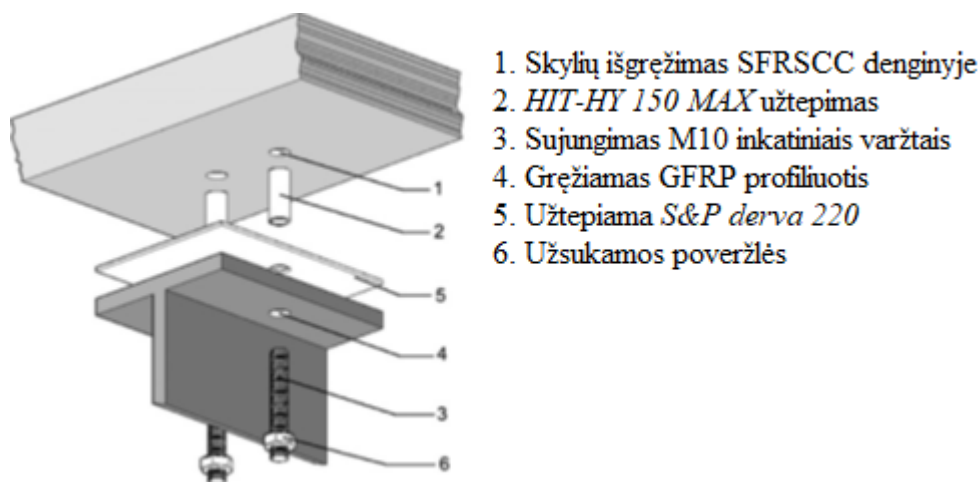


1.12 pav. Tyrimė išbandyto prototipo šoninis vaizdas (Mendes et al. 2011:2971)

Sukurti du prototipai norint įvertinti dviejų skirtingų jungčių tarp SFRSCC pakloto ir GFRP profiliuoties įtaką. Jungtis tarp SFRSCC pakloto ir GFRP profiliuoties yra iš M10 plieninių inkarinių varžtų, priklijuotų prie betoninio pakloto su HIT-HY 150 MAX epoksidine derva ir priveržtų prie GFRP profiliuoties. SFRSCC pakloto paviršius ir GFRP profiliuoties kontakto zona taip pat sutepta epoksidine derva *S&P Resin 220*. Inkariniai varžtai įgilinti į betoną 30 mm norint užtikrinti pakankamą sukibimą tarp varžtų ir betono. Skirtumas tarp prototipų jungčių yra toks, kad pirmajame prototipe (PROT_125) atstumas tarp M10 inkarinių varžtų 125 mm, o antrajame prototipe (PROT_200) – 200 mm. 1.4 pav. pavaizduota sumontuota jungtis, o 1.5 pav. parodytas jungties montavimo eiliškumas.



1.13 pav. Jungtis tarp SFRSCC pakloto ir GFRP profiliuoties (Mendes et al. 2011:2972)



1.14 pav. Jungties tarp montavimo eiliškumas (pagal Mendes et al. 2011:2972)

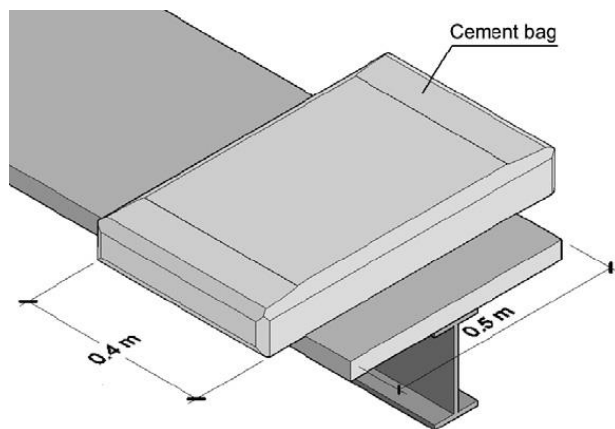
Pagal Eurokodą 1, 2 dalies apkrovų klasifikaciją, pėsčiųjų tilto projektavimui rekomenduojama tolygiai paskirstyta apkrova q_{fk} , apskaičiuota pagal formulę (1) turėtų būti taikoma išilgai ir skersai elemento tik nepalankiose įtakos paviršiaus vietose išilgai ir skersai.

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \text{ (kN/m}^2\text{)}; \quad q_{fk} \geq 2,5 \text{ (kN/m}^2\text{)}; \quad (1)$$

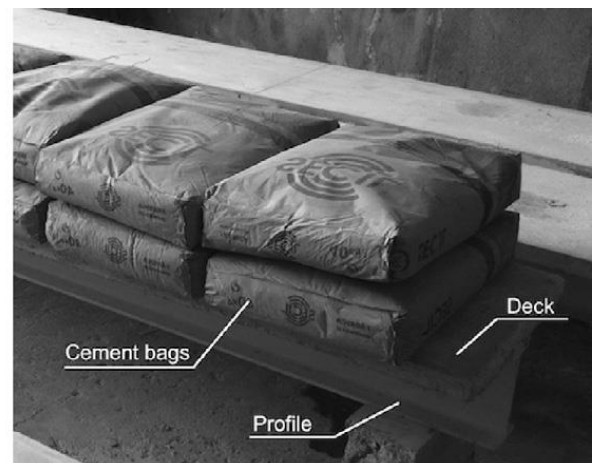
$$q_{fk} \leq 5,0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

čia: L – apkrovos ilgis, m;

Kai apkrovos ilgis yra 5,7 m, iš formulės (1) gaunama, kad tolygiai paskirstyta apkrova ant pakloto paviršiaus 5 kN/m². Norint įvertinti ilgalaikį poveikį, Eurokodas 0 rekomenduoja beveik nuolatinį apkrovos derinys, kai apkraunama 30 % kintamos apkrovos. Tačiau šios rekomendacijos yra tinkamos gelžbetoninėms konstrukcijoms, o tyrime nagrinėjimui konstrukcijos tipui standarto nėra. Taigi, valkšnumo bandymuose naudojama kintama apkrova buvo pakoreguota taip, kad būtų galima greičiau įvertinti valkšnumo efektą, t. y. įvertinti valkšnumą per trumpą laiką, skirtą šiam projektui. Buvo pasirinkta 4 kN/m² kintama apkrova. Tokia apkrova buvo įgyvendinta naudojant 40 kg cemento maišus (žiūrėti 1.6 pav.).



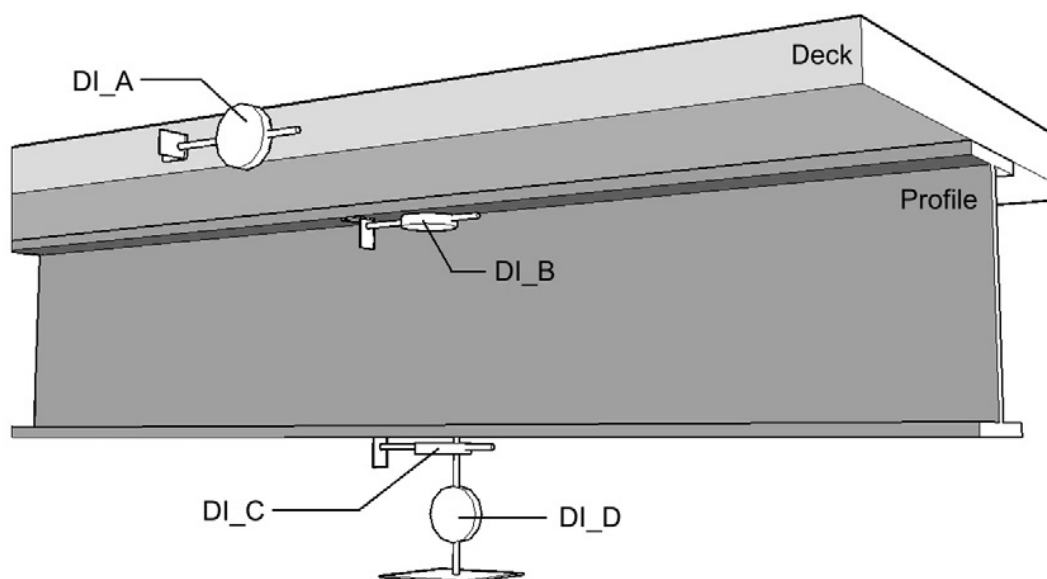
a



b

1.15 pav. Cemento maišas, naudotas apkrovai imituoti (a), apkrovimo aparatas (b) (Mendes et al. 2011:2972)

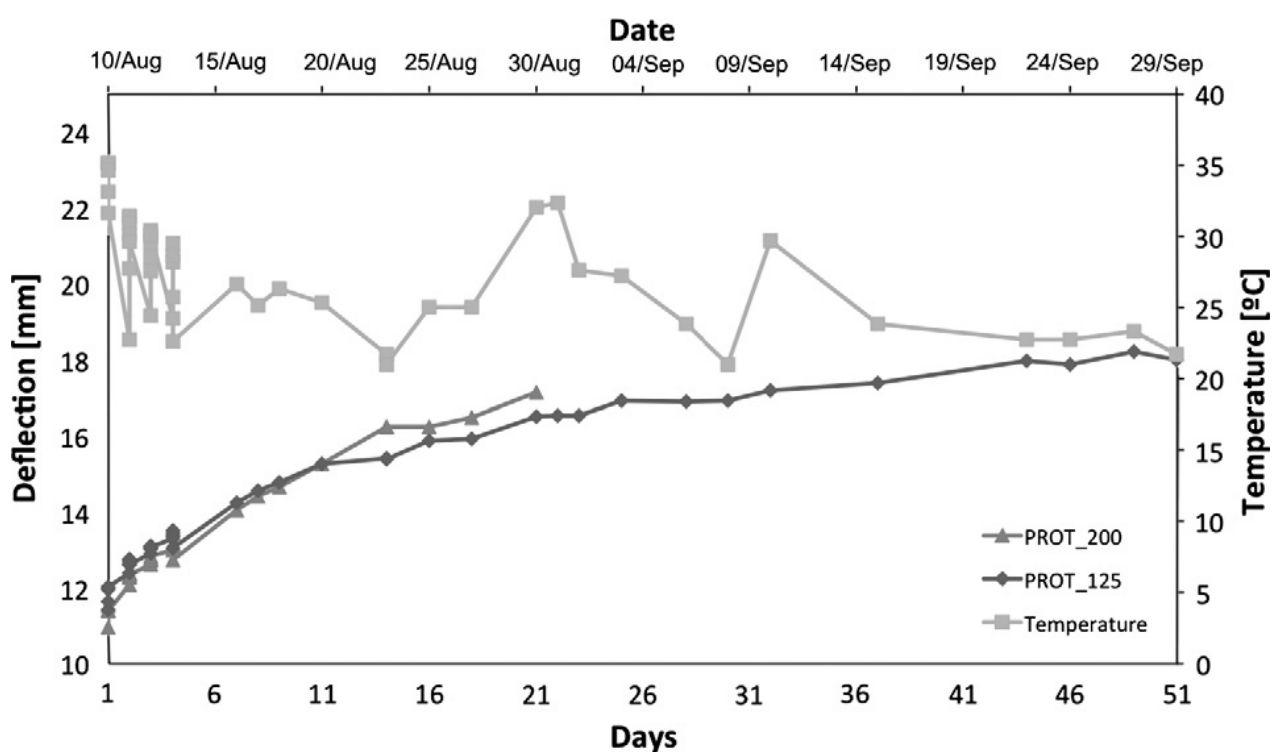
Norint išmatuoti įlinkį tarpatramio viduryje, įtempius SFRSCC paklote ir GFRP profiliuotyje, matuokliai buvo išdėlioti 4 skirtingose vietose abėjuose prototipuose. Matuoklių išdėstymą galima matyti 1.7 pav. Pirmasis (DI_A, 5 mm, 1 μ m tikslumas) iš matuoklių matuoklis pritvirtintas per vidurį šoniniame SFRSCC pakloto paviršiuje ir naudojamas matuoti betono įtempius. Antrasis (DI_B, 5 mm, and 1 μ m tikslumas) sumontuotas GFRP profiliuotio viršutinėje lentynoje (1/2 lentynos centre) ir naudojamas matuoti įtempius šiame taške. Norint įvertinti deformaciją apatinėje profiliuotio lentynoje, čia montuojamas trečiasis matuoklis (DI_C , 10 mm, 10 μ m tikslumas). Ketvirtasis matuoklis (DI_D, 40 mm, 10 μ m tikslumas) skirtas matuoti įlinkį tarpatramio viduryje. Atkreipiamas dėmesys, kad dėl santykinai didelių prototipų dydžių nebuvo galima naudoti klimato kameros, kad būtų kontroliuojamas temperatūros ir drėgmės poveikis.



1.16 pav. Skaitiklių išdėstymas prototipe (Mendes et al. 2011:2973)

1.5.2.3 Tyrimo rezultatai

Eksperimentas buvo vykdomas tarp 2010 m. rugpjūčio 10 d. ir tų pačių metų rugsėjo 29d. Eksperimentas buvo atliekamas 51 dieną. Kintama apkrova buvo uždėta po 90 betono kietėjimo dienų. Eksperimento laikotarpiu klimatas buvo karštas (temperatūra apie 32°C) ir sausas (santykinė drėgmė 22 %), ypač pirmosiomis 20 dienomis. Iš kitos pusės, paskutines 23 dienas kintamos apkrovos laikotarpiu buvo užregistruotas temperatūros kritimas ir drėgmės padidėjimas. Sudėtingas tikslus simetriškas kintamųjų apkrovų pozicionavimas lėmė prototipo PROT_200 nukritimą nuo atramų 21-ąją eksperimento dieną. Dėl to, PROT_200 reikšmės buvo išmatuotos 21-ąją dieną, o PROT_125 matavimo rezultatai buvo gauti 51-ąją dieną. 1.8 pav. galima matyti abiejų prototipų laiko ir įlinkio ryšį kartu su temperatūros matavimais.

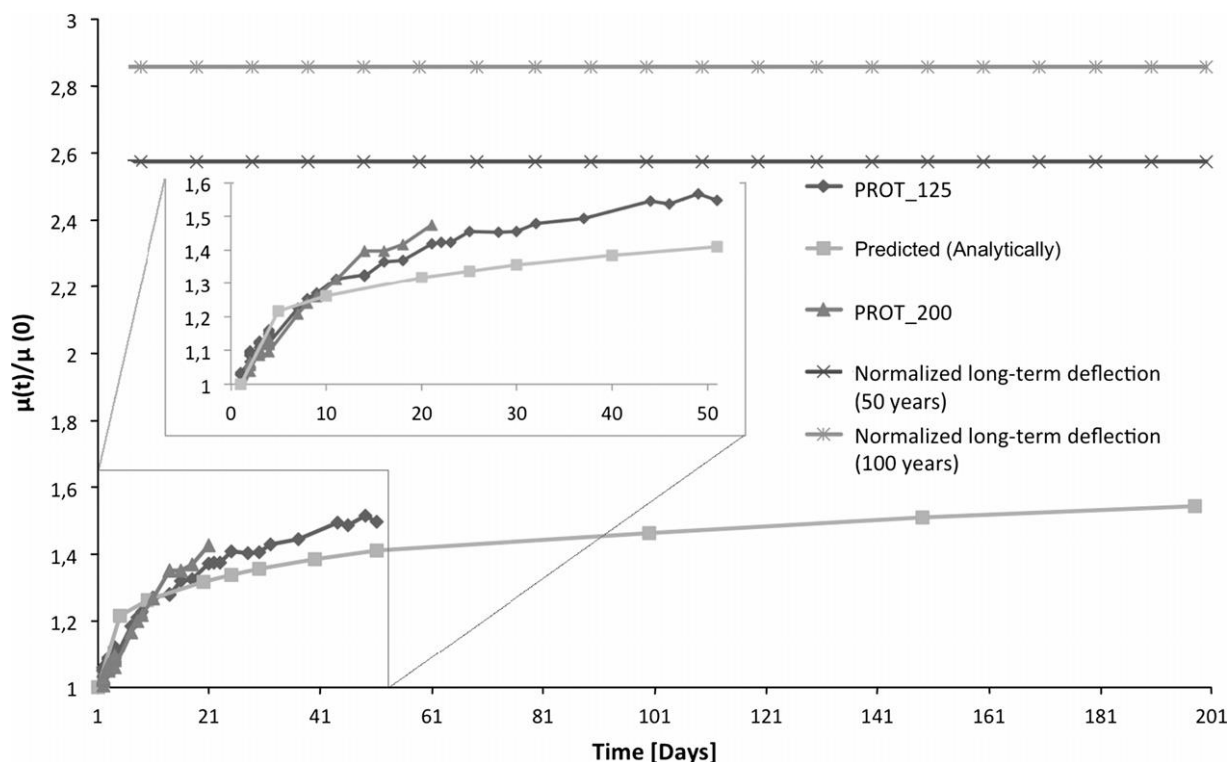


1.17 pav. Laiko ir įlinkio santykis PROT_125 ir PROT_200 (Mendes et al. 2011:2973)

Įlinkio kitimas abiejuose prototipuose iki 21-osios eksperimento dienos buvo panašus. Šią dieną PROT_125 ir PROT_200 įlinkis atitinkamai buvo 16,5 mm ir 17,1 mm. 51-ąją eksperimento dieną PROT_125 įlinkis buvo 18,0 mm. Norint įvertinti ilgalaikį abiejų prototipų įlinkį, buvo išmatuotas trumpalaikis įlinkis (elastinis įlinkis), kuris buvo priimtas, kai buvo uždėtas paskutinis cemento maišas. Momentinis įlinkis PROT_125 ir PROT_200 atitinkamai buvo 11,9 mm ir 11,5 mm, kuris atitinka momentinį elastinį įlinkį pagal Bernoulli sijų teoriją (11,6 mm).

1.9 pav. parodo ryšį tarp $\mu(t)/\mu(0)$ santykio ir laiko (dienomis) abiejų prototipų atveju, kur $\mu(0)$ ir $\mu(t)$ atitinkamai yra momentinis įlinkis ir įlinkis t-ąją dieną po kintamosios apkrovos

uždėjimo. Iš šio paveikslo galima pastebėti, kad panašūs rezultatai buvo gauti abiem atvejais, atsižvelgiant į valkšnumo įlinkį. Dėl valkšnumo įlinkis prototipe PROT_125 padidėjo 51 % po 51 dienos, o PROT_200 – 48 %, po 21 dienos. 21-ąją eksperimento dieną PROT_125 įlinkis padidėjo 38 %. Įlinkio skirtumas tarp abiejų prototipų 21-ąją dieną yra 10 %. Tai reiškia, kad inkarinių varžtų atstumui esant 200 mm, valkšnumo įlinkis turėtų būti 10 % didesnis nei kai atstumas tarp inkarinių varžtų 125 mm.



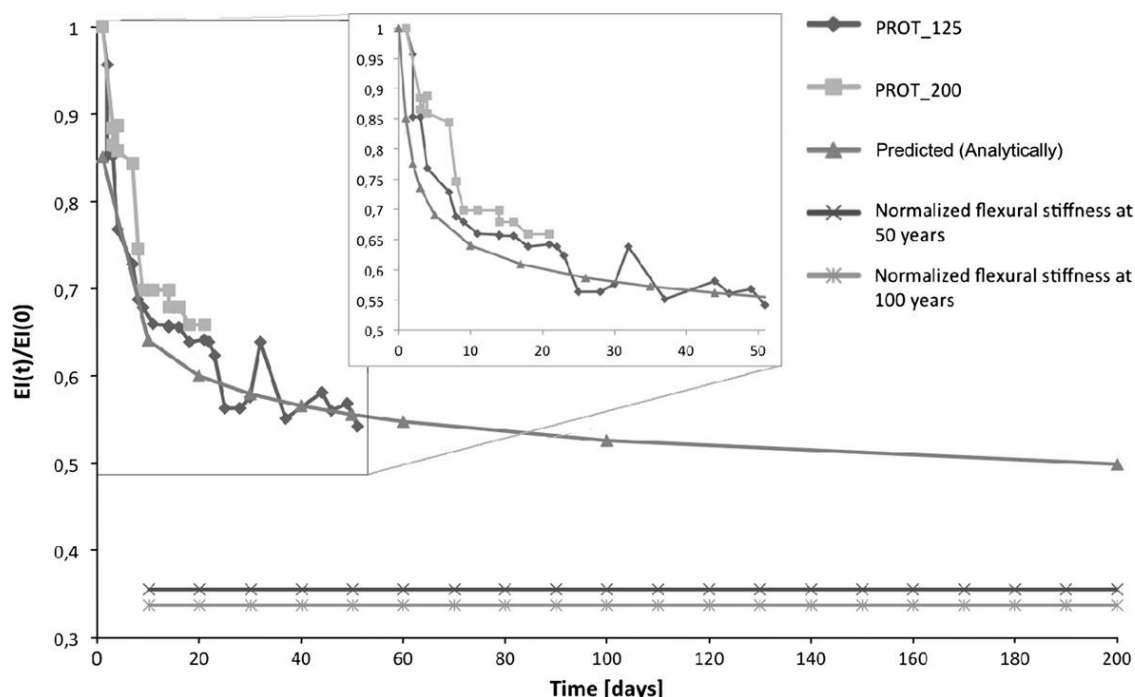
1.18 pav. Valkšnumo elgsena: eksperimentiniai ir numatomi skaitiniai rezultatai (Mendes et al. 2011:2974)

1.10 pav. matomas santykinio lenkiamojo standumo ($EI(t)/EI(0)$) kitimas laike registruotas abėjuose prototipuose, kai $EI(0)$ ir $EI(t)$ atitinkamai yra momentinis lenkiamasis standumas ir lenkiamasis standumas t -ąją dieną po kintamos apkrovos pridėjimo. Lenkiamasis standumas buvo įvertintas remiantis elastingumo teorija, pagal gautą apkrovą ir įlinkį.

Dėl valkšnumo poveikio 21-osios ir 51-osios dienos lenkiamojo standumo santykis atitinkamai sumažėjo 35 % ir 46 %. 1.10 pav. taip pat atvaizduoja formulę, kuri labiausiai atitinka 51-os dienos duomenis :

$$\frac{EI(t)}{EI(0)} = \frac{1 + t^{1.11}}{1 + 1.35 \cdot t^{1.185}} \quad ; \quad (2)$$

Pagal šią formulę EI po 50 ir 100 metų atitinkamai bus 826,1 kNm² ir 778,9 kNm². Tai atitinka 35 % ir 33 % momentinio elastinio lenkiamojo standumo.



1.19 pav. Lenkiamojo standumo kitimas: eksperimentiniai ir numatomi skaitiniai rezultatai (Mendes et al. 2011:2974)

Norint įvertinti ilgalaikį įlinkį dėl valkšnumo, SFRSCC sluoksnio valkšnumo elgsena buvo įvertinta pagal Eurokodo 2 rekomendacijas, 1 dalį ir *CEB-FIP Model Code 1900*, GFRP profiliuotio valkšnumo elgsena buvo priimta atsižvelgiant į valkšnumo dėsnius siūlomo C. A. A. Basto ir J. A. Q. Barros'o (Basto & Barros 2008).

Remiantis valkšnumo dėsniu, efektyvusis betono tamprumo modulis buvo įvertintas naudojant formulę (3), kur valkšnumo parametras $\varphi(t, t_0)$ apskaičiuotas naudojant formulę (4), kur $E_{e,eff}$ yra efektyvusis betono tamprumo modulis; E_{cm} – vidutinis tamprumo modulis po 28 kietėjimo parų; φ_0 sąlyginis valkšnumo koeficientas; $\beta_c(t - t_0)$ – koeficientas, nusakantis valkšnumo kitimą laikui bėgant po apkrovimo, kur t – laikas dienomis, t_0 – betono amžius apkrovimo metu, dienomis.

$$E_{e,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad ; \quad (3)$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad ; \quad (4)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad . \quad (5)$$

Dėl GFRP profiliuotųjų, atsižvelgiant į L. C. Banko valkšnumo teoriją, GFRP išilginis viskoelastinis modulis E_L^v skaičiuojamas pagal formulę:

$$E_L^v = \frac{E_L}{1 + \left(\frac{E_L}{E_L^t}\right) \cdot t^{n_e}} \quad ; \quad (6)$$

čia: E_L – momentinis modulis (34 GPa); E_L^t – valkšnumo modulis (1,23 GPa); t – laikas valandomis po apkrovimo; n_e – valkšnumo greičio eksponentė (0,3).

Naudojant formules (3)–(6), betono ir GFRP moduliai buvo apskaičiuoti amžiais, atsižvelgiant į temperatūros ir drėgmės įrašus, kaip buvo pasiūlyta CEB-FIP 1990.

Iš skaičiavimų gavus $E_{e,eff}$ ir E_L^v atitinkamai SFRSCC paklotui ir GFRP profiliuotui, tapo aiškus įlinkio laike kitimas. Reikšmės buvo palygintos su 1.9 pav. esančiais eksperimentiniais rezultatais. Pastebima, kad bet pirmąsias 15 dienų, rezultatai buvo labai panašūs. Skirtumas tarp 51-oios dienos eksperimentiniai ir analitiniai rezultatai skiriasi tik 6 % (apie 1 mm). Šie rezultatai parodo, kad valkšnumo elgsena tilto prototipuose gali būti pagrįstai nuspėjama naudojant turimus analitinius modelius. Be to, panaudojus šį analitinį būdą galima nuspėti valkšnumo įlinkį po 50 ir 100 metų, atitinkamai jis padidėja 158 % ir 186 % , lyginant su momentiniais įlinkiais (1.9 pav.).

Išvados

Statant pėsčiųjų tiltus dažnai naudojamos medžiagos yra plienas, mediena ir gelžbetonis. Tačiau vertėtų įvertinti kompozitinių medžiagų efektyvumą. Lengvesnis, atsparus aplinkos poveikiui, greitai ir nesudėtingai montuojamos kompozitinės medžiagos yra plačiai pritaikomos. Šiame tyrime 12 m tarpatramio pėsčiųjų tiltui imituoti buvo priimta kompozitinė konstrukcija, kurią sudaro du elementai: plieno pluoštu armuoto savaimės susitankinančio betono (SFRSCC) 40 mm storio ir 2m ilgio paklotas bei GFRP „I“ formos profiliuotieji. Jungčiai tarp SFRSCC pakloto ir GFRP profiliuotųjų buvo naudojami plieniniai inkariniai M10 varžtai ir epoksidinė derva. Buvo atlikti eksperimentiniai bandymai ir analitiniai skaičiavimų analizė, kurių metu buvo aiškinimasi valkšnumo poveikis konstrukcijai ir jos elgsenai, tiriamas konstrukcijos įlinkis.

Valkšnumo bandymui buvo naudoti du pėsčiųjų tilto prototipai, su skirtingu inkarinių M10 varžtų išdėstymu. Bandymai parodė, kad naudojant mažesnę atstumą tarp inkarinių M10 varžtų neturi didelės įtakos ir naudos tilto elgsenai, t. y. prototipų ilgalaikiai įlinkiai nebuvo paveikti didesnio atstumo tarp inkarinių varžtų, rezultatai nebuvo stipriai nutolę vienas nuo kito lyginant su 21-osios dienos įlinkių rezultatais, kurie skyrėsi 10 % . Be to 51-osio apkrovimo dienos ilgalaikis įlinkis

padidējo 60 % vien tik dēļ valkšnumo poveikio. Ļ tai turētū būti atsižvelgta projektuoiant tokius pēsčiųjū tiltus.

2 Konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį

Tikimybiniams statistiniams skaičiavimams nagrinėjamas kompozitinės perdangos fragmentas, sudarytas iš betono ir stiklo pluoštu armuoto polimerinių (*angl.* glass fiber reinforced polymer, toliau – GFRP) plačiajuosčių (*angl.* wide-flange, toliau – WF) profiliuotųjų.

Skaičiavimai yra supaprastinti neįvertinus jungties tarp betono ir profiliuotųjų darbo. Priimame, kad abi medžiagos dirba kaip viena.

Ši konstrukcija projektuojama pagal tinkamumo ribinį būvį (skaičiuojamas įlinkis), kad būtų užtikrintas sistemos normuotasis patikimumas.

2.1 Konstrukcijos skaičiuojamoji schema ir pradiniai duomenys

Pasirinktas pėsčiųjų tilto denginio fragmentas, sudarytas iš betono denginio ir GFRP profiliuotųjų. Konstrukcijos skaičiuojamoji schema pateikta 2.1 pav.

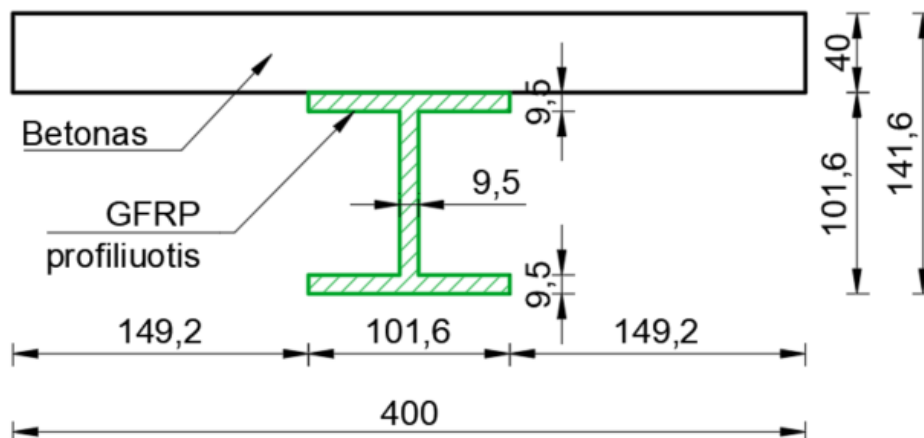
Pateikiami pradiniai skaičiuojamos konstrukcijos duomenys:

GFRP I tipo profiliuotųjų parametrai:

$$A_p = 0,003 \text{ m}^2; \quad I_p = 0,54179 \text{ m}^4; \quad b_p = 0,1016 \text{ m}; \quad h_p = 0,1016 \text{ m};$$

$$L = 2,8 \text{ m}; \quad E_p = 32,89 \text{ GPa}, \quad g_{\text{GFRP}} = 5.1 \text{ kg/m};$$

čia: A_p – sijos profiliuotųjų skerspjūvio plotas; I_p – sijos profiliuotųjų inercijos momentas; b_p – sijos profiliuotųjų plotis; h_p – sijos profiliuotųjų aukštis; L – sijos ilgis; E_p – sijos tamprumo modulis.



2.1 pav. Kompozitinės perdangos fragmentas

Betoninio denginio parametrai:

$$A_c = b_c \cdot h_c = 0,016 \text{ m}^2; \quad b_c = 0,4 \text{ m}; \quad h_c = 0,04 \text{ m};$$

$$E_p = 26,07 \text{ GPa}; \quad g_{\text{betono}} = 1 \text{ kN/m}^2;$$

čia: A_c – betoninio denginio skerspjūvio plotas; b_p – betoninio denginio plotis; h_p – betoninio denginio aukštis; E_c – betono tamprumo modulis; E_s – betono tamprumo modulis; g_c – betono savasis svoris, kai denginio storis 0,04 m .

Pateikiamos apkrovų ir dalinių koeficientų reikšmės.

Daliniai koeficientai tinkamumo ribiniam būviui:

Nuolatinei apkrovai $\gamma_G = 1.35$.

Kintamajai apkrovai $\gamma_Q = 1$

Nuosavas svoris:

- Charakteristinė reikšmė:

$$g_k = \frac{g_{GFRP} \cdot g}{1000} + g_c \cdot b_c = 0.45 \text{ kN/m}.$$

- Skaičiuotinė reikšmė:

$$g_d = \gamma_G \cdot g_k = 0.608 \text{ kN/m}.$$

Kintamoji apkrova pėsčiųjų tiltui:

- Charakteristinė reikšmė:

$$Q_k = 5 \text{ kN/m}^2;$$

$$q_k = Q_k \cdot b_c = 2 \text{ kN/m}.$$

- Skaičiuotinė reikšmė:

$$q_d = \gamma_G \cdot q_k = 2 \text{ kN/m}.$$

2.2 Įlinkio skaičiavimas

Kad būtų įvertintas konstrukcijos bendras darbas skaičiuojant įlinkį, skaičiuojamas konstrukcijos redukuotas inercijos momentas I_{red} ir redukuoto skerspjūvio svorio centro padėtis x_{el} .

$$x_{el} := \frac{\left(A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2}\right) + n \cdot A_c \cdot \frac{h_c}{2}\right)}{A_p + n \cdot A_c} = 0.022 \text{ m};$$

$$I_{red} := \frac{(n \cdot A_c \cdot h_c^2)}{12} + n \cdot A_c \cdot \left(x_{el} - \frac{h_c}{2}\right)^2 + I_p + A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2} - x_{el}\right)^2 = 3.643 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4.$$

Konstrukcijos įlinkis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w := \frac{(5 \cdot (g_d + q_d) \cdot L^4)}{384 \cdot E_p \cdot I_{red}} = 0.002 \text{ m}.$$

Ribinis konstrukcijos įlinkis apskaičiuojamas pagal formulę (STR 2.05.04:2003, XVII skyrius, III skirsnis) :

$$w_{lim} := \frac{L}{200} = 0.014 \text{ m}.$$

Gautas įlinkis turi tenkinti ribinį:

$$w = 0.002 \text{ m} \leq w_{lim} = 0.014 \text{ m}.$$

Sąlyga tenkinama.

2.3 Atsargos funkcija ir dalinės išvestinės. Patikimumo skaičiavimas

Sudaroma atsargos formulė Z:

$$Z = w_{lim} - w + \Delta R. \quad (7)$$

Sisteminę skaičiavimų paklaidą priimame 5 % nuo atsargos:

$$\Delta R = (w_{lim} - w) \cdot 0.05. \quad (8)$$

Pasinaudojus atsargos formule gaunama atsargos funkcija. Diferencijuodami šią funkciją gausime dydžius, kurie parodo, kokią įtaką jie turi skaičiuojamam parametrai. Skaičiavimai atliekami programine įranga *MathCad*.

$$Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = \frac{L}{200} \cdot \frac{(5 \cdot (g_d + q_d) \cdot L^4)}{384 \cdot E_p \cdot \left(\frac{\left(\frac{E_s \cdot (b_c \cdot h_c) \cdot h_c^2}{12} + \frac{E_s \cdot (b_c \cdot h_c)}{E_c} \cdot \left(\frac{\left(\frac{A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2} \right) + \frac{E_s \cdot (b_c \cdot h_c)}{E_c} \cdot \frac{h_c}{2} \right)}{A_p + \frac{E_s}{E_c} \cdot (b_c \cdot h_c)} \right) - \frac{h_c}{2} \right) + I_p + A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2} - \frac{\left(\frac{A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2} \right) + \frac{E_s \cdot (b_c \cdot h_c)}{E_c} \cdot \frac{h_c}{2} \right)}{A_p + \frac{E_s}{E_c} \cdot (b_c \cdot h_c)} \right) \right)^2}{\left(\frac{A_p \cdot \left(h_c + \frac{h_p}{2} \right) + \frac{E_s \cdot (b_c \cdot h_c)}{E_c} \cdot \frac{h_c}{2} \right)} \right)^2} + \Delta L \quad (9)$$

Toliau pateikiamos gautos dalinių išvestinių reikšmės.

$$\frac{d}{dh_c} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 0.072;$$

$$\frac{d}{db_c} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 0.002;$$

$$\frac{d}{dE_c} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = -3.215 \cdot 10^{-11};$$

$$\frac{d}{dE_s} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 3.991 \cdot 10^{-12};$$

$$\frac{d}{dA_p} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 0.229;$$

$$\frac{d}{dh_p} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 0.01;$$

$$\frac{d}{dI_p} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 47.842;$$

$$\frac{d}{dE_p} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 5.305 \cdot 10^{-11};$$

$$\frac{d}{dL} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 0.003;$$

$$\frac{d}{dg_d} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = -6.685 \cdot 10^{-4};$$

$$\frac{d}{dq_d} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = -6.685 \cdot 10^{-4};$$

$$\frac{d}{d\Delta R} Z(g_d, q_d, L, E_p, E_c, E_s, b_c, h_c, A_p, h_p, I_p, \Delta R) = 1.$$

Išvestinių reikšmės pateikiamos kartu su pradiniais duomenimis ir kitais patikimumo skaičiavimo rezultatais 2.1 lentelėje. Variacijos ir standartinės nuokrypos reikšmės iš STR 2.05.03:2003, 2 priedo.

2.1 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai

Dydis	[]	Reikšmė	γ	Vid. reikšmė	σ	d/dx	$((d/dx) \sigma)^2$	%
hc	m	0.04		0.04	0.005	0.072	1.296E-07	43.2
bc	m	0.4		0.4	0	0.002	0	0.0
Ec	kPa	26070000	0,2	26070000	5214000	-3.215E-11	2.80999E-08	9.4
Es	kPa	210000000	0,11	210000000	23100000	3.991E-12	8.49938E-09	2.8
Ap	m ²	0.003	0,05	0.003	0.00015	0.229	1.17992E-09	0.4
hp	m	0.1016		0.1016	0.002	0.01	4E-10	0.1
Ip	m ⁴	0.000004554	0,05	0.000004554	0.0000002277	47.842	1.18671E-10	0.0
Ep	kPa	32860000	0,05	32860000	1643000	5.305E-11	7.59707E-09	2.5
L	m	2.8		2.8	0.02	0.003	3.6E-09	1.2
G	kN/m	0.608	0,1	0.608	0.0608	0.0006685	1.652E-09	0.6
Q	kN/m	2	0,25	2	0.5	0.0006685	1.11723E-07	37.2
ΔR	m	0.00061	0,05	0.00061	0.0001	1	7.59871E-09	2.5
Σ							3.00069E-07	100.0

čia: γ – variacijos koeficientas; σ – standartinė nuokrypa; d/dx – dalinė išvestinė.

Iš skaičiavimų gaunama Z funkcijos reikšmė:

$$Z = w_{lim} - w + \Delta R = 0.013m.$$

Gavus išvestinių reikšmes ir įvertinus visas nuokrypas apskaičiuojamas patikimumo koeficientas β .

$$\beta = \frac{Z}{\sqrt{\sum_1^n (i_n * \sigma_n)^2}} = 23.49 > \beta_{lim} = 1,5.$$

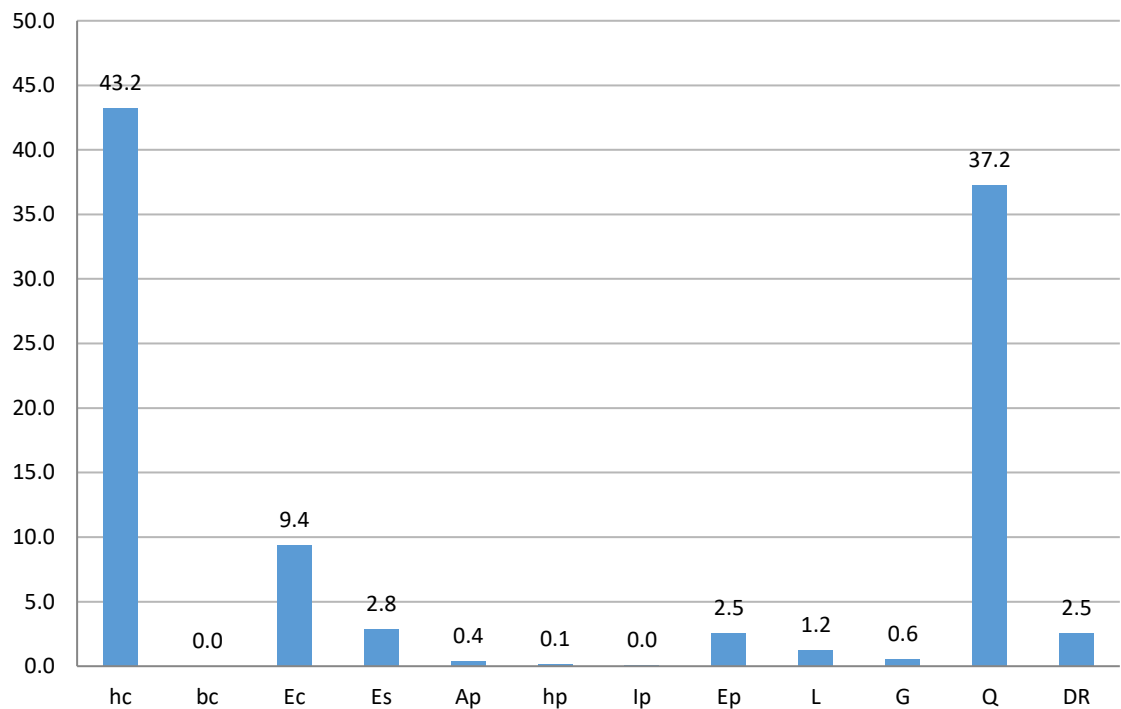
Gautas patikimumo koeficientas viršija ribinį apie 16 kartų. Galima teigti, kad patikimumas tinkamumo ribiniui būvui pagal RC2 patikimumo klasę yra tenkinamas (pagal STR 2.05.03:2003, 3 priedo, 2 lentelę).

Naudojantis *Microsoft Excel* programos funkcija NORM.S.DIST nustatomas patikimumas P ir įlinkio susidarymo tikimybė α .

$$P = 1;$$

$$\alpha = 5,5873 \cdot 10^{-121}.$$

Pagal 2.1 lentelėje pateiktus duomenis, sudaryta parametrų įtakos įlinkiui diagrama.



2.2 pav. Parametrų įtaka įlinkiui (%)

Ši diagrama parodo, kad didžiausią įtaką patikimumo koeficientui daro ir betoninio denginio aukštis h_c ir kintamoji apkrova Q .

2.4 Papildomų faktorių įtakos patikimumo koeficientui ir atsargai vertinimas

Ankstesniame skyriuje išsiaiškinome, kad vienas iš labiausiai patikimumo koeficientą lemiančių veiksnių yra betoninio denginio aukštis h_c . Šį dydį sumažinsime ir padidinsime 2 kartus.

2.2 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai sumažinus h_c 2 kartus.

Dydis	[]	Reikšmė	γ	Vid. reikšmė	σ	d/dx	$((d/dx) \sigma)^2$	%
hc	m	0.02		0.02	0.005	0.099	2.45025E-07	41.7
bc	m	0.4		0.4	0	0.001	0	0.0
Ec	kPa	26070000	0,2	26070000	5214000	-1.912E-11	9.93843E-09	1.7
Es	kPa	210000000	0,11	210000000	23100000	2.373E-12	3.00483E-09	0.5
Ap	m ²	0.003	0,05	0.003	0.00015	0.642	9.27369E-09	1.6
hp	m	0.1016		0.1016	0.002	0.033	4.356E-09	0.7
Ip	m ⁴	0.000004554	0,05	0.000004554	0.0000002277	190.254	1.87669E-09	0.3
Ep	kPa	32860000	0,05	32860000	1643000	1.002E-10	2.71026E-08	4.6
L	m	2.8		2.8	0.02	0.0002984	3.5617E-11	0.0
G	kN/m	0.608	0,1	0.608	0.0608	-0.001	3.69664E-09	0.6
Q	kN/m	2	0,25	2	0.5	-0.001	0.00000025	42.5
ΔR	m	0.00052	0,05	0.00052	0.0002	1	3.37083E-08	5.7
Σ							2,31716E-05	100,0

Čia: γ – variacijos koeficientas; σ – standartinė nuokrypa; d/dx – dalinė išvestinė.

Iš skaičiavimų gaunama Z funkcijos reikšmė sumažinus h_c 2 kartus:

$$Z = w_{lim} - w + \Delta R = 0.011m.$$

Gavus išvestinių reikšmes ir įvertinus visas nuokrypas apskaičiuojamas patikimumo koeficientas β .

$$\beta = \frac{Z}{\sqrt{\sum_1^n (i_n * \sigma_n)^2}} = 14.14 > \beta_{lim} = 1.5.$$

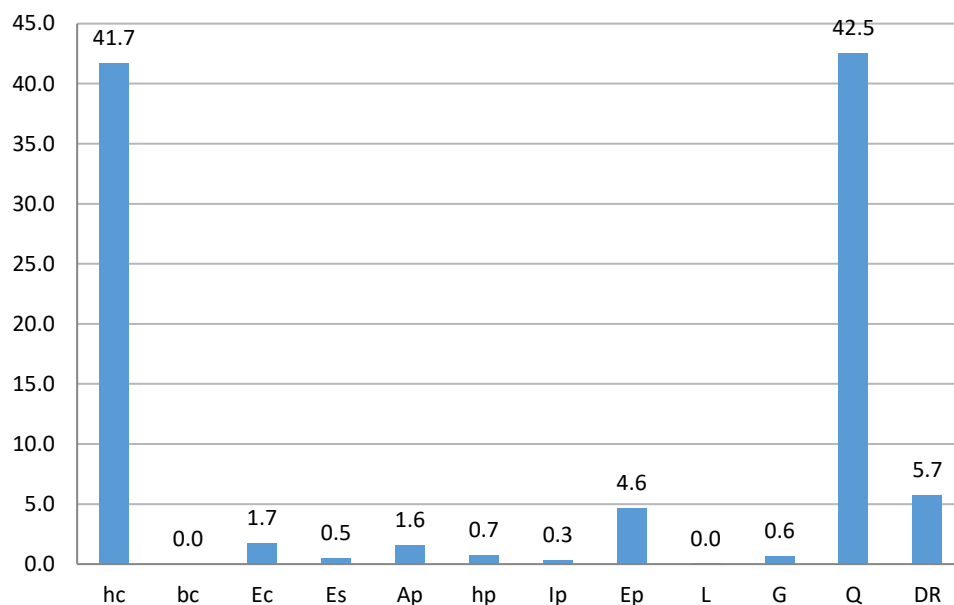
Gautas patikimumo koeficientas viršija ribinį beveik 9,5 karto. Galima teigti, kad patikimumas tinkamumo ribiniui būvui pagal RC2 patikimumo klasę yra vis dar tenkinamas sumažinus h_c 2 kartus.

Naudojantis *Microsoft Excel* programos funkcija NORM.S.DIST nustatomas patikimumas P ir įlinkio susidarymo tikimybė α .

$$P = 1;$$

$$\alpha = 1,4862 \cdot 10^{-44}.$$

Pagal 2.2 lentelėje pateiktus duomenis, sudaryta parametrų įtakos įlinkiui diagrama.



2.3 pav. Parametrų įtaka įlinkiui (%) sumažinus h_c 2 kartus

Ši diagrama parodo, kad didžiausią įtaką patikimumo koeficientui daro kintamoji apkrova Q ir betoninio denginio aukštis h_c . Lyginant su pradiniais skaičiavimais, kai h_c nebuvo sumažintas, h_c įtaka įlinkiui nežymiai sumažėjo, tačiau Q padidėjo.

Iš skaičiavimų gaunama Z funkcijos reikšmė padidinus h_c 2 kartus:

$$Z = w_{lim} - w + \Delta R = 0.014m.$$

Gavus išvestinių reikšmes ir įvertinus visas nuokrypas apskaičiuojamas patikimumo koeficientas β .

$$\beta = \frac{Z}{\sqrt{\sum_1^n (i_n * \sigma_n)^2}} = 88,8 > \beta_{lim} = 1,5.$$

Gautas patikimumo koeficientas viršija ribinį apie 59 kartus. Galima teigti, kad patikimumas tinkamumo ribiniui būvui pagal RC2 patikimumo klasę yra vis dar tenkinamas padidinus h_c 2 kartus.

2.3 lentelė. Patikimumo skaičiavimo duomenys ir rezultatai padidinus h_c 2 kartus.

Dydis	[]	Reikšmė	γ	Vid. reikšmė	σ	d/dx	$((d/dx) \sigma)^2$	%
hc	m	0.08		0.08	0.005	0.015	5.625E-09	21.7
bc	m	0.4		0.4	0	0.0009526	0	0.0
Ec	kPa	26070000	0,2	26070000	5214000	-1.462E-11	5.81081E-09	22.4
Es	kPa	210000000	0,11	210000000	23100000	1.814E-12	1.75589E-09	6.8
Ap	m ²	0.003	0,05	0.003	0.00015	0.022	1.089E-11	0.0
hp	m	0.1016		0.1016	0.002	0.0007448	2.21891E-12	0.0
Ip	m ⁴	0.000004554	0,05	0.000004554	0.0000002277	2.766	3.96671E-13	0.0
Ep	kPa	32860000	0,05	32860000	1643000	1.401E-11	5.29848E-10	2.0
L	m	2.8		2.8	0.02	0.004	6.4E-09	24.7
G	kN/m	0.608	0,1	0.608	0.0608	-0.0001463	7.91217E-11	0.3
Q	kN/m	2	0,25	2	0.5	-0.0001463	5.35092E-09	20.6
ΔR	m	0.00052	0,05	0.00052	0.0002	1	3.63949E-10	1.4
Σ							3,65484E-06	100,0

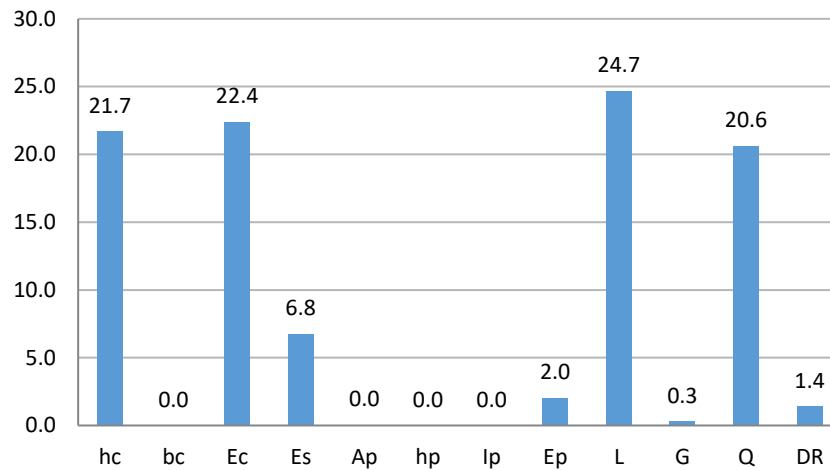
čia: γ – variacijos koeficientas; σ – standartinė nuokrypa; d/dx – dalinė išvestinė.

Naudojantis *Microsoft Excel* programos funkcija NORM.S.DIST nustatomas patikimumas P ir įlinkio susidarymo tikimybė α .

$$P = 1;$$

$$\alpha = 0.$$

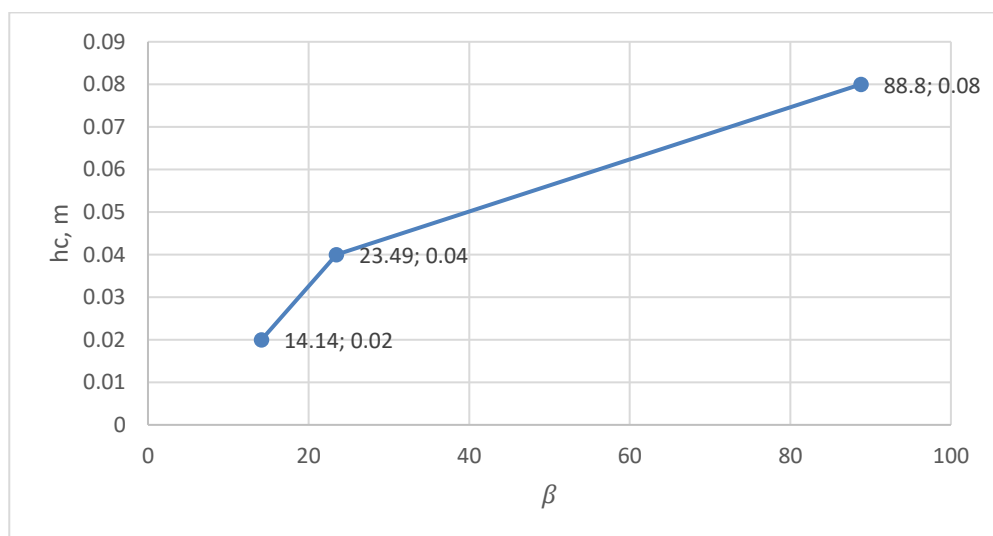
Pagal 2.3 lentelėje pateiktus duomenis, sudaryta parametų įtakos įlinkiui diagrama.



2.4 pav. Parametų įtaka įlinkiui (%) padidinus h_c 2 kartus

Ši diagrama parodo, kad didžiausią įtaką patikimumo koeficientui daro kintamoji apkrova Q , betoninio denginio aukštis h_c ir betono tamprumo modulis E_c bei elemento ilgis L . Padidinus plokštės aukštį 2 kartus, matomas akivaizdus tamprumo modulio E_c bei elemento ilgio L įtakos įlinkiui padidėjimas. Kintamosios apkrovos Q , kaip ir betoninio denginio aukščio h_c , procentas sumažėjo daugiau nei per pusę, lyginant su pradiniais skaičiavimais.

Palyginimui nubraižomas grafikas 2.5 pav., parodantis patikimumo koeficiento kitimą padidinus ir sumažinus plokštės aukštį h_c . Didinant skerspjūvio aukštį, didėja patikimumo rodiklis, nors įlinkis taip pat didėja. Tokiu atveju įtaką gali daryti redukuotasis inercijos momentas. Jis buvo redukuotas neįvertinus jungties tarp GFRP profiluoto ir betoninės plokštės.



2.5 pav. Patikimumo koeficiento β kitimas didinant h_c

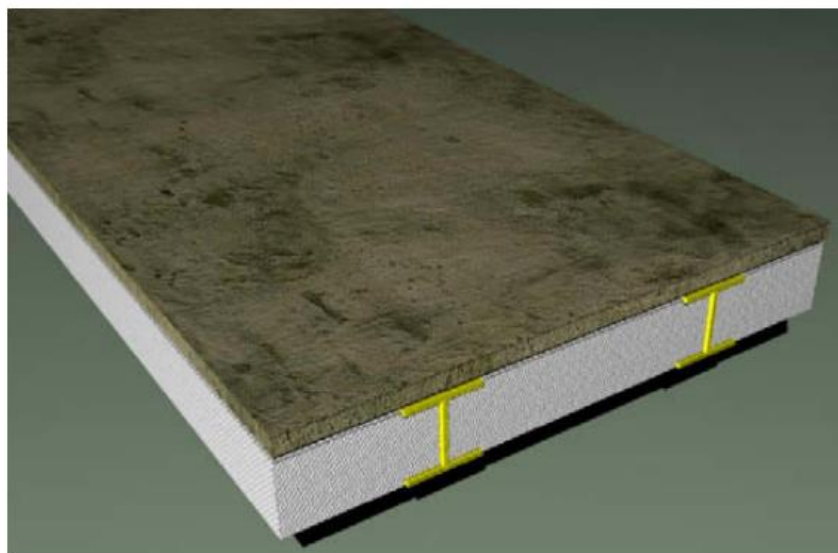
Skyriaus išvados

Atlikus konstrukcijos patikimumo skaičiavimą, nustatyta, kad didžiausią įtaką patikimumo koeficientui turėjo kintamoji apkrova Q ir betoninio denginio aukštis h_c . Padidinus denginio aukštį 2 kartus buvo pastebėtas akivaizdus tamprumo modulio E_c ir elemento ilgio L įtakos įlinkiui padidėjimas. Kintamosios apkrovos Q , kaip ir plokštės skerspjūvio aukščio h_c , procentas sumažėjo daugiau nei per pusę, lyginant su pradiniais skaičiavimais.

Didinant skerspjūvio aukštį, didėja patikimumo rodiklis. Tokiu atveju įtaką gali daryti redukuotasis inercijos momentas. Dėl skaičiavimo supaprastinimo jis buvo redukuotas neįvertinus jungties tarp GFRP profiliuoto ir betoninės plokštės. Tikslesnis patikimumo skaičiavimas galėtų būti įvertinus jungtį tarp betoninės plokštės ir profiliuoto.

3 Eksperimentinis tyrimas

Šiame skyriuje pristatomi preliminarūs kompozitinės perdangos tyrimai. Perdanga sudaryta iš pultruzijos būdu stiklo pluoštu armuoto polimerinio (*angl.* glass fiber reinforced polymer, toliau – GFRP) plačiajuosčio (*angl.* wide-flange, toliau – WF) profiliuoto, užpildyto putų polistirolu blokais (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Kompozitinė betono ir GFRP profiliuoto perdanga (Santos Neto & La Rovere 2010: 2555)

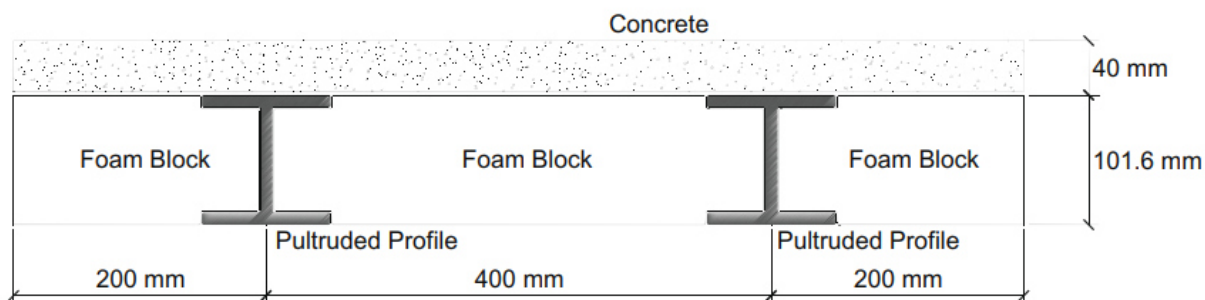
Pagrindinis tokios perdangos privalumas yra toks, kad ji neturi jokių jungčių, betoninis viršus yra tiesiog priklijuotas derva prie GFRP profiliuoto. Perdanga yra suprojektuota pėsčiųjų tiltams, bet gali būti pritaikoma ir industriniuose pastatuose bei jūrinėse konstrukcijose. Iš pradžių aprašomi plokštės komponentai ir geometrija. GFRP profiliuoto savybės pradžioje yra įvertinamos naudojant klasikinę laminavimo teoriją (*angl.* the Classical Laminate Theory) bei mišinių taisyklę (*angl.* Rule of Mixtures). Toliau iš eksperimentinio bandymo gauti profiliuoto tamprumo ir šlyties moduliai. Trumpai aprašyti eksperimentiniai bandymai, kurių metu buvo pasirinkta derva jungčiai tarp betono ir GFRP profiliuoto ir pasirinkti tinkami trumpi pluoštai, kurie pridėti perdangos betono viršuje, ir jų tūrio dalis. Plokštė suprojektuota atlaikyti nuolatinės (savasis svoris ir denginio dangos) bei pėsčiųjų naudojimo apkrovas. Perdangos lenkimo viena kryptimi projektavimui naudojama Timošenko sijos teorija (*angl.* Timoshenko beam Theory, toliau – TBT) , sukombinuota su transformuoto ploto metodu (*angl.* Transformed Area Approach). Taip pat buvo atlikta perdangos baigtinių elementų (toliau – BE) analizė. Norint ištirti plokštės elgseną lenkimo metu, buvo išbandyti 3 bandiniai pagal 4 taškų lenkimą. Eksperimento metu gauti rezultatai palyginti su teoriniais rezultatais, gautais naudojant Timošenko sijos teoriją (TBT), ir rezultatais, gautais naudojant baigtinių elementų metodą.

3.1 Kompozitinė betono ir GFRP profiliuoties perdanga

Konstrukcinė sistema, siūloma pėsčiųjų tiltui, sudaryta iš WF skerspjūvio stiklo pluoštu armuoto polimerinio (*angl.* glass fiber reinforced polymeric, toliau – GFRP) profiliuoties, tarpuose užpildyto putų polistirenu (*angl.* expanded polystyrene, toliau – EPS) kaip parodyta 3.2 pav.

Ant betono viršaus pridėti trumpi propileno pluoštai siekiant apriboti plyšių atsiradimą dėl plastinio betono susitraukimo. Perdangai pasirinkti Brazilijoje pagaminti GFRP WF skerspjūvio profiliuoties, kurių matmenys 101,1 x 101,6 x 9,5mm. Putų blokai naudojami kaip nelaikanti konstrukcija. Jų matmenys yra įprasti surenkamoms plokštėms ir yra supjaustomi, kad tilptų tarp sijų. Profiliuoties ir putų blokai atlieka klojinio funkciją šlapiam betonui ir yra suprojektuoti, kad atlaikytų apkrovas taip išvengiant ryšių panaudojimo. Sąryšiui tarp betono ir GFRP profiliuoties naudojama derva. Taip pat ji saugo nuo vandens prasiskverbimo taip užkertant kelią neigiamam šarmų poveikiui stiklo pluoštams, esantiems profiliuotyje.

Sukietėjus betonui, du komponentai, betonas ir GFRP profiliuoties, yra sujungiami tarpusavyje ir veikia kaip surenkama kompozitinė perdanga. Projektuojamas vienos krypties plokštės lenkimas. Analizuojamos kompozitinės plokštės skerspjūvis yra 0,8 m pločio ir 0,14m aukščio, kaip pateikta 3.2 pav. Betono sluoksnio storis 40mm buvo pasirengtas remianti rekomendacijomis surenkamoms plokštėms, pateiktomis NBR 14859-1 (NBR 14859-1 2002) standarte bei norint išvengti klupumo profiliuoties sienelėje ir šlyjamosios irties betone (Deskovic et al. 1995).



3.2 pav. Parodomasis kompozitinės perdangos skerspjūvis (Santos Neto & La Rovere 2010: 2556)

Verta paminėti, kad ši kompozitinė perdanga yra kuriama parodyti turimų Brazilijoje FRP medžiagų potencialą, kur pultruzijos būdu pagamintų profiliuoties (U, I arba WF) naudojant vienkryptę pluoštų technologiją, kurią naudoja nedaugelis vietinių gamintojų, įvairovė yra limituota. FRP medžiagos Brazilijos statyboje pradėtos naudoti tik labai neseniai tokiose konstrukcijose kaip stogai „off-shore“ plūduriuojančiose platformose ir laivybos signaliniams bokštams, bet dar nebuvo naudojamos didesnėse arba kompozitinėse konstrukcijose. Tikimasi, kad didėjant jų pritaikymui, profiliuoties skerspjūviai ir išdėstymas gali būti patobulinti artimiausioje ateityje.

3.2 Medžiagų savybės

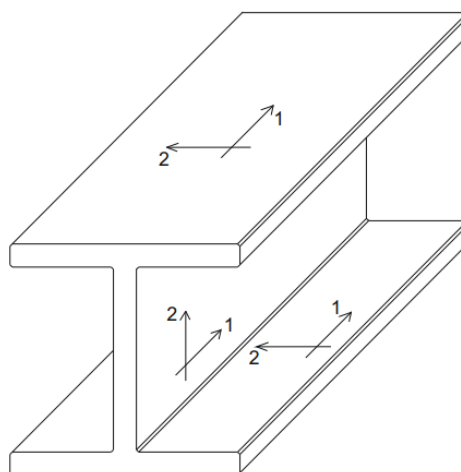
3.2.1 GFRP profiliuoties savybės

Pultruzijos būdu pagaminti profiliuoties tiesiogine prasme nėra laminuotos konstrukcijos. Tačiau profiliuoties juostos ir sienelės kontūras dažnai nusako medžiagos architektūrą, kuri gali imituoti laminavimo konfigūracijas. Pasirinktas WF skerspjūvio profiliuoties sudarytas iš stiklo pluošto gijų (išdėstytų lygiagrečiai profiliuoties išilginei ašiai), kurių pluošto tūrio dalis yra 60 %, įterptų į poliesterio matricą, ir iš nepertraukiamo pluošto kilimėlių (*CMS – continuous strand mats*), susidedančių iš atskirai orientuotų pluoštų. Kiekvienos atskiros laminatės mechaninės savybės gali būti apytiksliai apskaičiuotos pagal mikromechanikos formules. Pasirenkant formulę dar žinomą kaip mišinių taisyklė (Kaw 1997), ir naudojant pluoštų, dervos ir CMS gamintojo pateiktas elastines savybes, gaunamos kiekvienos atskiros laminatės savybės, kurios pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Profiliuoties sienelės ir juostos bei individualių komponentų elastinės savybės (pagal Santos Neto & La Rovere, 2010)

Medžiaga ^a	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
Nepertraukiamų gijų/dervos kilimėlis	7,00	7,00	2,50	0,401
Stiklo pluoštai/poliesterio derva	48,68	6,56	2,93	0,272
Profiliuoties sienelė ir juosta (CLT)	35,55	7,02	2,43	0,319

^a 1 – išilginė profiliuoties kryptis, kuri sutampa su pluoštų kryptimi) ir 2 – skersinė profiliuoties sienelės ir juostos kryptis (žr. 3.3 pav.)



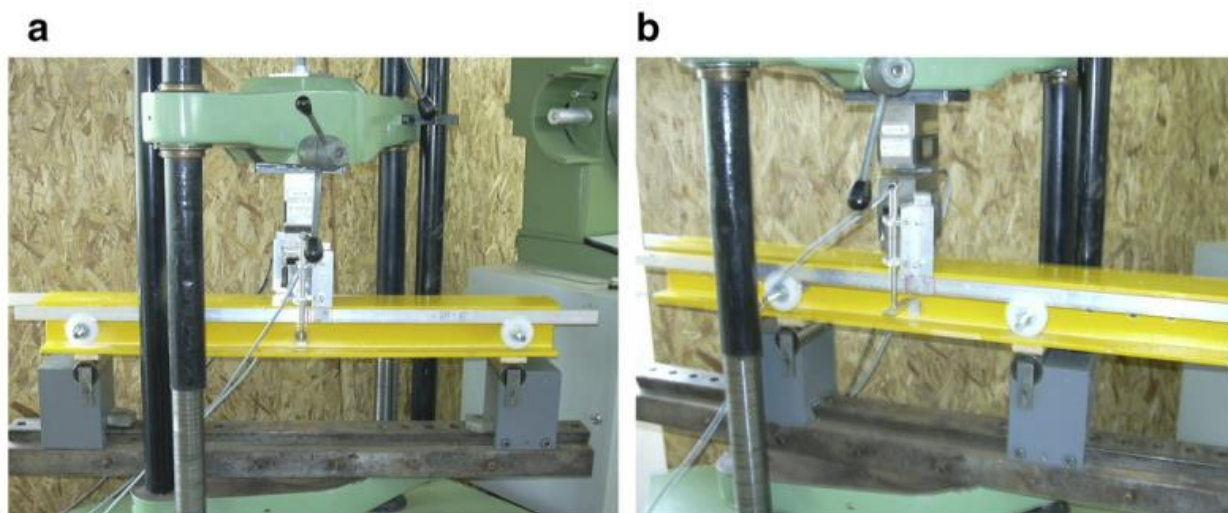
3.3 pav. Išilginė ir skersinė GFRP profiliuoties sienelės ir juostos kryptys (Santos Neto & La Rovere 2010: 2556).

Daroma prielaida, kad profiliuoties sienelė ir juostos yra laminuoti kompozitai su tuo pačiu išdėstymu ir lygiavertėmis ortotropinėmis mechaninėmis savybėmis (E_1 , E_2 , G_{12} ir ν_{12}) jų

išilgine (1) ir skersine (2) kryptimis, kur 1, 2 yra lokalios ašys plokštumoje, kaip parodyta 3.3 pav. Naudojant klasikinę laminavimo teoriją (*the Classical Lamination Theory – CLT*), šias lygiavertes savybes galima rasti iš atskirų laminačių savybių bei pluoštų krypties, kaip parodyta 3.1 lentelėje, ir pritaikyti kompozitinės perdangos baigtinių elementų analizei.

3.2.2 GFRP profiliuočio savybės, nustatytos eksperimento metu

Norint patikrinti gautas teoriškai gautas vertes, kai kurios medžiagos savybės taip pat buvo gautos eksperimentinių bandymų metu. Iš pradžių A. B. S. Santos'o Neto ir H. L. La Rovere'ės atlikto (Santos Neto & La Rovere 2007) tiesioginio tempimo bandymo metu buvo gautas tamprumo modulis išilgine kryptimi (E_I). Tempimo bandymo metu iš WF profiliuočio buvo išpjautos juostos pagal procedūras, nurodytas amerikietiška standarte ASTM D 3039 (ASTM D 3039 1995). Išbandytos penkios stačiakampio skerspjūvio 9x15x250mm juostos. Vidutinė tamprumo modulio išilgine kryptimi reikšmė $E_I=35,56$ GPa, kuri iš esmės sutampa su teorine verte, gauta naudojant CLT (žr. 3.1 lentelę). Kadangi sunku nustatyti šlyties modulį G_{I2} iš kvadratinių juostelių, Bank'o pasiūlyta procedūra, kuri tuo pačiu metu suteikia lygiavertį išilginį tamprumo ir šlyties modulius (E , G), yra kompozitinio profiliuočio kaip dviatramės sijos lenkimo bandymas, kuris pavaizduotas 3.4 pav.



3.4 pav. GFRP profiliuočio 3 taškų lenkimo bandymas: (a) tarpatramis 82cm; (b) tarpatramis 41cm (Santos Neto & La Rovere 2007: 277)

Du sijų bandiniai, pagaminti iš GFRP WF skerspjūvio, buvo išbandyti pagal trijų taškų lenkimą, keičiant sijos tarpatramį. Detalesnį bandymo aprašymą galima rasti A. B. S. Santos'o Neto ir H. L. La Rovere'ės straipsnyje (Santos Neto & La Rovere 2007). Ekvivalentiškos tamprumo E ir šlyties G modulių vertės, gautos pagal išmatuotų sijų tarpatramio vidurio įlinkius, apibendrintos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. GFRP profiliuoto tamprumo ir Šlyties modulių reikšmės, gautos iš 3 taškų lenkimo bandymo (pagal Santos Neto & La Rovere 2007)

Eksperimentas	E (GPa)	G (GPa)
GFRP profiliuoto bandinys Nr.1	30,92	2,64
GFRP profiliuoto bandinys Nr.2	34,80	2,69
Vidurkis	32,86	2,67

Šios reikšmės šiek tiek skiriasi nuo gautų naudojant CLT (žiūrėti 3.1 lentelę), dėl skirtumų izotropinių arba ortotropinių medžiagų elgsenos prielaidos. Tačiau supaprastintiems analitiniams metodams, kur taikoma šijos teorija ir daroma prielaida, kad medžiagos elgsena yra izotropinė, 2 lentelėje pavaizduotos reikšmės yra labiau tinkamos ir paprastai pritaikomos projektavimui. Profiliuoto šlyjamasis stipris buvo įvertintas naudojant mišinių taisyklę ir gamintojo pateiktą šlyjamojo stiprio matricą (34 MPa), gaunant reikšmę $\tau_{us}=20,01$ MPa. Iš stiklo pluošto tempiamojo stiprio ir tamprumo modulio, pateiktų gamintojo, buvo gautos didžiausios santykinės deformacijos $\varepsilon'_{FRP_u}=0,032$. Šios savybės bus naudojamos projektuojant kompozitinę perdangą 3.3.2 poskyryje.

3.2.3 Betonai

Betonas buvo suprojektuotas tam tikram gniuždomajam stipriui 30 MPa, kuris pasiektas 28 kietėjimo dieną. Betono mišiniui buvo naudojamas portlandcementis CP-II-Z-32 (NBR 11578 2001). Betono tamprumo modulis $E_c=26.07$ GPa buvo gautas iš lygties, pateiktos brazilishkame standarte (NBR 6118 2003), kuris taip pat yra rekomenduojamas ACI 318 (ACI 318 2005). Puasono koeficientui taikoma įprasta vertė 0,2, todėl betono šlyties modulis gaunamas $G_c=10.86$ GPa. Tempiamasis betono stipris 3,04 MPa gaunamas iš lygties, pateiktos ACI 318 (ACI 318 2005).

Įtrūkia dėl betono susitraukimo gali atsirasti net tada, kai imtasi standartinių atsargumo priemonių, o tai gali pakenkti betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui ir tinkamumui. Vienas iš būdų išvengti tokių įtrūkių yra į betono mišinį pridėti trumpus pluoštus. Polipropileno pluoštų pridėjimo į betono mišinį įtaka plyšiams, atsiradusiems betono susitraukimo metu, plonose betoninėse plokštėse nagrinėjama A.B.S. Santos'o Neto ir kt. (Santos Neto et al. 2005) eksperimentiniuose bandymuose, paremtuose ankstesniais tyrimais, kuriuos atliko P.P. Kraai'as (Kraai 1985) ir P. Balaguru'as (Balaguru 1994).

Iš viso eksperimentui buvo išlieta 12 plokščių, kurių matmenys 910x610 mm. Siekiant užtikrinti geometrinį paviršiaus ploto ir tūrio santykį, tipinį betono plokštėms, bandiniams buvo

pasirinktas 20mm storis. Kad būtų išvengta galimo cemento pastos suvaržymo dėl stambių užpildų panaudojimo tokiose plonose plokštėse, bandiniai buvo išlieti vietoje betono naudojant skiedinį.

Siekiant pagreitinti plokščių džiūvimo procesą ir atkurti prasčiausias plokščių liejimo vietoje sąlygas dėl plyšių atsiradimo susitraukimo metu, buvo pasitekti du 580mm diametro ventiliatoriai, kurie vidutiniškai sukelia 15,5 km/h vėjo greitį. Tam, kad vėjo srautas tolygiai paskirstytų visą plokštę, buvo sumontuotas tunelis, kuris pagamintas iš medinių plokštelių, su U formos skerspjūviu, kurio matmenys 650 x 650 x 650 mm ir 800 mm ilgio. Jis buvo pastatytas virš ventiliatoriaus ir bandinio. Tai buvo papildoma modifikacija P. P. Kraai'o (Kraai 1985) bandymui.

Eksperimentas parodė, kad papildomai pridėti į betono mišinį trumpi polipropileno pluoštai gali gerokai suvaržyti plyšių susidarymą dėl susitraukimo. Šie pluoštai buvo pasirinkti siūlomoje plokštėje su pluošto tūrio dalimi (V_f) 0,10 %. Detalesnį eksperimento aprašymą galima rasti A.B.S. Santos'o Neto ir kt. straipsnyje (Santos Neto et al. 2005).

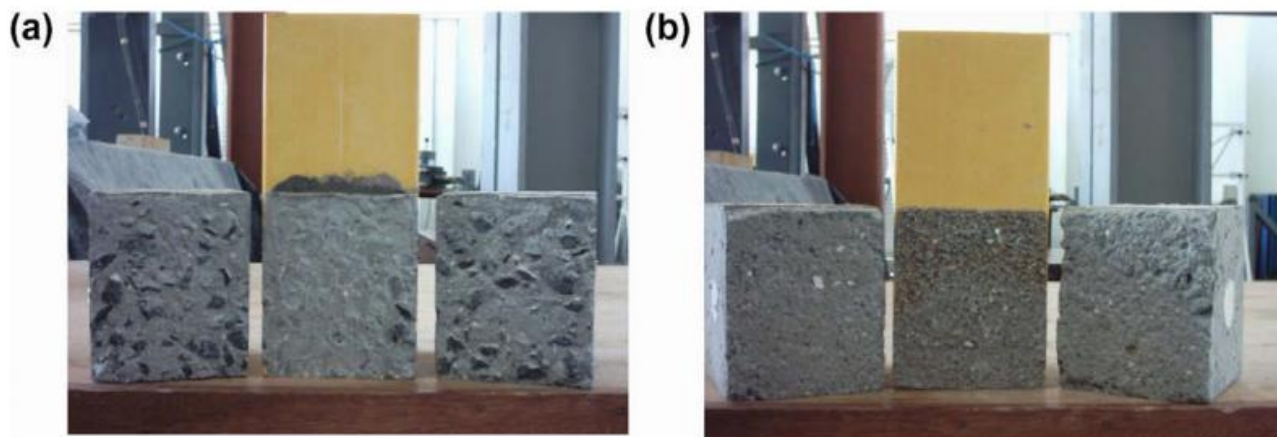
3.2.4 Jungties tarp GFRP profiliuoties ir betono stiprumas.

Sąryšio tarp GFRP ir betono stiprumas buvo gautas atlikus dvigubą šlyties bandymą, kur mažas profiliuoties bandinys buvo įterptas tarp dviejų betono blokų kaip pavaizduota 3.5 pav. GFRP ir betono paviršių sąlyčio vietoje buvo naudotos dvi dervos, *Sikadur 31* ir *Sikadur 32 Gel*, pastaroji buvo sukombinuota su smėliu. Nurodytas betono stipris buvo $f'_c=30$ MPa, betono mišinyje naudotas portlandcementis CP-II-Z-32 (NBR 11578 2001). Pagaminti trys bandiniai, kurie visi buvo bandomi po 28 dienų.



3.5 pav. Jungties tarp betono ir GFRP profiliuoties bandymas(Santos Neto & La Rovere 2010: 2557)

3.6 pav. parodo bandinių suirimo atvejus skirtingose paviršių sąlyčio vietose: a) paviršių sąlytis su derva *Sikadur 31* ir b) paviršių sąlytis su derva *Sikadur 32 Gel* sukombinuota su smėliu.



3.6 pav. Bandinių suirimo atvejai: a) jungtis su derva *Sikadur 31* ir b) jungtis su derva *Sikadur 32 Gel*, sukombinuota su smėliu (Santos Neto & La Rovere 2010: 2558)

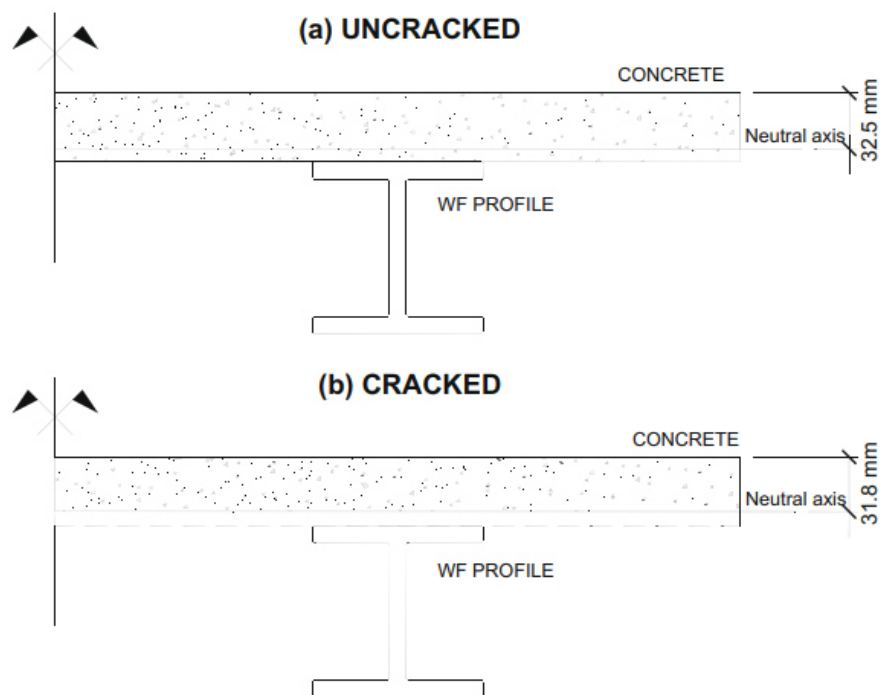
Eksperimento statistinė analizė parodė reikšmingą panaudotos dervos įtaką jungties stiprumui. *Sikadur 31* derva parodė geresnius rezultatus, vidutinis jungties stipris $\tau_{ub}=2,53$ MPa, todėl buvo pasirinkta kompozitinės perdangos GFRP profiliuoties ir betono paviršių sąlyčiui.

3.3 Projektavimo pritaikymas pėsčiųjų tiltams

Pėsčiųjų tilto perdangos projektavime, buvo priimta, kad plokštė lenkiama viena kryptimi, kuri sutampa su išilgine profiliuoties kryptimi. Priimta reprezentacinė plokštė parodyta 3.2 pav.

3.3.1 Projektavimas pagal tinkamumo ribinį būvį

Bendras nuolatinė apkrova (D) susideda iš nuosavo svorio ir papildomos $1,5 \text{ kN/m}^2$ dėl paviršiaus dangos ir turėklų, naudojimo apkrova (L) priimta 5 kN/m^2 (pagal NBR 7188 1982), veikianti per visą paprastai atremtą perdangos plokštę. Perdangos įlinkis yra apskaičiuotas naudojant Timošenko sijos teoriją (*angl.* the Timoshenko Beam Theory, toliau – TBT) sukombinuotą su transformuoto ploto metodu (*angl.* the Transformed Area Approach). 3.2 pav. pavaizduotas perdangos skerspjūvis pakeistas į ekvivalentinį GFRP skerspjūvį, kuris parodytas 3.7 pav., darant prielaidą, kad betono ir GFRP medžiagos yra tobulai surištos ir jų elgsena yra teisiškai elastinė. Svarstomos dvi skirtingos prielaidos: (a) betonas nesupleišėja, pasiekęs tinkamumo ribinį būvį ir (b) betonas supleišėja ir jo atsparumas tempimui ir šlyčiai yra nepaisomas.



3.7 pav. Perdangos skerspjūvio transformavimas į ekvivalentišką GFRP medžiagą (Santos Neto & La Rovere 2010:2558)

GFRP profiliuociui naudojami ekvivalentiški izotropiniai tamprumo E ir šlyties G moduliai, parodyti 3.2 lentelėje, o betonui – tamprumo E_c ir šlyties G_c moduliai nurodyti 3.2.3 poskyryje. 3.3 lentelė galima matyti gautos transformuoto skerspjūvio savybės abiem prielaidoms.

3.3 lentelė. Ekvivalentiško GFRP transformuoto skerspjūvio savybės ($E = 32,86$ GPa, $G = 2.67$ GPa, $E_c = 26.07$ GPa, $n = E_c/E = 0.793$) (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).

Skerspjūvis	Skerspjūvio savybės		
	x (mm)	EI (kN m ²)	$G\bar{A}$ (kN)
Nesupleišęs skerspjūvis	32,5	$1,211 \cdot 10^3$	$8,220 \cdot 10^3$
Supleišęs skerspjūvis	31,8	$1,208 \cdot 10^3$	$5,168 \cdot 10^3$

Iš 3.7 pav. ir 3.3 lentelės galima pastebėti, kad neutrali ašis yra beveik ties betono ir GFRP profiliuotio jungtimi. Tai rodo, kad skerspjūvis yra gerai suprojektuotas, profiliuotis dirba tempimui, o beveik visas betonas – gniuždymui.

Pagal TBT galutinis maksimalus įlinkis tarpatramio viduryje gaunamas kaip suma įlinkio dėl lenkimo ir įlinkio dėl šlyties:

$$\delta_{max} = \delta_{bending} + \delta_{shear}; \quad (10)$$

kurie ,dėl tolygiai paskirstytos apkrovos (q), yra tokie:

$$\delta_{bending} = \frac{5qL^4}{384EI}; \delta_{shear} = \frac{qL^2}{8G\bar{A}}; \quad (11)$$

čia L – perdangos tarpatramis; EI – skerspjūvio lenkiamasis standumas; $G\bar{A}$ – skerspjūvio šlyjamasis standumas; $\bar{A} = A/f_s$, kur A – skerspjūvio plotas ir f_s – skerspjūvio formos faktorius, kuris gaunamas iš (3) formulės:

$$f_s = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q^2}{b^2} dA; \quad (12)$$

čia b – sijos plotis; Q pirmasis srities momentas.

Toliau, pagal Brazilijos standarto (NBR 6118 2003) rekomendacijas, nustatyto didžiausio perdangos įlinkio, atsirandančio esant dalinai nuolatinės apkrovos deriniui ($q=D+0.4L$), palyginimas su leistinu ribiniu įlinkiu $L/250$ suteikia didžiausią leistiną tarpatramį 4,65m prielaidai (a) ir 4,5m prielaidai (b). Pagal La Rovere'ės ir Santos'o Neto, didesnės maksimalaus tarpatramio reikšmės perdangai yra prie konstruktyvių apkrovų. (Santos Neto & La Rovere 2007) Reikėtų pabrėžti, kad nebuvo pridėtas joks koeficientas, įvertinantis valkšnumą. Kaip A.B.S. Santos'as Neto savo disertacijoje minėjo, kad po 4 mėnesio laikotarpio ilgalaikė perdangos elgsena neparodė jokio reikšmingo įlinkio padidėjimo(Santos Neto 2006).

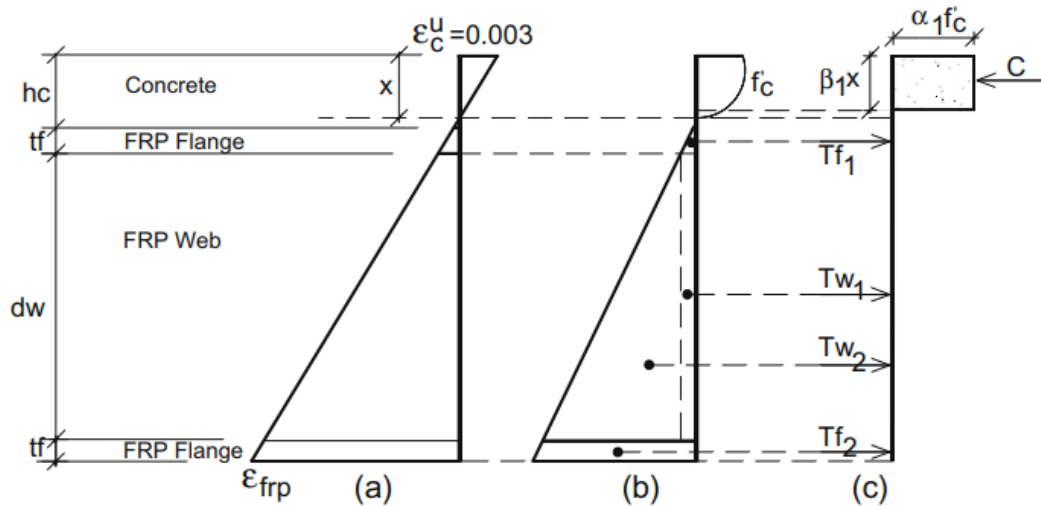
3.3.2 Projektavimas pagal saugos ribinį būvį

Remiantis C. E. Bakis'o ir kt. tyrimais, kompozitinėse sistemose pagamintose iš betono ir FRP elementų pastebėta keletas suirimo atvejų (Bakis et al. 2002). Perdangos betoninis viršus buvo projektuojamas pakankamai storas, norint išvengti klupumo profiliuoties sienelėje ir betono irties dėl šlyties, tad, numatomi trys galimi suirimo atvejai: 1) irtis dėl lenkimo, atsiradusios dėl pluošto betono viršuje sutrupinimo, esant ypatingam gniuždymui; 2) irtis dėl šlyties GFRP profiliuoties viršutinėje juostoje ir sienelės jungtyje; 3) jungties tarp GFRP profiliuoties ir betono suirimas.

Irties dėl lenkimo atveju didžiausias lenkimo momentas M_u gali būti skaičiuojamas pagal jėgų pusiausvyrą, santykinių deformacijų suderinamumo sąlygas ir sudėtinės medžiagos elgseną. Manoma, kad GFRP medžiagos elgsena yra tiesiškai elastinė, o betonas yra netiesiškai elastinė medžiaga, kurios savybės nustatytos 3.2 poskyryje. Daroma prielaida, kad betoninis viršus ir GFRP profiliuotis yra tobulai sujungti bei betono tempiamasis stipris yra nevertinamas.

Priimtas ekvivalentinis stačiakampis įtempių blokas (3.8 pav.) , apibrėžtas ACI 318 (ACI 318 2005), todėl:

$$M_u = C \left(x - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + T_{f1} \left(h_c - x + \frac{t_f}{2} \right) + T_{f1} \left(h_c - x + d_w + \frac{3 \cdot t_f}{2} \right) + T_{w1} \left(h_c - x + t_f + \frac{d_w}{2} \right) + T_{w2} \left(h_c - x + t_f + \frac{2 \cdot d_w}{3} \right). \quad (13)$$



3.8 pav. Lenkiamoji galia: (a) santykinų deformacijų pasiskirstymas; (b) įtempių pasiskirstymas; (c) įtempių susidarymas (Santos Neto & La Rovere 2010: 2559)

Iš pusiausvyros sąlygų randama neutralios ašies aukštis $x=39.75$ mm, kuris patvirtina prielaidą, kad neutralioji ašis yra betoninėje plokštėje. Taip pat galima patvirtinti, kad suirimas dėl betono sutrupinimo, aki santykinės deformacijos labiausiai tempiamuose pluoštuose siekia 0,0077, tai yra žemiau maksimalios ribos $\varepsilon'_{FRPu}=0,032$ (žr. 3.2 skyriuje). Esant 2) ir 3) suirimo atvejams, maksimali šlyjamoji galia (atitinkamai V_{us} , V_{ub}) galima gauti iš šios lygties, kuri suteikia šlyties įtempius tam tikrame transformuoto skerspjūvio (įtrūkusio) taške

$$\tau^* = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b^*}; \quad (14)$$

čia b^* – transformuoto skerspjūvio plotis taške; Q pirmasis zonos, esančios žemiau (arba aukščiau) taško neutralios ašies atžvilgiu , ploto momentas; I – transformuoto skerspjūvio inercijos momentas. Didžiausia šlyjamoji galia V_{us} gaunama įstačius $\tau^* = \tau_{us}$ (maksimalūs šlyties įtempiai, esantys GFRP profiliuotio viršutinės juosto ir sienelės jungtyje, žr. 3,1 poskyrį) į formulę (5), o V_{ub} gaunama į tą pačią formulę įstačius $\tau^* = \tau_{ub}$ (jungties stiprumas betono ir GFRP profiliuotio paviršių sąlyčio vietoje, žr. 3.2.4 poskyrį).

Ankstesniame darbe, H. L. La Rovere'ė ir A. B. S. Santos'as Neto parodė, kad tinkamumo ribinis būvis (*angl.* the Serviceability Limit State – SLS) daro įtaką kompozitinių plokščių projektavimui (La Rovere & Santos Neto 2006). Kad būtų ištirta kompozitinės plokštės laikomoji galia ir jos elgsena lenkimo metu iki suirimo, buvo atliktas 4 taškų lenkimo bandymas, teorinė ir baigtinių elementų analizės, kurios aprašytos tolimesniuose poskyriuose.

3.4 Eksperimento ir analitinė analizė

Dėl įlinkio ribojimų apibūdintų 3.3.1 poskyryje, kompozitinė perdanga su pasirinktu skerspjūviu, pavaizduotu 3.2 pav., gali būti naudojama tik trumpiems perėjimams jos išilgine kryptimi. Daugumoje pėsčiųjų tiltų ši perdanga turėtų būti naudojama atvirkščiai, dengianti išilgines sijas. Perdangos prototipo ilgis buvo pasirinktas 2,8 m ilgio, turint omenyje, kad tai galėtų būti 2 dviračių arba pėsčiųjų eismo juostos. Eksperimente bandomos plokštės tarpatramis – 2,55 m (atstumas tarp atramų centrų). Atlikus bandymą ir teorinę bei skaitinę analizę, gauti rezultatai buvo palyginti su eksperimentine konstrukcijos elgsena lenkimo metu (žr. 3.4.2 ir 3.4.3 poskyrius).

3.4.1 Keturių taškų lenkimo bandymas

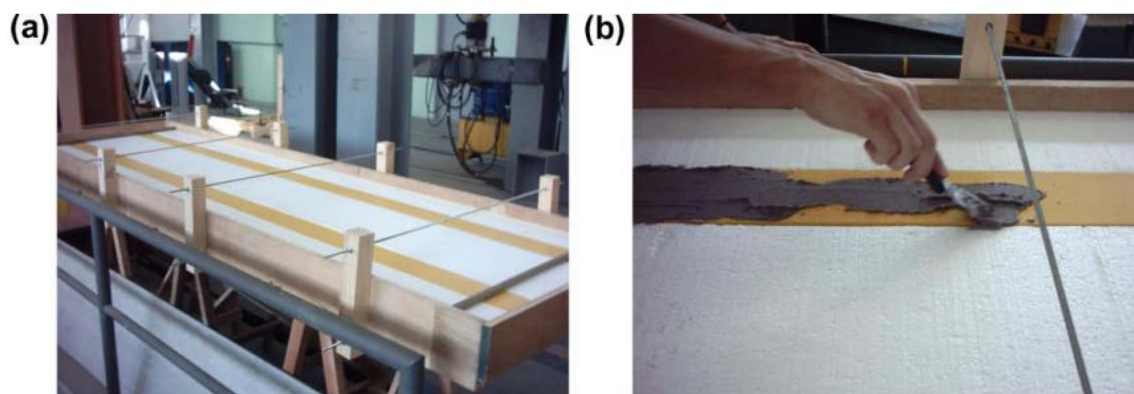
Pagaminti ir išbandyti 3 bandiniai, kurių ilgis 2,8m, skerspjūvio plotis 0,8 m, kaip pavaizduota 3.1 ir 3.2 pav. Apkrovos (P) buvo išdėstytos $L/3$ atstumu nuo atramų. Perdanga buvo apkraunama 10 kN/min greičiu iki suirimo.

Prieš atliekant bandymą, iš jėgų pusiausvyros, santykinų deformacijų suderinamumo ir medžiagos elgsenos buvo nustatyta maksimali jėga (P_u), žr. 4.2 poskyrių. Naudojant apskaičiuotas reikšmes, tokias kaip betono gniuždomasis stipris 30 MPa ir tamprumo modulis 26,07 GPa; GFRP maksimalios šlyties įtempiai 20,01 MPa; jungties tarp betono ir GFRP profiliuoties stipris paviršių sąlyčio vietoje 2,53 MPa (žr. 3.2.4 poskyrį) bei GFRP profiliuoties tamprumo modulis, nurodytas 2 lentelėje, galima numatyti bendrą galutinę apkrovą ($2P_u$) skirtingiems suirimo atvejams, kaip parodyta 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Didžiausios apkrovos prognozės 4 taškų lenkimo bandymui (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).

	Suirimo atvejis		
	Lenkimas (1)	Šlytis sienelėje/juostoje (2)	Jungtis (paviršių sąlyčio vieta) (3)
Laikomoji galia	$M_u = 73,5 \text{ kNm}$	$V_{u1} = 47,32 \text{ kN}$	$V_{u2} = 58,84 \text{ kN}$
Maksimali galutinė jėga	$2P_u = 172,9 \text{ kN}$	$2P_u = 94,64 \text{ kN}$	$2P_u = 117,68 \text{ kN}$

Iš lentelės galima matyti, kad kritinis suirimo atvejis yra Nr. 2, suirimas dėl šlyties profiliuotyje, jungtyje tarp sienelės ir juostos. Kompozitinės plokštės gamyba buvo atlikta pagal šiuos žingsnius. Pirma, putų polistirolu blokai buvo uždėti iš profiliuoto abiejų pusių. Visu perimetru iš medinių lentų sumontuotas klojinys betonui, kaip parodyta 3.9(a) pav. Toliau profiliuoto viršus buvo nušlifuotas 400 grūdėtumo su švitrinu popieriumi ir nuvalytas su izopropilo alkoholiu. Galutinis paviršiaus paruošimas buvo pasiektas su specialiais produktais (kondicionierius – fosforo rūgštis 0,01 N ir neutralizatorius – medžiaga amonio pagrindu 0,01 N), kad būtų pašalintas oksidai ir rūgštys, kurios gali būti ant profiliuoto paviršiaus. Ypatingas dėmesis skirtas santykinių deformacijų matuoklių įrengimui profiliuoto ir betono paviršių sąlyčio vietoje, siekiant užtikrinti apsaugą nuo drėgmės ir betono liejimo poveikio. Toliau pagal gamintojo nurodymus buvo užtepta *Sikadur 31* derva (žr. 9(b) pav.).



3.9 pav. Kompozitinės perdangos bandinio paruošimas: (a) putų polistirolu talpinimas tarp profiliuotųjų ir (b) dervos užtepimas ant profiliuoto viršutinės juostos (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)

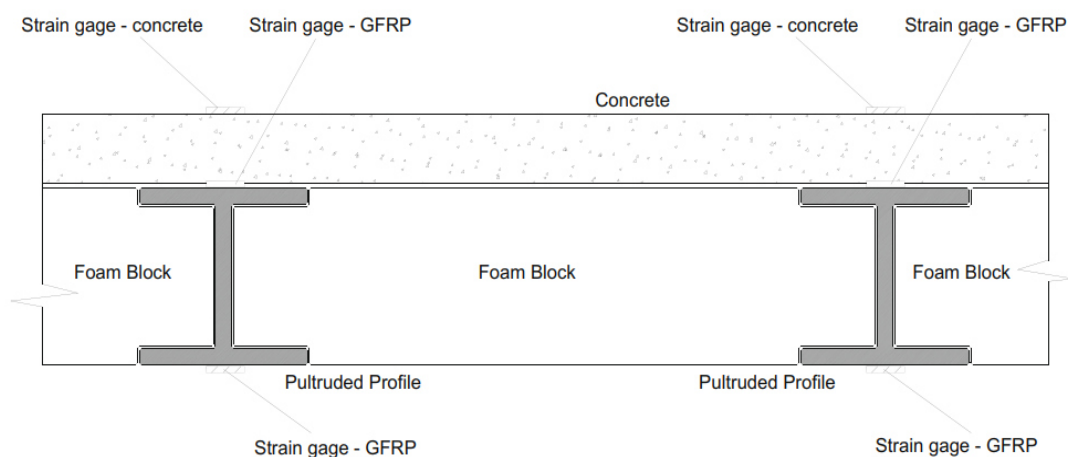
Betono mišinys buvo pagamintas pasiekti suprojektuotą $f'_c = 30$ MPa stiprį, atsižvelgiant į trumpų polipropileno pluoštų pridėjimą ($V_f = 0.10$ %). Kiekvienam perdangos bandiniui buvo paruošti 12 cilindriniai bandiniai, iš kurių 6 buvo panaudoti betono gniuždomojo stiprio matavimui ir kiti 6 – nustatyti betono tamprumo modulį. Tamprumo modulis buvo gautas iš σ - ϵ kreivės, laikantis procedūrų, nurodytų Brazilijos standarte (NBR 8522 1984).

Supylus betoną, visi bandiniai buvo džiovinami federalinio Santa Katarinos universiteto konstrukcijų laboratorijoje (*angl.* Structural Laboratory of Federal University of Santa Catarina, toliau – UFSC) aplinkos sąlygomis ir išbandyti po 28 dienų. Bandymo įrenginys pavaizduotas 3.10 pav.



3.10 pav. 4 taškų lenkimo bandymo įrenginys (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)

Siekiant sumažinti įtempių koncentraciją, po atramomis ir apkrovos pridėjimo taškuose buvo pridėtos medžio drožlių (*angl.* Oriented Strand Board, toliau – OSB) plokštelės. Ilinkis tarpatramio viduryje buvo matuojamas dviem linijinio poslinkio matavimo davikliais (*angl.* Linear Displacement Transducers, toliau – LVDT), išdėstytais ant šoninių plokštės paviršių. Norint išmatuoti betono sluoksnio, besiliečiančio su GFRP profiliuočiu, poslinkius, plokštės galuose buvo pritvirtinti keturi LVDT davikliai. Be to, maksimalūs gniuždymo ir tempimo įtempiai plokštės centre buvo išmatuoti su įtempių matuokliais, išdėstytais simetriškai ties skerspjūvio viduriu. Taip pat du įtempių matuokliai buvo sumontuoti betono ir GFRP profiliuoties paviršių sąlyčio vietoje, ant kiekvieno profiliuoties viršutinės juostos išorinio paviršiaus. Santykinių deformacijų matuoklių montavimo schema pateikta 3.11 pav.



3.11 pav. Santykinių deformacijų matuoklių išdėstymas skerspjūvyje: betono viršuje, jungtyje tarp betono ir GFRP profiliuoties bei profiliuoties apačioje (Santos Neto & La Rovere 2010: 2560)

Betoninių cilindrinų bandinių gniuždymo bandymo rezultatai pagal stiprį ir tamprumo modulį pateikti 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Betono gniuždomasis stipris ir tamprumo modulis, gauti iš cilindrinų bandinių bandymo rezultatų (pagal Santos Neto & La Rovere 2010).

Betono savybė	Vidutinės reikšmės (6 bandiniai kiekvienam perdangos bandiniui)			Vidurkis
	Perdangos bandinys Nr.1	Perdangos bandinys Nr.2	Perdangos bandinys Nr.3	
Gniuždomasis stipris (MPa)	35,95	39,93	39,83	38,57
Standartinė deviacija (MPa)	1,15	0,56	1,04	-
Tamprumo modulis (GPa)	38,85	43,62	43,56	42,01
Standartinė deviacija (GPa)	1,03	1,38	1,45	-

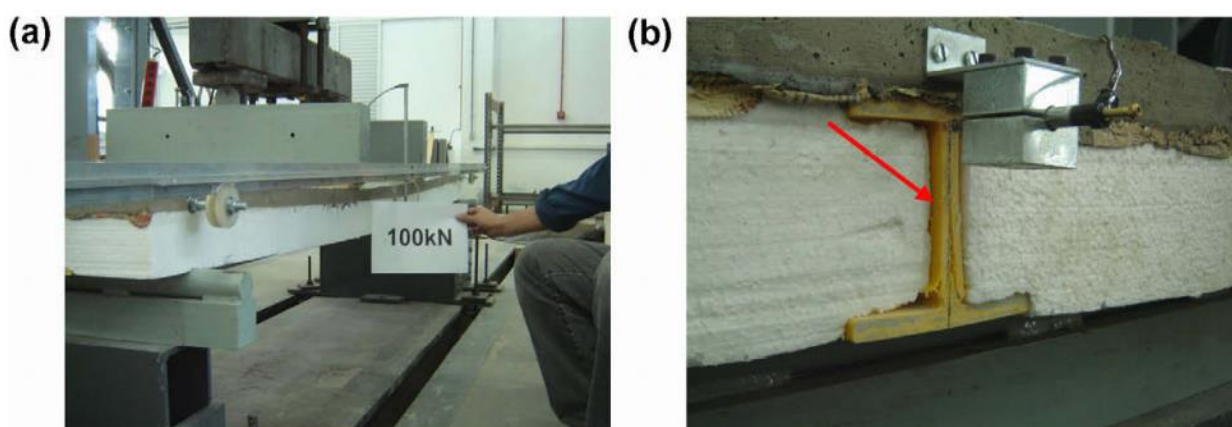
Galima pastebėti, kad vidutinės eksperimentinės reikšmės yra didesnės nei apskaičiuotos ($f'_c = 30$ MPa ir $E_c = 26.07$ GPa, reikšmės pateiktos 3.2.3 poskyryje).

Toliau aprašomi kiekvienos perdangos plokštės bandinio suirimo atvejai. 3.12 pav. parodo, kad bandinyje Nr. 1 įvyko aiškiai matoma jungties tarp betono ir GFRP profiliuoties irtis. Virš kiekvieno profiliuoties susiformavo du išilginiai įtrūkiai per visą betoninės plokštės ilgį. Svarbu pabrėžti, kad šis suirimas skiriasi nuo to, kas buvo spėjama 3.4 lentelėje, taip pat, kad tai buvo bandinys, kurio gniuždomasis stipris buvo mažiausias (žr. 3.5 lentelę).



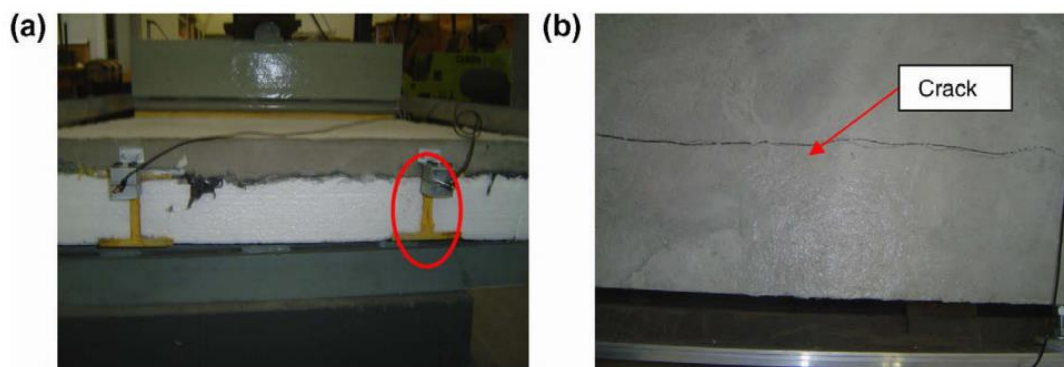
3.12 pav. Perdangos bandinys Nr. 1: jungties tarp betono ir GFRP profiliuotio suirimo atvejis (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)

Bandinio Nr. 2 deformuota schema prie 100 kN matoma 3.13 pav. Šioje perdangoje irtis dėl šlyties įvyko abiejuose GFRP profiliuotiuose vienu metu ir, kaip pavaizduota 3.13(b) pav., vertikalus plyšys atsivėrė per visą sienelės aukštį.



3.13 pav. Perdangos bandinys Nr. 2: (a) deformacijos forma esant 100 kN apkrovai ir (b) gautas suirimo dėl šlyties atvejis profiliuotyje (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)

Anksčiau minėtų suirimo atvejų kombinaciją galime išvelgti bandinyje Nr. 3. Irtis dėl šlyties atsirado tik vieno iš profiliuotųjų sienelėje, tai atsispindi 3.14(a) pav., iškart po to, kai įvyko suirimas betono ir GFRP profiliuotio viršutinės juostos sąlyčio paviršiuje; betone, virš profiliuotio, susiformavo plyšys, einantis per visą plokštės ilgį 3.14(b) pav.

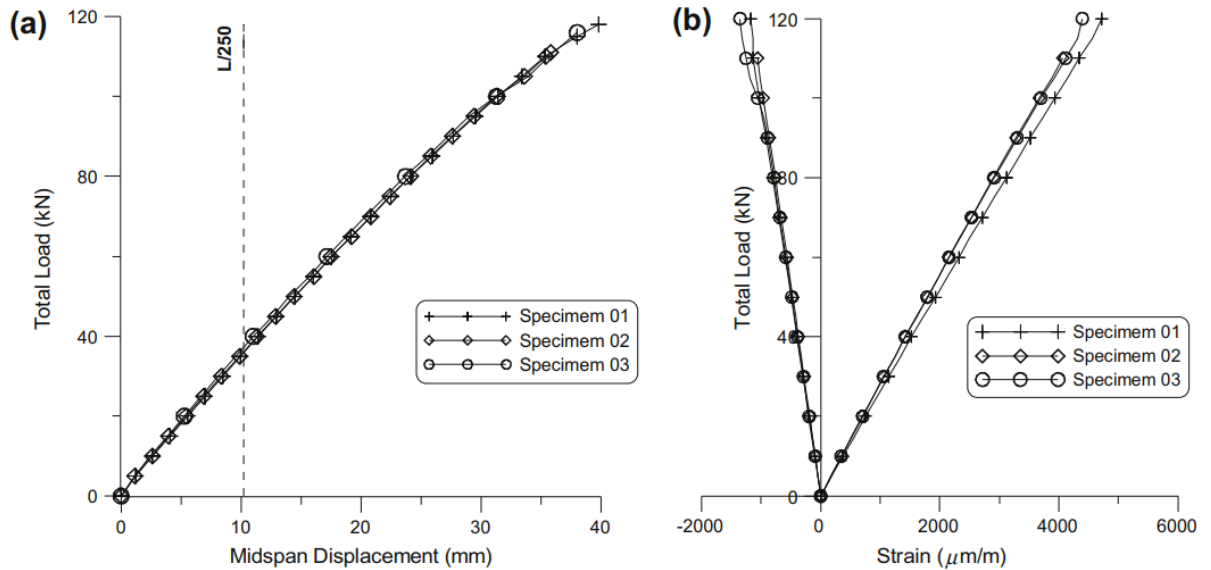


3.14 pav. Perdangos bandinys Nr. 3: (a) irtis dėl šlyties pasireiškė tik viename GFRP profiliuotyje (dešinėje plokštės pusėje) ir (b) išilginis plyšys betone virš to pačio profiliuoties (Santos Neto & La Rovere 2010: 2561)

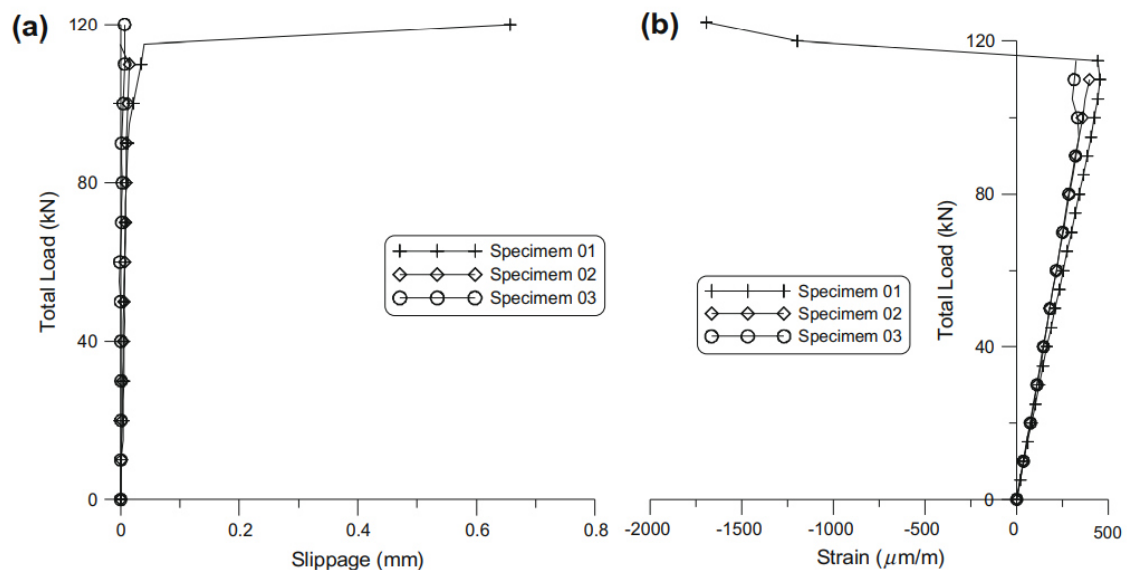
Atlikus matavimus, kiekvienam bandiniui buvo nubraižytos apkrovos-įlinkio kreivės ($F-u$), pavaizduotos 3.15(a) pav. Galima matyti, kad visų bandinių eksperimentinės $F-u$ kreivės beveik sutampa, tik pastebimi nežymūs maksimalios vertės skirtumai. Apkrova, prie kurios suiro bandiniai Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3, atitinkamai buvo 118,0 kN, 111,0 kN ir 116,9 kN. Šios reikšmės yra labai panašios su apskaičiuotomis reikšmėmis, pateiktomis 3.3 lentelėje. Galima daryti išvadą, kad apskaičiuota reikšmė jungties suirimo atveju yra labai artima bandiniu Nr. 1, tačiau apskaičiuota reikšmė suirimo dėl šlyties profiliuotyje (95,7 kN) yra mažesnė negu bandinyje Nr.2, o tai rodo, kad profiliuoties šlyjamoji galia buvo nuvertinta. Reikėtų pabrėžti, kad suirimo apkrova buvo apskaičiuota naudojant betono apskaičiuotas gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio vertes, kurios yra mažesnės nei gautos eksperimento metu. Taip pat reikėtų atsižvelgti į tai, kad vidutinis maksimalus tarpatramio vidurio įlinkis yra apie 3,5 karto didesnis negu leistinas ($L/250$).

3.15 pav. pavaizduota apkrovos ir santykinių deformacijų ($F-\epsilon$), kurios yra tempimo ir gniuždymo maksimalios vidutinės reikšmės, išmatuotos santykinių deformacijų matuokliais, esančiais kiekvieno profiliuoties apačioje ir betono viršuje, ant abiejų plokštės pusių, kreivė.

Trijų bandinių apkrovos-praslydimo (vidutinės reikšmės išmatuotos plokštės galuose) grafikas pavaizduotas 3.16(a) pav. Betono ir GFRP profiliuoties paviršių sąlyčio vietoje gautų vidutinių reikšmių, išmatuotų deformacijų matuokliais, esančiais profiliuoties viršutinėje juostoje, apkrovos-santykinių deformacijų grafikas pavaizduotas 3.16 b) pav.



3.15 pav. Perdangos bandinių grafikai: a) apkrovos ir poslinkio (vidutinių reikšmių) kreivė ir b) apkrovos ir maksimalių santykinių deformacijų (vidutinių reikšmių) kreivė (Santos Neto & La Rovere 2010: 2562)



3.16 pav. Perdangos bandinių grafikai: a) apkrovos ir praslydimo (vidutinių reikšmių) kreivė ir b) apkrovos ir maksimalių santykinių deformacijų jungtyje (vidutinių reikšmių) kreivė (Santos Neto & La Rovere 2010: 2562)

Kaip matome iš 3.16(a) pav., kiekvieno bandinio praslydimo reikšmės ties 100 kN apkrova buvo beveik lygios nuliui. Tai rodo, kad tuo metu jungtis tarp betono ir GFRP profiliuotio buvo tobula. Bandinyje Nr.1 atsirado praslydimas po to, kai atsivėrė plyšys jungtyje, o bandiniuose

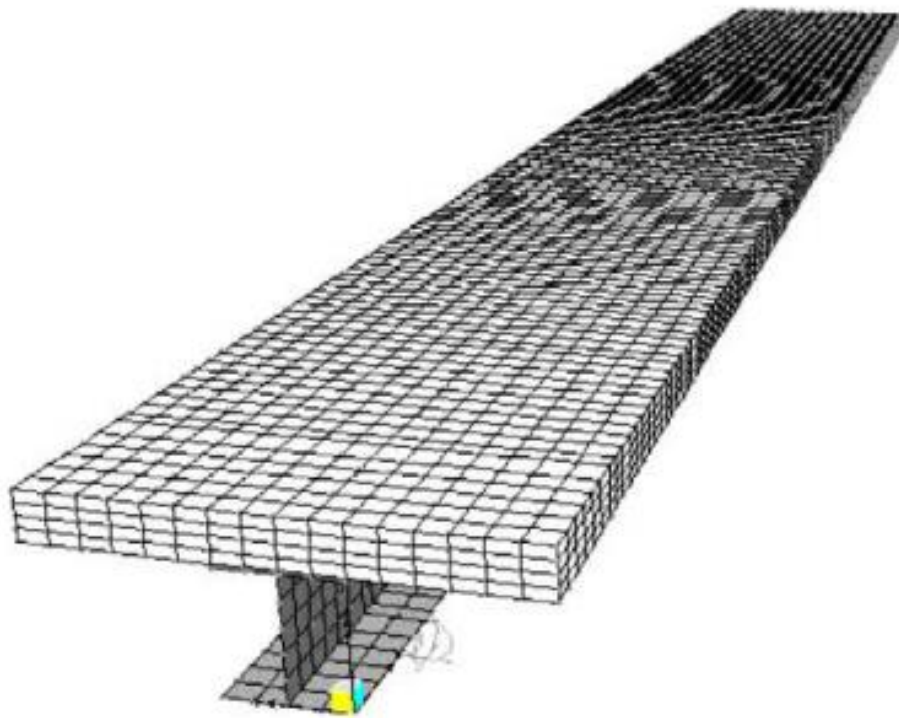
Nr.2 ir Nr.3 praslydimas neužfiksuotas iki irties dėl šlyties profiliuotyje. Trečiajame bandinyje buvo užfiksuotas kombinuotas suirimo jungtyje ir profiliuoties suirimo dėl šlyties atvejis. Deja, buvo neįmanoma išmatuoti praslydimo, 3.16(b) pav. netoli suirimo apkrovos matoma kintanti santykinų deformacijų tendencija paviršių sąlyčio vietoje. 16(b) pav. pastebima, kad bandinio Nr. 1 atveju įvyksta staigus santykinų deformacijų pasikeitimas iš tempimo į gniuždymą. Tai lėmė neutralios ašies pasikeitimas dėl atsiradusio plyšio plokštėje ir dėl betono atsiskyrimo nuo GFRP profiliuoties, suirus jungčiai tarp jų.

3.4.2 TBT naudojimas po analizės

Naudojant Timošenko sijos teoriją (*angl.* Timoshenko Beam Theory, toliau – TBT) bei transformuoto ploto metodą (*angl.* Transformed Area Approach), buvo atlikta supaprastinta kompozitinės perdangos analizė, darant prielaidą, kad tai buvo vienos krypties 4 taškų lenkimas. Priimama, kad betonas ir GFRP profiliuoties yra tobulai sujungti ir, kad betono elgsena prieš atsirandant įtrūkiams yra tiesiškai elastingė. Ekvivalentiškos savybės buvo perskaičiuotas naudojant eksperimentines reikšmes: GFRP profiliuoties tamprumo ir šlyties moduliai $E = 32,86 \text{ GPa}$, $G = 2.67 \text{ GPa}$ (žr. 3.2 lentelę); betono tamprumo modulis $E_c = 42.01 \text{ GPa}$ (žr. 3.5 lentelę). Naudojant ekvivalentines savybes supleišėjusiam ir nesupleišėjusiam skerspjūviams bei apskaičiuotą betono tempiamojo stiprio reikšmę (žr. 3.2.3 poskyrį), galima nubrėžti dvilypę apkrovos-poslinkio kreivę ($F-u$). Ši teorinė kreivė, lyginama su kreivėmis, gautomis eksperimento ir skaitinės analizės, atliktos 5.2 poskyryje, metu (žr. 3.18 pav.).

3.4.3 Skaitinė analizė naudojant baigtinių elementų programą

Naudojant kompiuterinę baigtinių elementų programą *SAP 2000*, buvo atlikta tiesiškai elastingė baigtinių elementų perdangos analizė (*SAP 2000 PLUS 1998*) Betoninė plokštė buvo sumodeliuota iš 8 mazgų *solid* tipo elementų; GFRP profiliuoties sumodeliuotas naudojant 4 mazgų *shell* tipo elementus; putų polistirolo blokai nebuvo modeliuojami. Daroma prielaida, kad elementai yra sujungti tobulai ir medžiagų elgsena yra tiesiškai elastingė. GFRP priimta kaip ortotropinė medžiaga, kurios savybės pateiktos 3.1 lentelėje, o betonas – kaip izotropinė medžiaga, kurios tamprumo modulis $E_c = 42,01 \text{ GPa}$ (žr. 3.5 lentelę) bei Puasono koeficientas lygus 0,2.

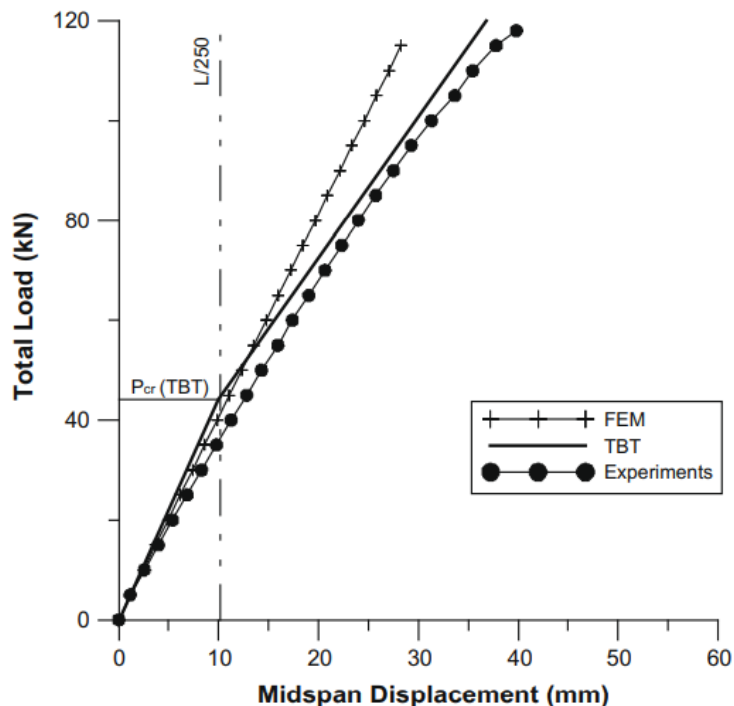


3.17 pav. Baigtinių elementų modelis, naudojamas 4 taškų lenkimo linijinei-elastinei analizei.
(Santos Neto & La Rovere 2010: 2563)

Kaip matoma 3.17 pav., dėl simetrijos buvo sumodeliuota tik pusė kompozitinės perdangos. Modeliuojant buvo stengiamasi tiksliai nurodyti ribas ir 4 taškų lenkimo bandymo apkrovimo sąlygas. Kitame skyriuje aprašomas rezultatų palyginimas su teoriniais ir eksperimentiniais rezultatais.

3.5 Teorinių, skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Teoriniai Timošenko sijos ir skaitinės baigtinių elementų analizių rezultatai palyginami su gautais eksperimento metu, naudojant apkrovos-poslinkio ($F-u$) kreives pavaizduotas 3.18 pav.



3.18 pav. Apkrovos ir tarpatramio vidurio įlinkio grafikas: TBT, BE ir eksperimentinių analizių palyginimas (Santos Neto & La Rovere 2010: 2563)

Eksperimentinė $F-u$ kreivė buvo nubrėžta paėmus vidutines visų bandinių reikšmes. Palyginimo grafike pastebimas tarp teisės gautos baigtinių elementų (toliau – BE) analizės metu ir TBT analizės kreivės, kurios savo ruožtu sutampa su kreive, gauta eksperimento metu ankstyvosiose apkrovos stadijose (iki $2P \approx 10$ kN). Po šio etapo, eksperimentinė kreivė pradeda nukrypti nuo teorinės ir skaitinės kreivės, taip parodydama neteisingą elgseną. Kaip tikėtasi, nei BE (tiesiškai elastinis modelis), nei TBT kreivės negalėjo pavaizduoti netiesiškos betono elgsenos gautos eksperimento metu, tačiau naudojant supleišėjusio skerspjuvio savybes, TBT gerai įvertina supleišėjusios plokštės standumą. Reikėtų pabrėžti, jog analitiniai ir skaitiniai modeliai yra labai jautrūs bet kokiems medžiagos tamprumo modulio pokyčiams ir tam tikra variacija buvo pastebėta matuojant reikšmes. Iš grafiko galima matyti, kad didžiausia apkrova yra maždaug 3 kartus didesnė nei apkrova, prie kurios perdanga pasiekia leistiną ribinį įlinkį $L/250$ ir maždaug 7,4 karto didesnė už eksploatavimo apkrovą pėsčiųjų tiltams (naudojimo apkrova kartu su pėsčiųjų apkrova 6,09 kN/m). Tai parodo, kad pasirinkto tarpatramio perdangos projektavimas grindžiamas tinkamumo ribiniu būviu.

Baigiamosios pastabos būsimiems darbams

A. B. S Santos'o Neto ir H.L. La Rovere'ės darbe (Santos Neto & La Rovere 2010) pateikiama kompozitinė betono ir GFRP profiliuotio perdanga naudojama pėsčiųjų tiltams. Norint apibūdinti medžiagų savybes, pirmiausia buvo atlikti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. Perdangos

elgsenos lenkimo metu iki suirimo tyrimui 4 taškų lenkimo bandyme išbandyti trys bandiniai, kurių plotis 0,8 m, o pasirinktas tarpatramis – 2,55 m. Visų 3 bandinių elgsena buvo gan panaši iki 100 kN apkrovos, tai galima matyti beveik sutampančiose apkrovos-poslinkio kreivėse. Bandinių pasiektos maksimalios apkrovos reikšmės buvo labai artimos, tačiau skyrėsi suirimo atvejai: 1) bandinio Nr. 1 – jungties tarp betono ir GFRP profiliuoto irtis abejose perdangos pusėse; 2) bandinio Nr. 2 – irtis dėl šlyties tuo pačiu metu įvykusi abiejų profiliuotųjų sienelėse; 3) bandinio Nr. 3 – 1) ir 2) ir suirimo atvejų kombinacija, 2) irtis pasireiškė tik viename profiliuotyje, vienoje perdangos pusėje. Rezultatai parodo, kad tiek 1), tiek 2) suirimo atvejai gali būti kritiniai. Pagal A. B. S Santos'ą Neto ir H.L. La Rovere'ę antrąjį suirimo atvejo priežastis galima lengviau išspręsti nei pirmojo. Galima patobulinti profiliuoto atsparumą šlyčiai prie profiliuoto sienelės pridėdant stiklo pluošto plokšteles $\pm 45^\circ$ kampu (stengiantis nepakenkti tamprumo moduliui išilgine kryptimi) arba panaudoti kito skerspjūvio profiliuotuosius, tokius kaip dvigubas WF skerspjūvis. Pirmojo suirimo atveju, galima panaudoti tam tikras jungtis, kurios padėtų kažkiek padidinti maksimalią apkrovą, tačiau padidėtų ir plastiškumas (Santos Neto & La Rovere 2010).

Atlikus bandymą, buvo supaprastinta teorinės analizės, kurios metu naudojama Timošenko sijos teorija (*angl.* Timoshenko Beam Theory, toliau – TBT), ir linijinė-elastinė baigtinių elementų (BE) analizės rezultatai buvo palyginti su konstrukcijos elgsena eksperimento metu. Buvo lyginamos apkrovos-poslinkio kreivės. Visų analizių kreivės ankstyvuojau apkrovimo metu beveik sutapo, bet vėliau, po 100 kN apkrovimo, eksperimentinė kreivė dėl netiesinės betono elgsenos nukrypsta nuo kitų. Tačiau, naudojant supleišėjusio skerspjūvio savybes, TBT gana gerai įvertina perdangos įtrūkių standumą.

Iki šiol atliktų tyrimų rezultatai yra labai perspektyvūs. Nepaisant to, plačiam kompozitinių plokščių pritaikymui pėsčiųjų tiltams vis dar reikia papildomų tyrimų. Šiuo metu A. B. S Santos'as Neto ir H.L. La Rovere'ė vykdo eksperimentines programas, skirtos ištirti kompozitinės sijos elgseną apkraunant plokštę sutelktosiomis apkrovomis (praspaudimo tyrimai betoninėje plokštėje ir šlyties poveikio GFRP profiliuotyje tyrimai), elgseną, esant ilgalaikėms ir dinaminėms apkrovoms (vibracijos, atsirandančios dėl pėsčiųjų apkrovos, kontroliavimas) bei išanalizuoti perdangos patvarumą. Kiti GFRP profiliuotieji taip pat bus tiriami, akcentuojant profiliuoto atsparumo šlyčiai patobulinimą, tokiu būdu liks tik vienas tikėtinas suirimo atvejis – jungties tarp betono ir GFRP profiliuoto irtis.

4 Skačiavimai baigtinių elementų programa

Šiame skyriuje atliekama skaitinė analizė naudojant baigtinių elementų (toliau – BE) programas *Atena GiD* ir *Atena Studio*. Pagal 3 skyriuje aprašytą eksperimentą sudaromas skaitinis BE modelis. Iš pradžių atkuriamas stiklo pluoštu armuoto polimero (toliau –GFRP) plokštelės tempimo bandymas. Vėliau, pritaikius GFRP medžiagą skaitiniame modelyje, pagal plokštelės tempimo bandymą, sukuriama kompozitinės betono ir GFRP profiliuoties skaitinis BE modelis, kuris palyginamas su eksperimentu, aprašytu 3.4.5 poskyryje.

Toliau atliekami atraminių mazgų modeliavimas ir analizė.

4.1 Skaitinio modelio kūrimas pagal atliktą GFRP plokštelės tempimo bandymą

Naudojant BE programas *Atena GiD* ir *Atena Studio*, atkurti GFRP plokštelės tempimo bei kompozitinės GFRP profiliuoties ir betono perdangos segmento 4 taškų lenkimo eksperimentai. Pirmiausias sukuriama BE skaitinis modelis pagal GFRP plokštelės tempimo bandymą. Jis kuriamas tam, kad GFRP medžiagos tamprumo modulis atitiktų gautą bandymų metu.

4.1.1 Tempiamos GFRP plokštelės eksperimento duomenys

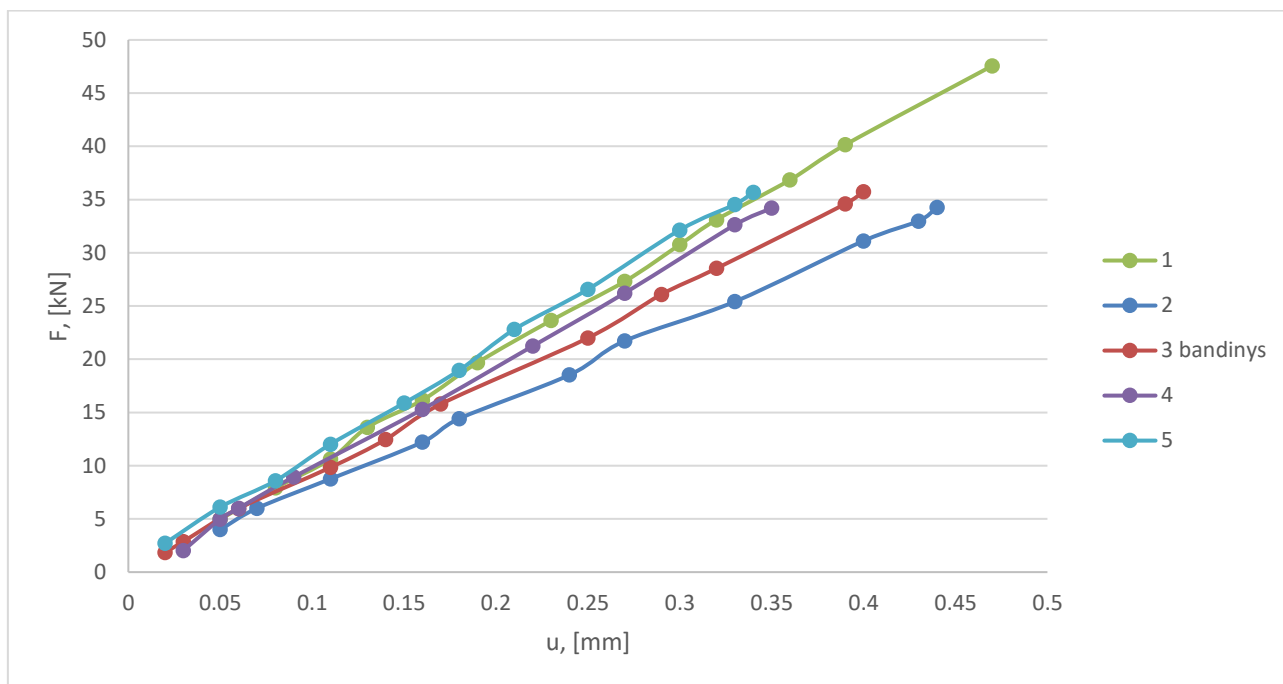
Dėl paprastesnio modelio buvo pasirinktas GFRP plokštelės tempimo bandymas. Eksperimento buvo išbandytos 5 plokštelės, kurios buvo išpjautos iš kompozitinėje perdangoje naudojamų GFRP profiliuoties ir kurių skerspjūvio matmenys yra 9x15x250 mm. Iš A. B. S Santos'ą Neto ir H.L. La Rovere'ės atlikto GFRP plokštelių tempimo gautos tamprumo modulio reikšmės pateikiamos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. GFRP plokštelės tempimo bandymo tamprumo modulio rezultatai (pagal (Santos Neto & La Rovere 2007))

Bandinio Nr.	Tamprumo modulis, E (GPa)
1	38,52
2	29,31
3	33,97
4	36,18
5	39,84
Vidurkis	35,56

A. B. S Santos'o Neto ir H.L. La Rovere'ės atliktame GFRP profiliuoties 3 taškų lenkimo bandyme gautas vidutinis tamprumo modulis $E=32.86$ MPa (žr. 3.2 lentelę), todėl pasirenkama arčiausia reikšmė, gauta plokštelės tempimo bandyme. Iš 4.1 lentelės galime matyti, kad artimiausia

tempiamos plokštelės tamprumo modulio reikšmė gaunama ištyrus 3 bandinį, todėl palyginimui su BE skaitiniu modeliu pasirinkta 3 bandinio apkrovos-poslinkio kreivė. Visų bandinių apkrovos-poslinkio kreivės pavaizduotos 4.1 pav.



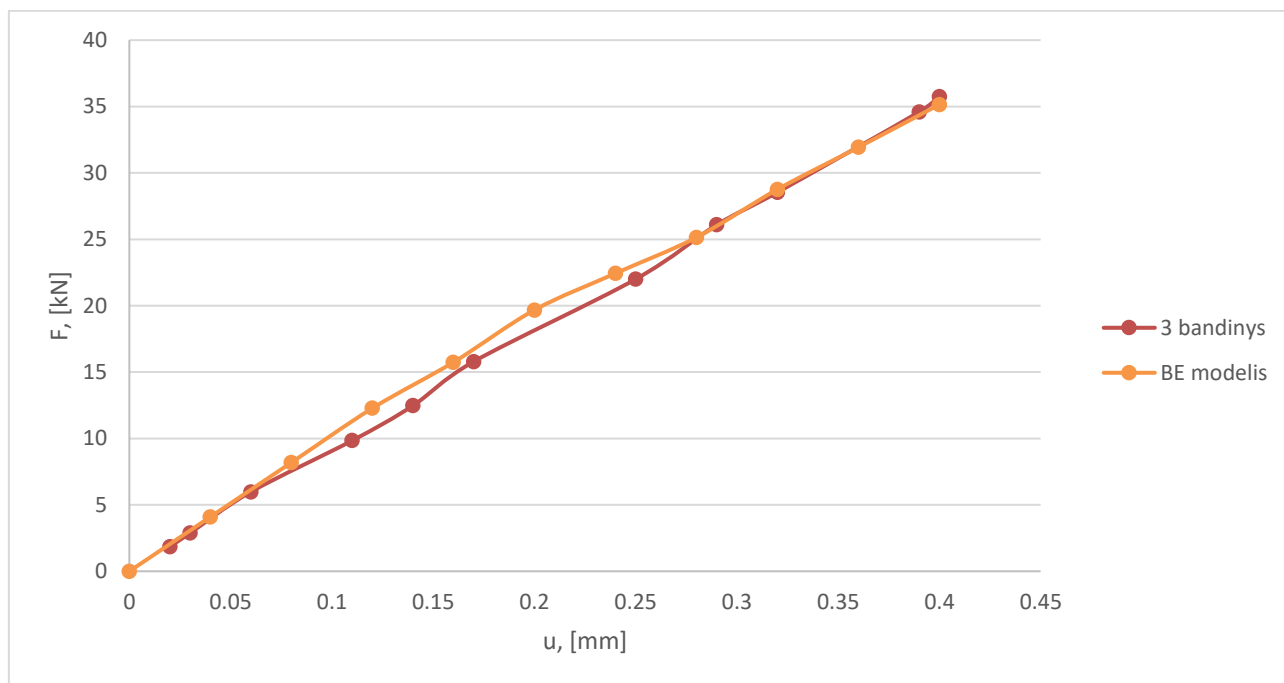
4.1 pav. 5 GFRP plokštelių bandinių tempimo bandymo apkrovos-poslinkio kreivės (F-u) (pagal Santos Neto & La Rovere 2007)

4.1.2 Tempiamos GFRP plokštelės skaitinis modelis

Modeliavimo programoje *Atena GiD* sumodeliuota 9x15x250mm GFRP plokštelė. Jis suskirstyta į stačiakampius baigtinius elementus. Plokštelė tempiama viena kryptimi, kuri sutampa su pluoštų kryptimi. Vietoje jėgos viename plokštelės gale pridedamas 3 bandyme pasiektas maksimalus poslinkis $u=0,4\text{mm}$, o kitas plokštelės galas yra standžiai įtvirtinamas. Kad būtų sudaryta modelio apkrovos-poslinkio kreivė, poslinkio pridėties taške pridėti jėgos ir poslinkio stebėjimo taškai (*angl.* monitor points). Modelyje GFRP medžiaga įvertinama kaip gelžbetonis, tik vietoj betono ir armatūros atitinkamai suvestos dervos ir stiklo pluošto savybės. Įvertinama, kad pluoštai išsidėstę išilgine plokštelės kryptimi. Kai geometrija pilnai sumodeliuota, naudojant *Atena studio* programą, pradedama skaitinio modelio skaičiavimas. Jo metu brėžiama apkrovos-poslinkio kreivė, kuri bus lyginama tolesniame poskyryje.

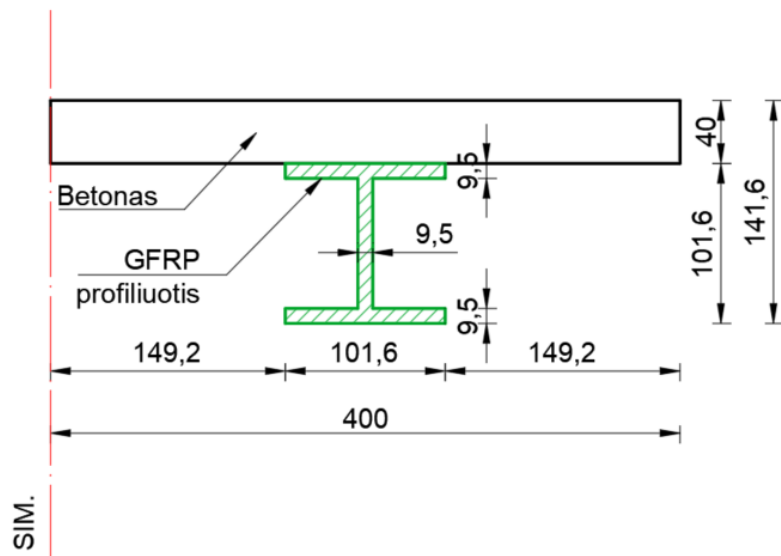
4.1.3 Tempiamos GFRP plokštelės skaitinio modelio ir eksperimento rezultatų palyginimas

Keičiant GFRP sudedamųjų dalių charakteristikas, gauta apkrovos-poslinkio kreivė, kuri palyginama su 3 bandinio kreive, gauta eksperimento metu. Šių dviejų kreivių palyginimas pavaizduotas 4.2 pav.

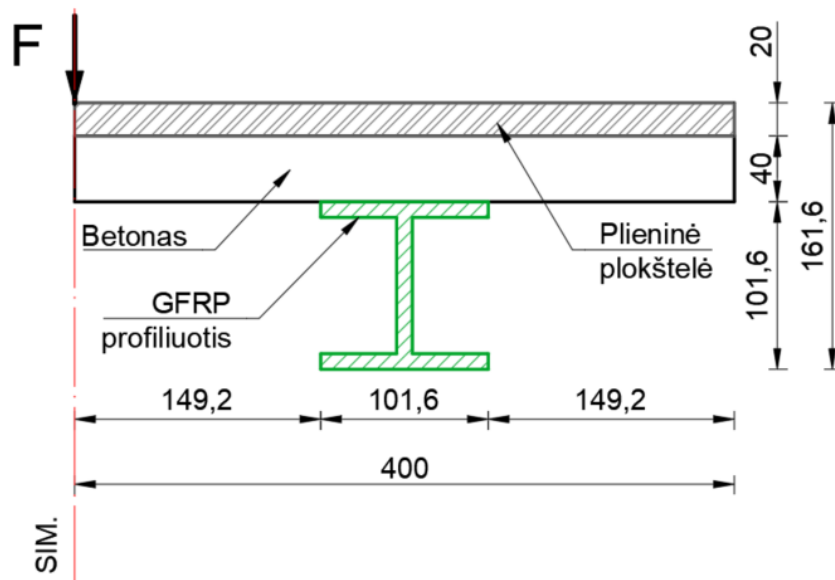


4.2 pav. GFRP plokštelės 3 bandinio (3) ir BE skaitinio modelio (T01) apkrovos-poslinkio (F - u) kreivės palyginimas.

Atlikus tempiamos stiklo pluoštu armuotos polimerinės plokštelės baigtinių elementų skaitinio modelio analizę ir palyginus su eksperimento, nagrinėto literatūroje, duomenimis, iš 4.6 pav. matoma, kad baigtinių elementų skaitinio modelio apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreivė gana sutampa su vieno iš bandinių tempimo eksperimento metu gauta apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreive. Tarp kreivių gauta paklaida yra apytiksliai 5 %. Paklaida galėjo atsirasti dėl GFRP medžiagos netiesinės elgsenos bei pluoštų skersine kryptimi neįvertinimo tempiamos plokštelės baigtinių elementų skaitiniame modelyje. Nors tempiamos plokštelės skaitinio modelio tamprumo modulio reikšmė ($E=32.87$ GPa) skiriasi 3 % nuo tempiamos plokštelės eksperimento, nagrinėto literatūroje, reprezentatyvaus bandinio tamprumo modulio, bet visiškai sutampa su GFRP profiliuoties 3 taškų lenkimo bandyme, aprašyto literatūroje, gauta tamprumo modulio reikšmė ($E=32.86$ GPa). Todėl šio skaitinio modelio duomenys taikomi kompozitinės GFRP profiliuoties ir betono perdangos skaitiniame baigtinių elementų modelyje.

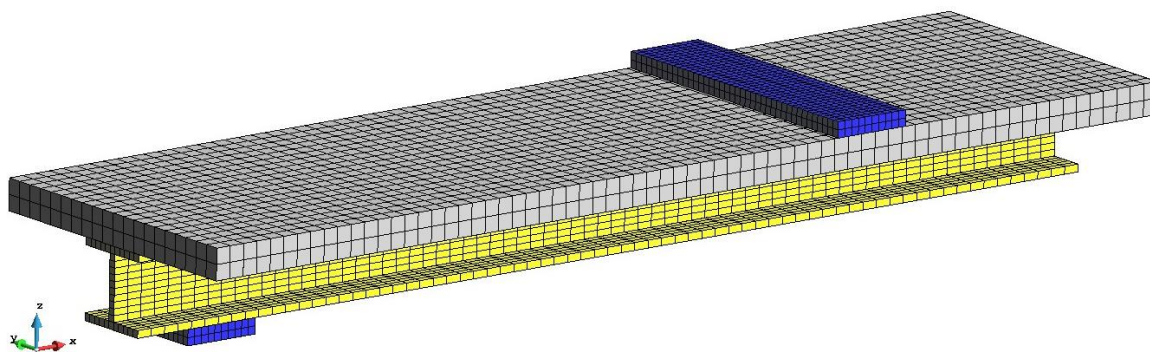


4.4 pav. Kompozitinė perdanga. Pjūvis 1-1



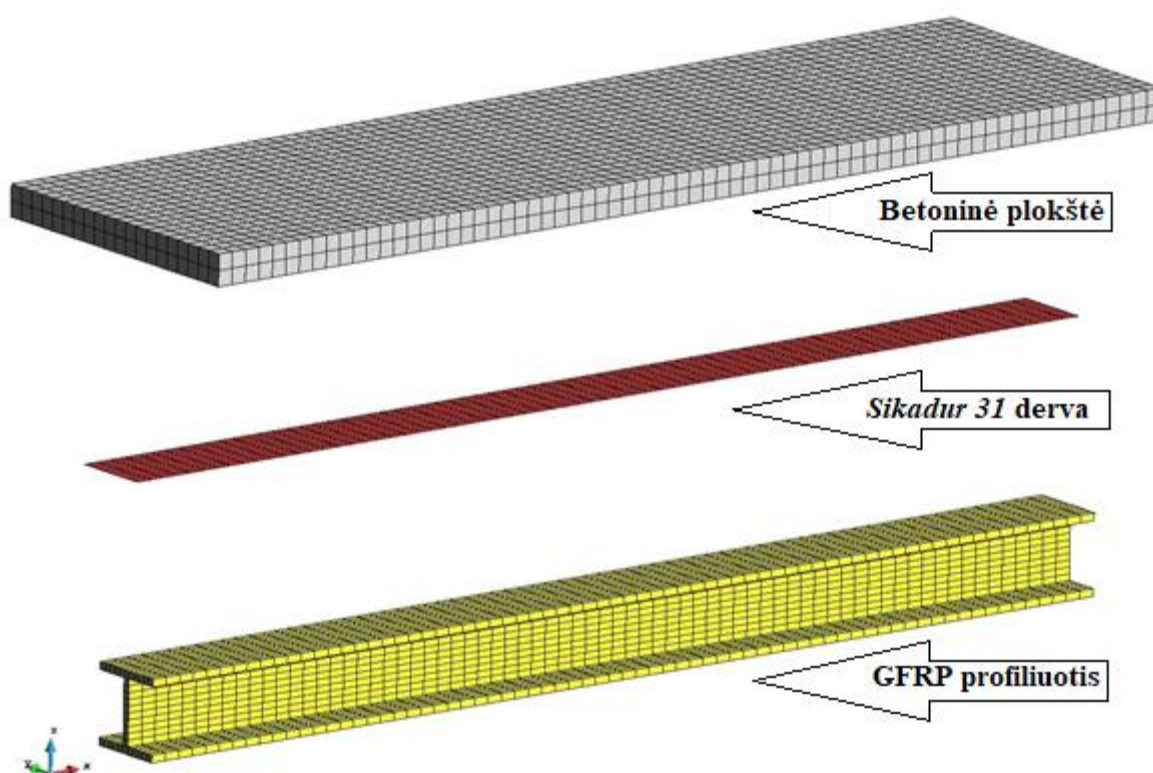
4.5 pav. Kompozitinė perdanga. Pjūvis 2-2

Naudojant simetrijos sąlygas, baigtinių elementų programoje buvo sudaryta tik 1/4 kompozitinės perdangos dalis. Simetrijos ašis 2 kryptimis galima matyti tiek skaičiavimo schemeje (žr. 4.3 pav.), tiek pjūviuose 1-1 ir 2-2 (žr. 4.4 pav. ir 4.5 pav.). Taip sumažinamas baigtinių elementų kiekis ir skaičiavimo trukmė. Apkrovos pridėjimo vietoje ir perdangos tarpatramio viduryje pridedami apkrovos ir poslinkio stebėjimo taškai, pagal kurių duomenis skaičiavimo metu nubrėžiama apkrovos-poslinkio kreivė. Skaitinis modelis pavaizduotas 4.6 pav.



4.6 pav. Kompozitinės perdangos skaitinis modelis, sudarytas naudojant *Atena GiD* programą

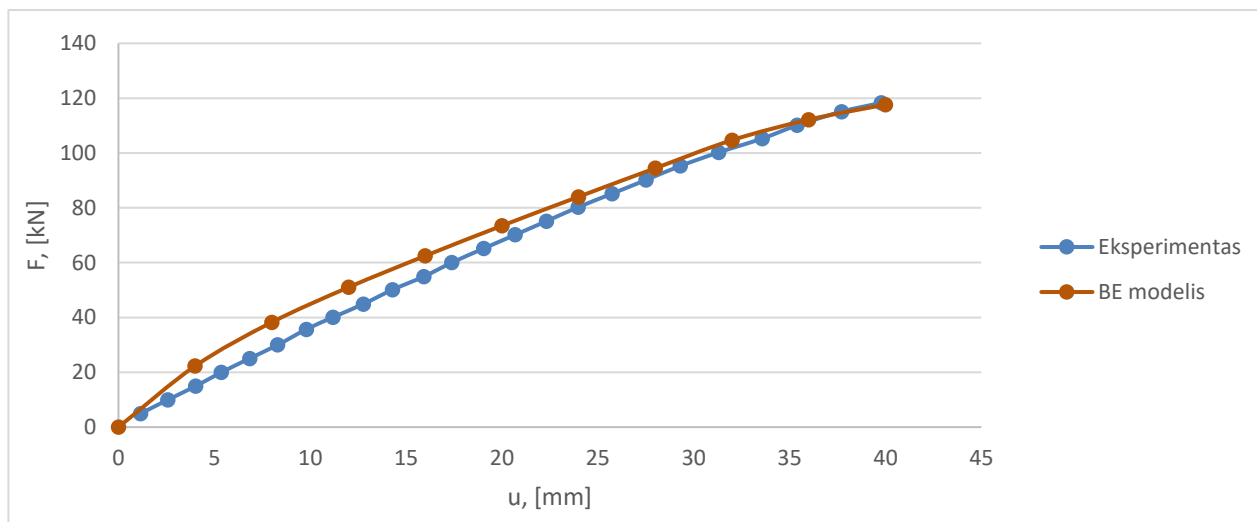
Kompozitinės GFRP profiliuotio ir betono perdangos struktūra pavaizduota 4.7 pav. Šioje išskaidytoje struktūroje matomas GFRP profiliuotis ant kurio uždedamas paviršius, kuris imituoja jungtį tarp GFRP profiliuotio ir betoninės plokštės. Šio paviršiaus medžiagos stiprumas, naudojant *Sikadur 31* dervą, yra $\tau_{ub}=2,53$ MPa, kaip buvo nustatyta eksperimente, aprašytame 3 skyriuje.



4.7 pav. Kompozitinės perdangos struktūrinė schema

4.2.2 Kompozitinės perdangos skaitinio modelio ir eksperimento palyginimas

Baigtinių elementų skaitinio modelio rezultatai lyginami su A. B. S Santos'o Neto ir H.L. La Rovere'ės atliktu kompozitinės perdangos lenkimo bandymu, kuris aprašytas 3.4.5 poskyryje. Pagal 3.15 pav. sudarytas kompozitinės perdangos bandinių vidutinių reikšmių apkrovos-poslinkio kreivė. Ji palyginama 4.6 pav. su kreive, gauta skaitinio modelio analizės metu.



4.8 pav. Kompozitinės perdangos BE skaitinio modelio ir eksperimento palyginimas

Kompozitinės GFRP profiliuotio ir betono perdangos skaitinis baigtinių elementų modelio rezultatai buvo palyginti su literatūroje aprašytu kompozitinės perdangos 4 taškų lenkimo bandymu. Paklaida tarp šio skaitinio modelio ir minėto eksperimento apkrovos ir vertikalios poslinkio kreivių (žr. 4.8 pav.) yra apie 10 %, todėl galima teigti, jog kompozitinės perdangos baigtinių elementų skaitinis modelis yra tinkamas tolimesniems tyrimams. Paklaidos galėjo atsirasti dėl medžiagų netiesinės elgsenos, stiklo pluoštų įvertinimo GFRP profiliuotyje tik išilgine kryptimi bei praslydimo tarp GFRP profiliuotio ir betono.

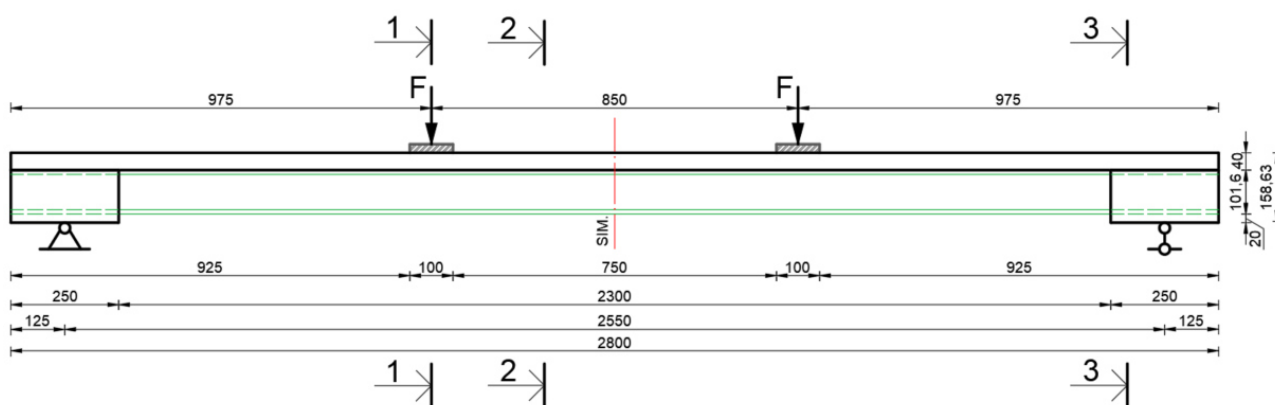
Gautos įtempių pasiskirstymo paveikslai yra tolimesniame skyriuje, kadangi jie bus lyginami su skaitiniais modeliais, kuriuose papildomai sumodeliuoti atraminiai mazgai.

4.3 Kompozitinės perdangos atraminio mazgo parinkimas

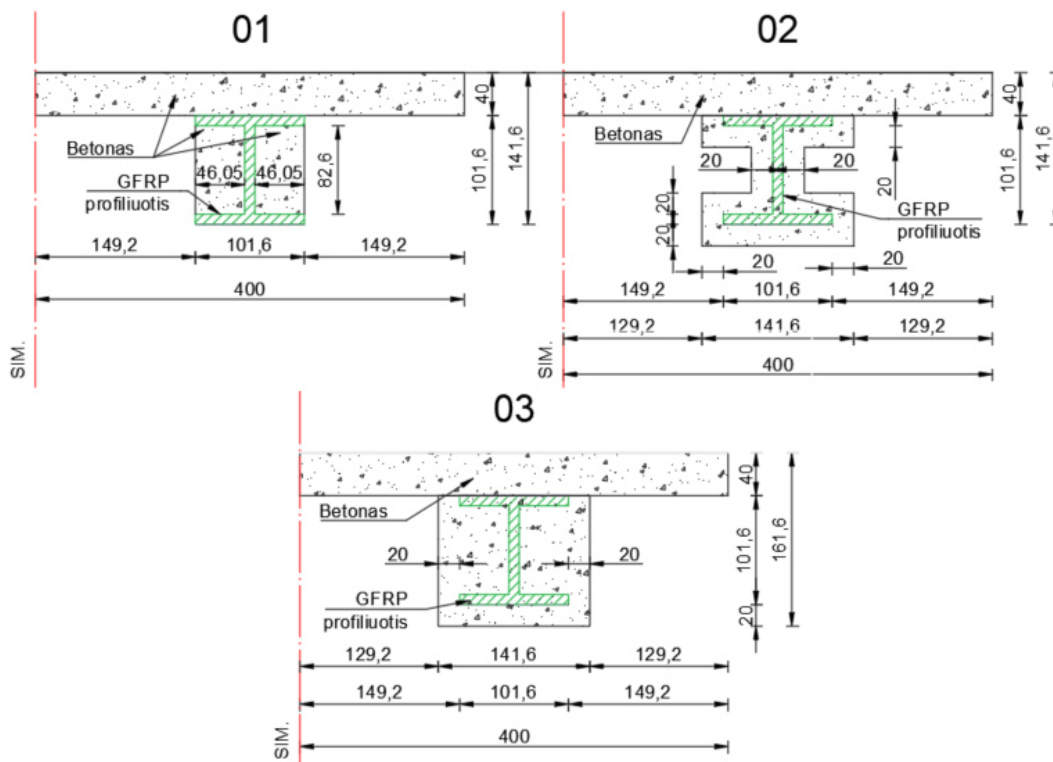
Pagal A. B. S Santos'o Neto ir H.L. La Rovere'ės eksperimentą yra 2 kompozitinės perdangos suirimo atvejai: 1) jungties tarp GFRP profiliuotio ir betono suirimo atvejis ir 2) irtis GFRP profiliuotio sienelėje (Santos Neto & La Rovere 2010). Norint sumažinti 2-ojo irties atvejo tikimybę, reikėtų sustiprinti atraminius mazgus, kuriuose labiausiai pasireiškia šlyties poveikis. Šiam tikslui sukuriama keletas BE skaitinių modelių su skirtingo skerspjūvio atraminiais mazgais. Skaitinių modelių rezultatai bus palyginami tarpusavyje ir parenkamas optimaliausias atraminis mazgas iš sukurtų variantų.

4.3.1 Kompozitinės perdangos su atraminiais mazgais skaitinis modelis

Atraminių mazgų stiprinimui pasirinktas betonas. Juo ties atrama apibetonuojamas GFRP profiluotis. Pasirinkti 3 atraminiai mazgai: 1) apibetonavimas tarp GFRP profiluoties viršutinės ir apatinės juostų (papildomo betono svoris 437,43 kg/vnt.); 2) 20 mm apibetonavimas nuo GFRP profiluoties (papildomo betono svoris 608,35 kg/vnt.); 3) GFRP profiluoties įbetonavimas į stačiakampę formą (papildomo betono svoris 833,95 kg/vnt.). Atraminių mazgų skerspjūviai pavaizduoti 4.10 pav., o kompozitinės perdangos skaičiuojamoji schema su atraminiais mazgais 4.9 pav.

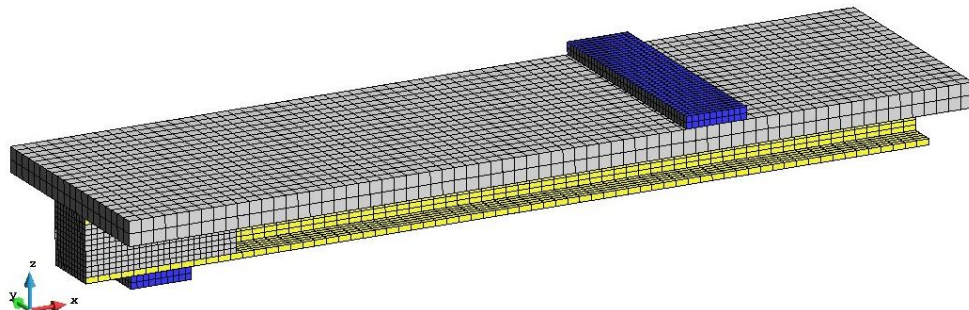


4.9 pav. Kompozitinės perdangos skaičiuojamoji schema

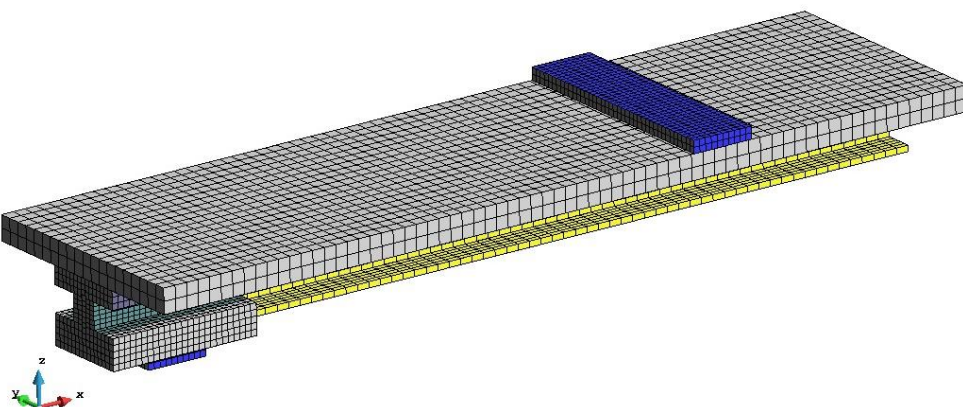


4.10 pav. Atraminių mazgai 1) apibetonavimas tarp GFRP profiluoties viršutinės ir apatinės juostų; 2) 20 mm apibetonavimas nuo GFRP profiluoties; 3) GFRP profiluoties įbetonavimas į stačiakampę formą

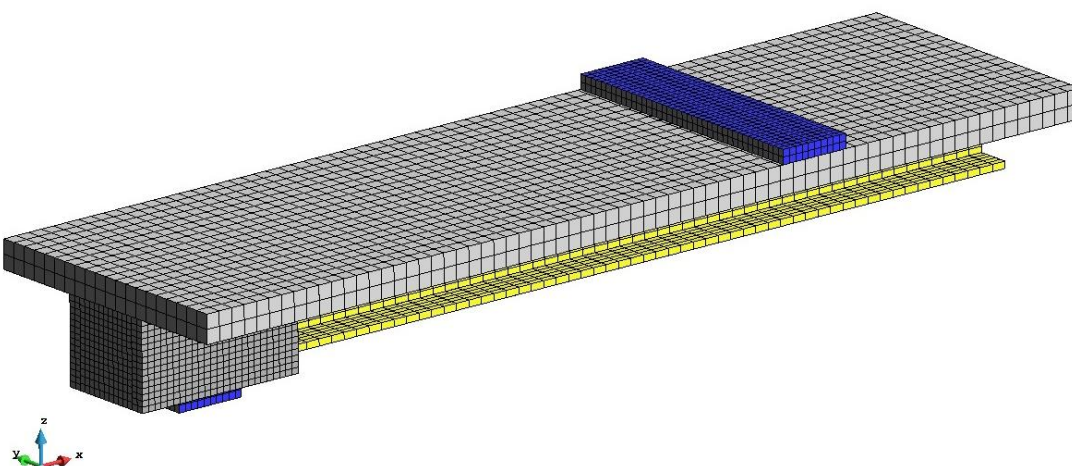
Kompozitinės perdangos baigtinių elementų skaitiniame modelyje papildomai sumodeliuojami atraminiai mazgai pagal 4.10 pav. pavaizduotus skerspjūvius, naudojant *Atena GiD* programą. Skaičiavimai atliekami pasitelkus *Atena Studio* baigtinių elementų programą. Skaitiniai kompozitinės perdangos modeliai su atraminiais mazgais pavaizduoti 4.11 pav.



01



02

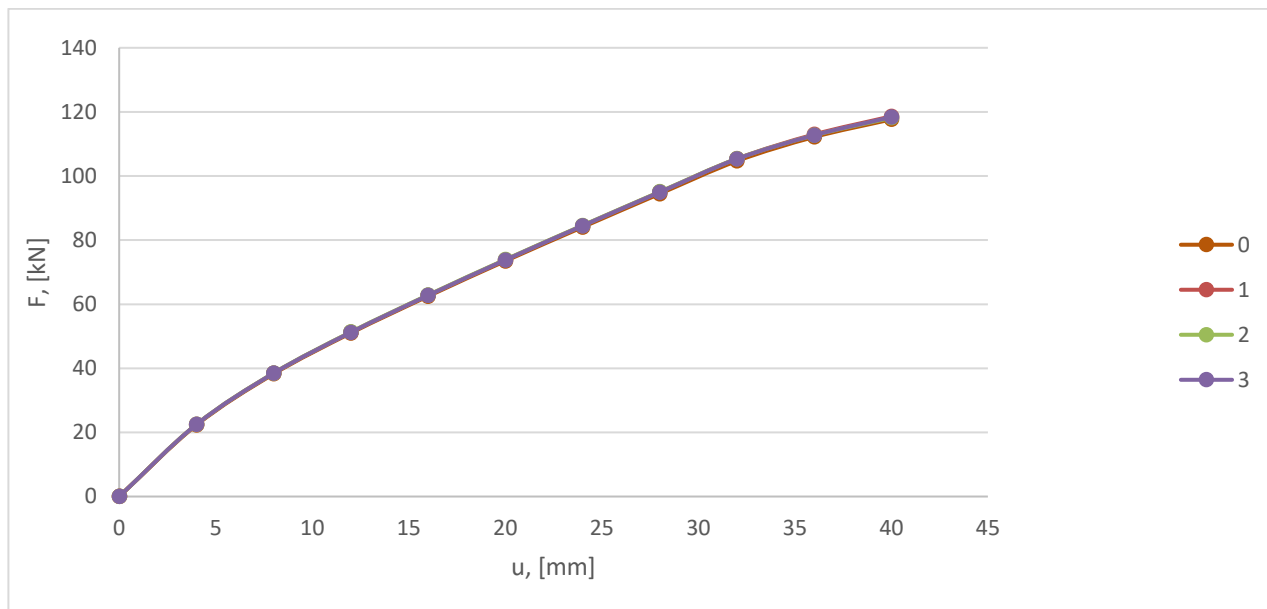


03

4.11 pav. Skaitiniai kompozitinės perdangos modeliai su atraminiais mazgais: 1) apibetonavimas tarp GFRP profiliuoties viršutinės ir apatinės juostų; 2) 20 mm apibetonavimas nuo GFRP profiliuoties; 3) GFRP profiliuoties įbetonavimas į stačiakampę formą

4.3.2 Kompozitinės perdangos skaitinio modelio palyginimas

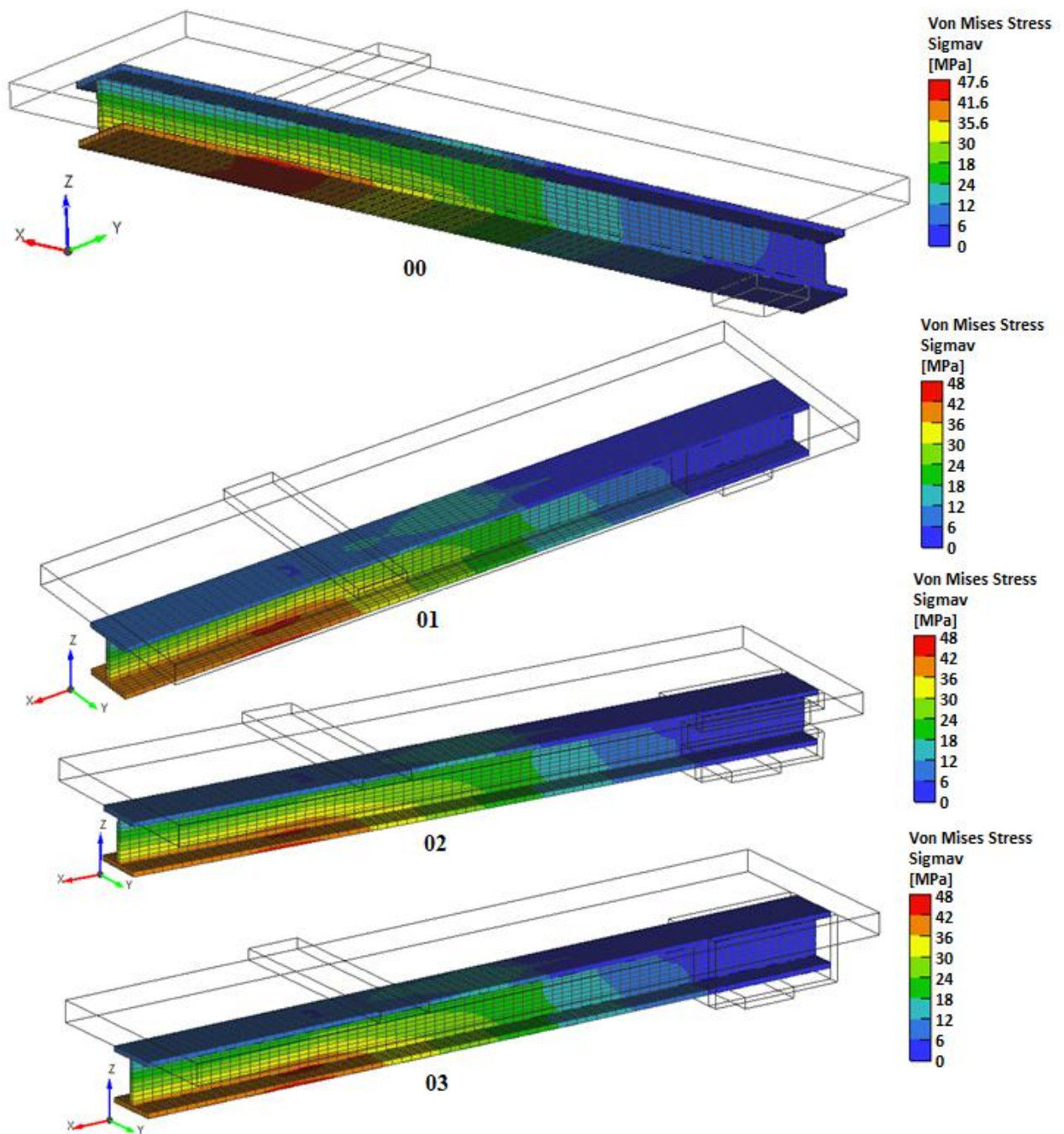
Atlikus skaičiavimus, gauti rezultatai palyginami tarpusavyje. Pirmiausia lyginamos kompozitinės sijos skaitinio modelio ir modelių su atraminiais mazgais apkrovos ir vertikalios poslinkio kreivės, kurios pavaizduotos 4.12 pav.



4.12 pav. Kompozitinės perdangos skaitinių modelių apkrovos ir vertikalios poslinkio kreivės: 0) pradinis modelis; 1) 01 atraminis mazgas; 2) 02 atraminis mazgas; 3) 03 atraminis mazgas.

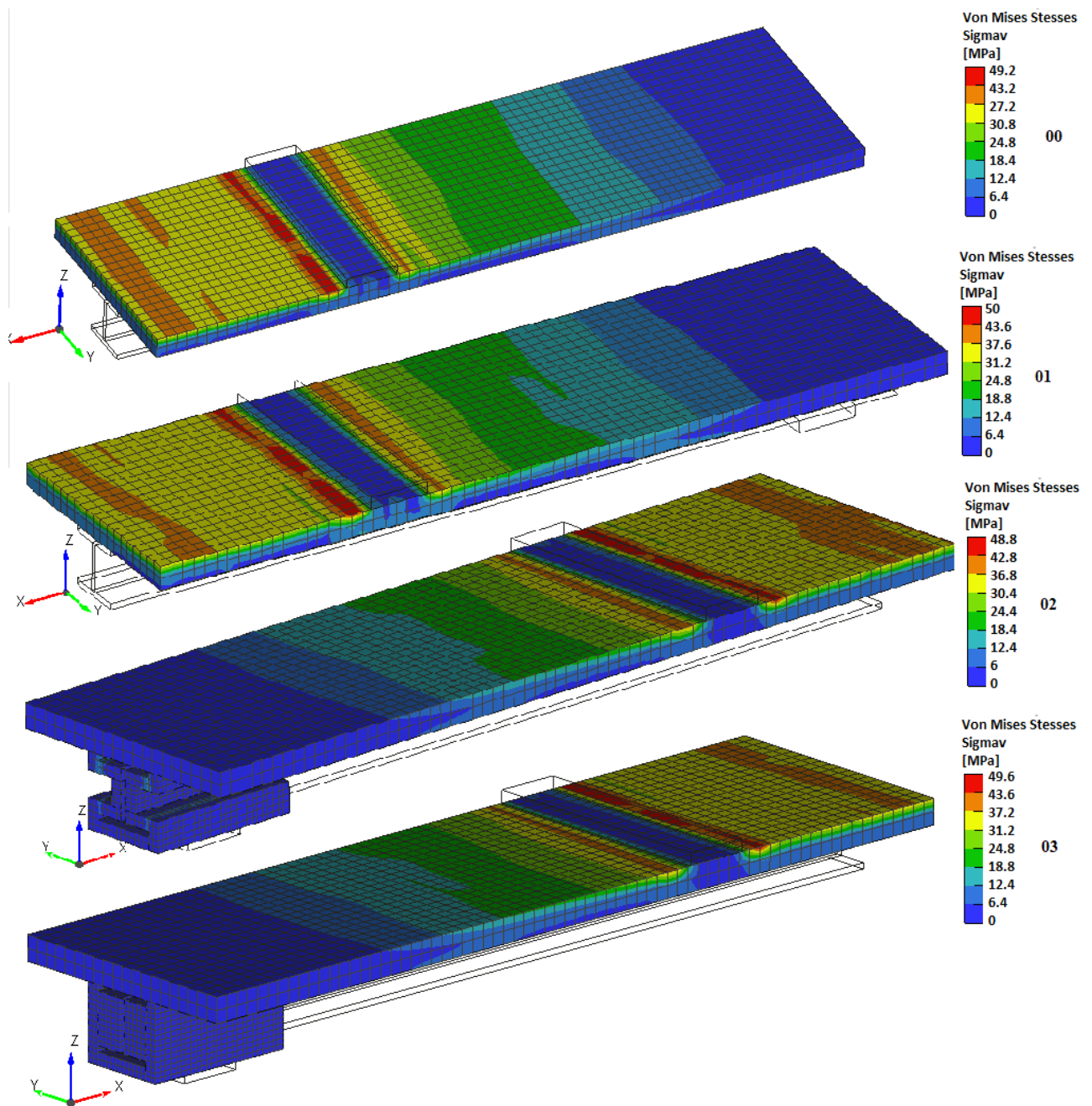
Iš 4.12 pav. galima matyti, jog atraminių mazgų pasikeitimas didelės įtakos įlinkiui neturėjo. Kreivių nuokrypiai yra labai nedideli, todėl galima teigti, kad jos sutampa.

Atlikus skaitinę baigtinių elementų analizę, gauti Von Mises'o įtempiai profiliuotyje ir betone, normaliniai įtempiai betono ir GFRP sąlyčio vietoje ir tangentialiniai įtempiai GFRP profiliuotyje. Von Mises'o įtempiai pavaizduoti 4.13, 4.14, 4.15 pav.



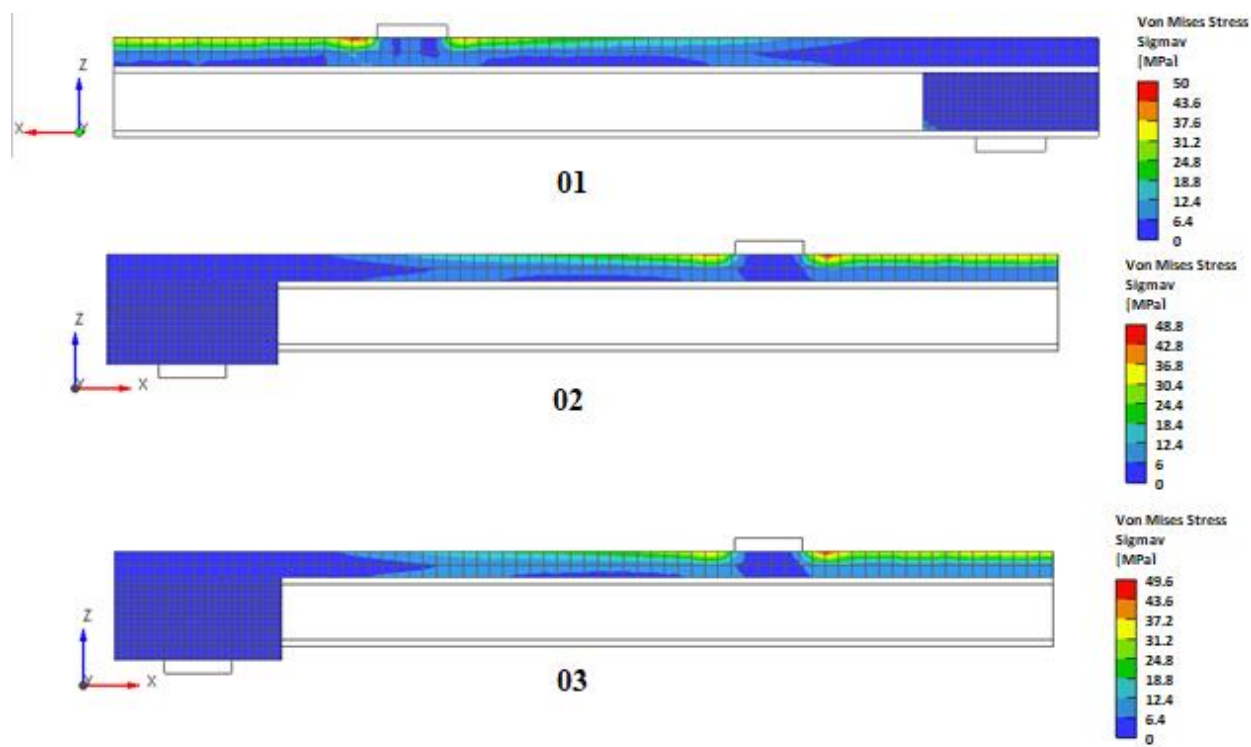
4.13 pav. Von Mises įtempiai GFRP profiliuotyje: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.

Žvelgiant į 4.13 pav. akivaizdu, kad atraminio mazgo apibetonavimas sumažino įtempius atramoje. Atraminių mazgų vaizduose galima išvelgti, kaip įtempiai pradeda didėti toliau nuo atramos, negu pradinio modelio vaizde. Nors įtempiai ir nutolo nuo atramos, tačiau GFRP profiliuotyje tarp skirtingų atramų mazgų įtempių pasiskirstymo žymaus skirtumo nėra, matomas nežymus įtempių skirtumas GFRP profiliuoties viduryje, apatinėje juostoje.



4.14 pav. Von Mises'o įtempiai betone: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.

4.14 pav. pavaizduotuose įtempių pasiskirstymo vaizduose matoma įtempių koncentracija betono viršutiniame paviršiuje, po plienine plokšte, apkrovos pridėties vietoje. Kaip ir GFRP profiliuotyje, betono įtempiai pasislenka toliau nuo atramos, lyginant apibetonuotų atraminių mazgų vaizdus ir pradinį modelį. Iš visų trijų atraminių mazgų, nors ir nedaug, bet labiausiai pasikeitė 02 skerspjūvio įtempiai, jie sumažėjo apie 2 %. Kitais dviem atvejais įtempiai nežymiai padidėjo apie 1 % perdangos viduryje.

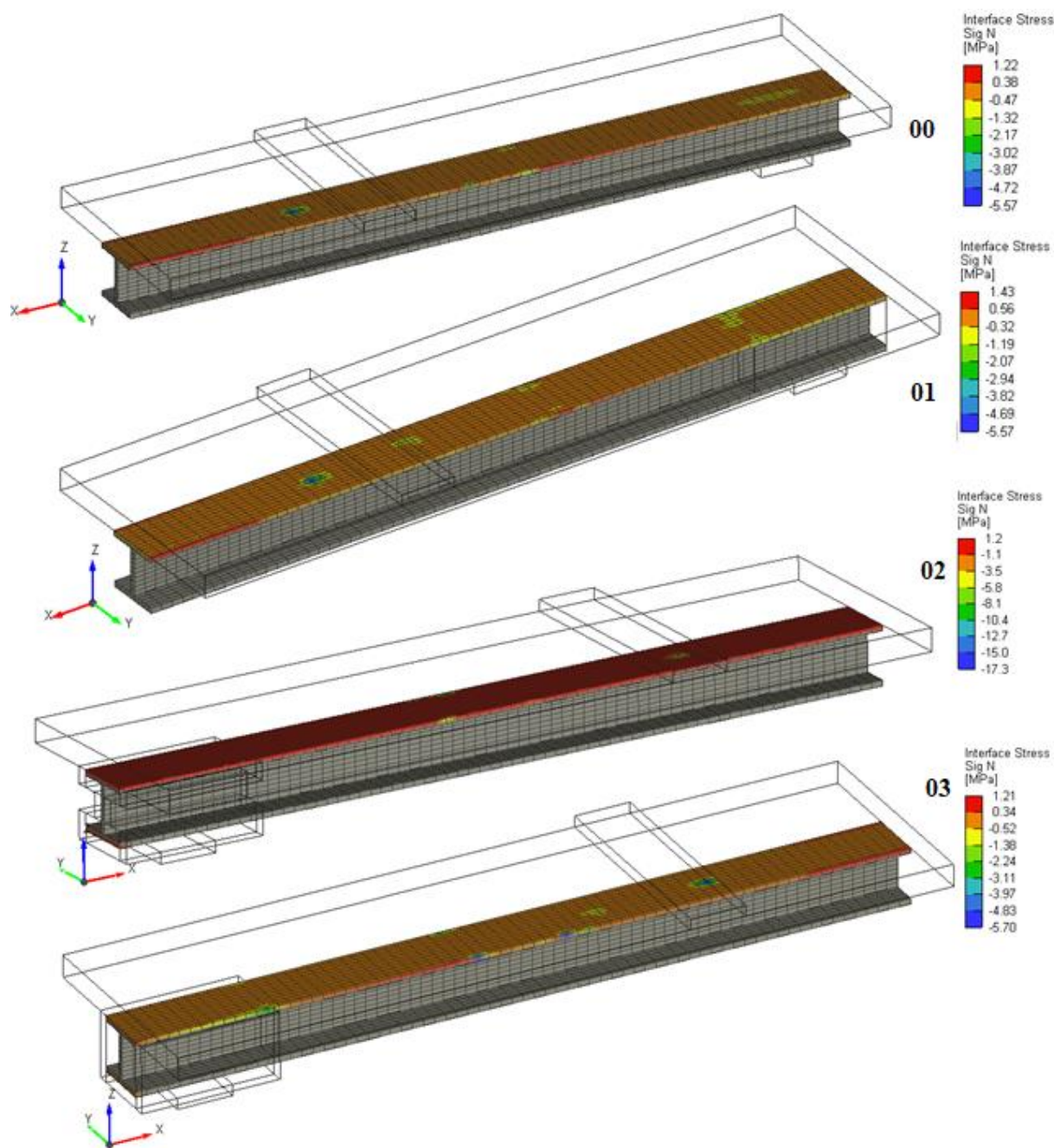


4.15 pav. Von Mises įtempiai betone: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.

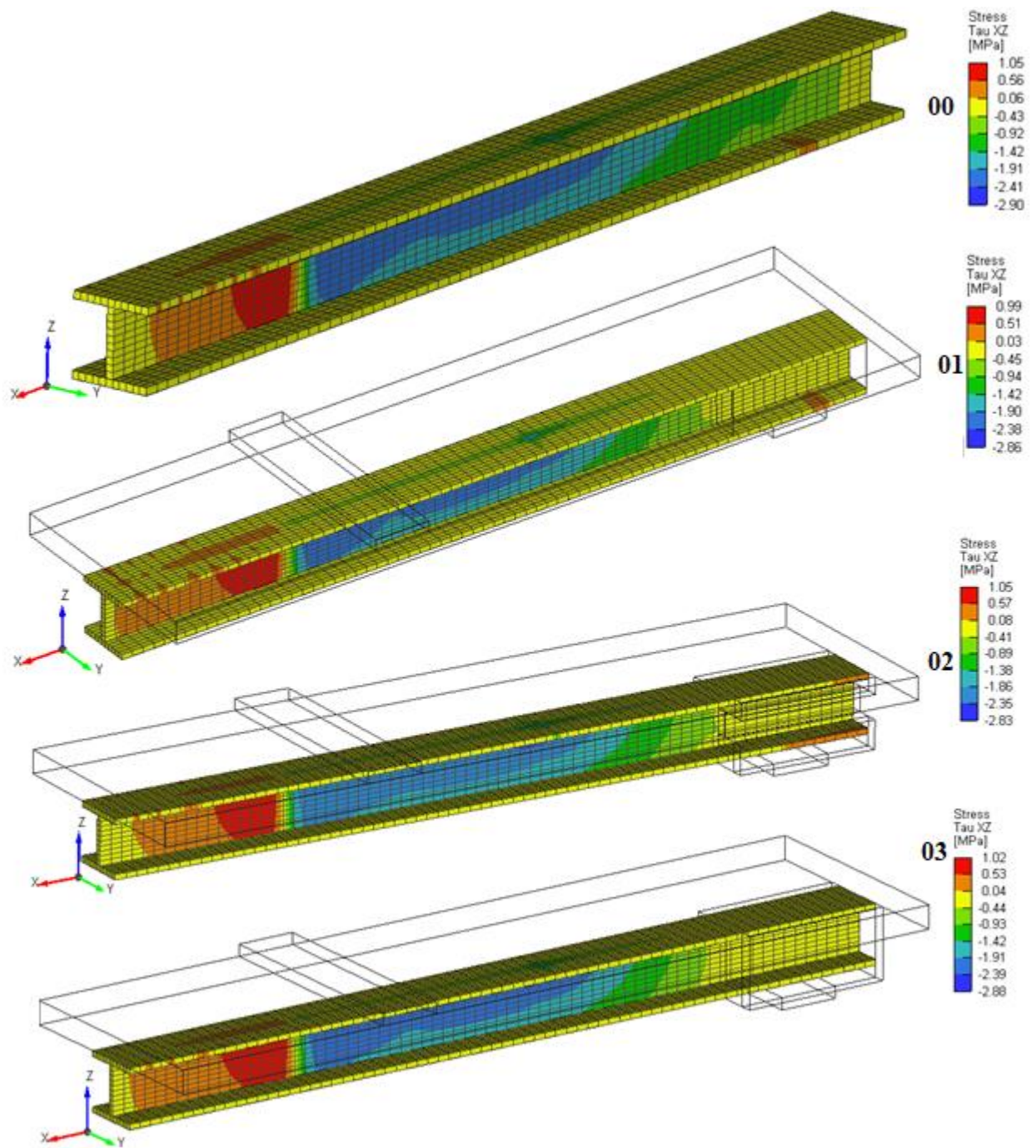
Vaizde iš šono galima lengviau palyginti atraminių mazgų modelių Von Mises'o įtempių pasiskirstymą betone. Pagal 4.15 pav. 02 ir 03 atraminių mazgų skerspjūvių modeliuose įtempių pasiskirstymas atramos zonoje yra gana panašus. 01 vaizde galima įžvelgti, kad įtempiai nuo atramos pasislenka link vidurio labiau nei kituose vaizduose. Taip pat matyti, kad ties jungtimi tarp GFRP profiliuotio ir betono įtempiai betone sumažėja, bet padidėja po jėgos pridėties tašku. Nors maksimalūs įtempiai labiausiai padidėjo 01 vaizde, bet labiausiai pasislinko nuo atramos zonos link vidurio. Beje, matomas nežymus įtempių padidėjimas ties 01 skerspjūvio kairiu kampu.

Skirtingai nei ankstesniuose vaizduose, 4.16 pav vizualiai galima matyti daugiau skirtumų tarp skaitinių modelių rezultatų GFRP profiliuotio ir betono paviršių sąlyčio vietoje. Pradinio modelio vaizde galima įžvelgti, kad sąsajos didžiausi tempimo įtempiai yra GFRP profiliuotio viršutinėje juostoje, ties perdangos viduriu bei matomas tam tikras įtempių padidėjimas zonoje tarp atramos ir jėgos pridėties taško. Skirtingai nei tempiamieji įtempiai, gniuždymo įtempiai pasiskirsto labiau koncentruotai ir ryškiai matomi ties jėgos pridėties tašku ir virš atramos. Jau 02 atraminio mazgo modelyje pasimato žymesni skirtumai. Atramos vietoje, kur tarpas profiliuotio viršutinės ir apatinės juostos yra užpildytas betonu, GFRP ir betono medžiagų sąlyčio vietoje gniuždomieji įtempiai labiau pasiskirsto ties juostos kraštais, skirtingai nei pradiniam modelyje, kur gniuždomieji įtempiai virš atramos buvo susikcentravę ties juostos viduriu. Nors 02 atraminio mazgo vaizde normaliniai įtempiai pasiskirsto tolygiau ir ties atrama sumažėja gniuždomieji įtempiai,

bet apkrovos pridėties vietoje gniuždomieji įtempiai padidėja beveik 3 kartus. Kaip ir 02, taip ir 03 vaizde gniuždomieji įtempiai virš atramos labiau pasiskirsto ties juostos kraštais. Tiek pradiniam tiek 01 ir 03 atraminių mazgų modeliuose gniuždomųjų normalinių įtempių reikšmės išlieka panašios, nežymiai kinta tik tempimo įtempių reikšmės 02 ir 03 atraminių mazgų modeliuose. Žymesnis pokytis jungties vietoje yra 01 vaizde: tempimo įtempiai padidėja apie 17 % lyginant su kitais modeliais.



4.16 pav. Normaliniai įtempiai jungtyje tarp GFRP profiliuotio ir betono: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjuvio atrama; 2) 02 skerspjuvio atrama; 3) 03 skerspjuvio atrama.



4.17 pav. Kompozitinės perdangos tangentiniai įtempiai: 0) pradinis modelis; 1) 01 skerspjūvio atrama; 2) 02 skerspjūvio atrama; 3) 03 skerspjūvio atrama.

Iš tangentinių įtempių pasiskirstymo XZ kryptimi (žr. 4.17 pav.), galime spręsti, kad atraminio mazgo sustiprinimas padeda sumažinti tangentinius įtempius GDRP profiliuotio sienelėje. Atraminių mazgų modelių atveju (žr. 4.17 pav. 01-03 vaizdai) tangentiniai įtempiai XZ kryptimi sumažėja beveik per pusę, lyginant su pradiniu modeliu (žr. 4.17 pav. 00 vaizdas). Atramos zonoje tolygiausiai tangentiniai įtempiai pasiskirsto 03 atraminiame mazge. 01 ir 02 skaitiniuose modeliuose pasireiškia tam tikros tangentinių įtempių koncentracijos: kaip ir pradiniam vaizde, 01 mazge tangentinių įtempių koncentracija pasireiškia profiliuotio apatinėje juostoje, ties plieninės atraminės

plokštelės kraštu; 02 mazge – profiliuotą atraminiam kraštą, viršutinėje ir apatinėje juostose. Mažiausi tangentiniai įtempiai XZ kryptimi GFRP profiliuotą sienelėje yra 01 atraminiam mazge, jie sumažėjo 6 % nuo pradinio modelio, o 03 atraminiam mazge sumažėjo 3 %.

Skyriaus išvados

Atlikus tempiamos stiklo pluoštu armuotos polimerinės plokštelės baigtinių elementų skaitinio modelio analizę ir palyginus su eksperimento, nagrinėto literatūroje, duomenimis, matoma, kad baigtinių elementų skaitinio modelio apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreivė sutampa su vieno iš bandinių tempimo eksperimento metu gauta apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreive. Tarp kreivių gauta paklaida yra apytiksliai 5 %. Paklaida galėjo atsirasti dėl GFRP medžiagos netiesinės elgsenos bei pluoštų skersine kryptimi neįvertinimo tempiamos plokštelės baigtinių elementų skaitiniame modelyje. Nors tempiamos plokštelės skaitinio modelio tamprumo modulio reikšmė ($E=32.87$ GPa) skiriasi 3 % nuo tempiamos plokštelės eksperimento, nagrinėto literatūroje, reprezentatyvaus bandinio tamprumo modulio, bet visiškai sutampa su GFRP profiliuotą 3 taškų lenkimo bandyme, aprašyto literatūroje, gauta tamprumo modulio reikšmė ($E=32.86$ GPa). Todėl šio skaitinio modelio duomenys taikomi kompozitinės GFRP profiliuotą ir betono perdangos skaitiniame baigtinių elementų modelyje.

Kompozitinės GFRP profiliuotą ir betono perdangos skaitinis baigtinių elementų modelio rezultatai buvo palyginti su literatūroje aprašytu kompozitinės perdangos 4 taškų lenkimo bandymu. Paklaida tarp šio skaitinio modelio ir minėto eksperimento apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreivių yra apie 10 %, todėl galima teigti, jog kompozitinės perdangos baigtinių elementų skaitinis modelis yra tinkamas tolimesniems tyrimams. Paklaidos galėjo atsirasti dėl medžiagų netiesinės elgsenos, stiklo pluoštų įvertinimo GFRP profiliuotyje tik išilgine kryptimi bei praslydimo tarp GFRP profiliuotą ir betono.

Tarpusavyje palyginus atraminių mazgus bei įvertinus jų įtaką pradiniam kompozitinės GFRP profiliuotą ir betono perdangos modeliui, galima daryti išvadą, kad efektyviausi atraminiai mazgai yra, kai tarpas tarp GFRP profiluotą viršutinės ir apatinės juostų yra užpildomas betonu ir kai GFRP profiliuotis yra įbetonuojamas į stačiakampę formą. Nors mazgo, kai tarpas tarp GFRP profiluotą viršutinės ir apatinės juostų yra užpildomas betonu, maksimalūs Von Mises'o įtempiai betone, apkrovos pridėjimo taške, padidėja 1,6 %, bet įtempių koncentracija nutolsta nuo atraminės zonos. Taip pat nuo pradinio skaitinio kompozitinės perdangos modelio GFRP profiliuotyje atramos zonoje tangentiniai įtempiai sumažėja dvigubai, o profiliuotą sienelėje ties apkrovos pridėjimo tašku – 6 %.

5 Galutinės išvados ir pasiūlymai

5.1 Išvados

Šiame darbe buvo nagrinėjamas kompozitinės betono ir polimerinių profiliuotųjų sijinio tilto perdangos segmentas. Kompozitinė perdanga susideda iš stiklo pluoštu armuotų polimerinių profiliuotųjų ir betoninio denginio. Atlikta literatūros apžvalga, konstrukcijos projektavimas tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį, eksperimentinio tyrimo analizė, pagal išnagrinėtų eksperimentų duomenis sudaryti tempiamos stiklo pluoštu armuotos polimerinės plokštelės bei kompozitinės stiklo pluoštu armuotų polimerinių profiliuotųjų ir betono perdangos skaitiniai modeliai, atlikta palyginamoji rezultatų analizė, sudaryti atraminių mazgų skaitiniai modeliai bei parinktas optimaliausias atraminio mazgo variantas pagal masę ir įtempius atraminėje zonoje.

Atlikus kompozitinės stiklo pluoštu armuoto polimerinio profiliuotą ir betono perdangos patikimumo skaičiavimą tikimybinio statistiniu metodu pagal tinkamumo ribinį būvį, nustatyta, kad didžiausią įtaką patikimumo koeficientui turėjo kintamoji apkrova Q ir betoninio denginio aukštis h_c . Padidinus denginio aukštį 2 kartus buvo pastebėtas akivaizdus tamprumo modulio E_c ir elemento ilgio L įtakos įlinkiui padidėjimas. Kintamosios apkrovos Q , kaip ir plokštės skerspjūvio aukščio h_c , procentas sumažėjo daugiau nei per pusę, lyginant su pradiniais skaičiavimais. Didinant kompozitinės perdangos betoninio denginio aukštį, didėja patikimumo rodiklis. Tokiu atveju įtaką gali daryti redukuotasis inercijos momentas. Dėl skaičiavimo supaprastinimo jis buvo redukuotas neįvertinus jungties tarp GFRP profiliuotą ir betoninės plokštės. Tikslesnis patikimumo skaičiavimas galėtų būti įvertinus praslydimą tarp betoninės plokštės ir profiliuotą.

Atlikus tempiamos stiklo pluoštu armuotos polimerinės plokštelės baigtinių elementų skaitinio modelio analizę ir palyginus su eksperimento, nagrinėto literatūroje, duomenimis, matoma, kad baigtinių elementų skaitinio modelio apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreivė sutampa su vieno iš bandinių tempimo eksperimento metu gauta apkrovos ir vertikalaus poslinkio kreive. Tarp kreivių gauta paklaida yra apytiksliai 5 %. Paklaida galėjo atsirasti dėl GFRP medžiagos netiesinės elgsenos bei pluoštų skersine kryptimi neįvertinimo tempiamos plokštelės baigtinių elementų skaitiniame modelyje. Reikėtų pabrėžti, kad tempiamos plokštelės skaitinio modelio tamprumo modulio reikšmė visiškai sutampa su GFRP profiliuotą 3 taškų lenkimo bandyme, aprašyto literatūroje, gauta tamprumo modulio reikšme. Todėl šio skaitinio modelio duomenys taikomi kompozitinės GFRP profiliuotą ir betono perdangos skaitiniame baigtinių elementų modelyje.

Kompozitinės GFRP profiliuotą ir betono perdangos skaitinis baigtinių elementų modelio rezultatai buvo palyginti su literatūroje aprašytu kompozitinės perdangos 4 taškų lenkimo

bandymu. Paklaida tarp šio skaitinio modelio ir minėto eksperimento apkrovos ir vertikalios poslinkio kreivių yra apie 10 %, todėl galima teigti, jog kompozitinės perdangos baigtinių elementų skaitinis modelis yra tinkamas tolimesniems tyrimams. Paklaidos galėjo atsirasti dėl medžiagų netiesinės elgsenos, stiklo pluoštų įvertinimo GFRP profiliuotyje tik išilgine kryptimi bei praslydimo tarp GFRP profiliuoties ir betono.

Patikrintas baigtinių elementų modelis buvo panaudotas kompozitinės perdangos atraminių mazgų modeliavimui baigtinių elementų programa. Pasirinkus atraminį mazgą, kai prie GFRP profiliuoties kraštinių yra pridamas 20 mm storio betono sluoksnis, kuris suformuoja dvitęjos formos mazgą aplink GFRP profiliuotį, atsirado papildomos įtempių koncentracijos profiliuotyje. Tarpusavyje palyginus atraminių mazgus bei įvertinus jų įtaką pradiniam kompozitinės GFRP profiliuoties ir betono perdangos modeliui, galima daryti išvadą, kad efektyviausi pagal įtempius atraminiai mazgai yra, kai tarpas tarp GFRP profiliuoties viršutinės ir apatinės juostų yra užpildomas betonu ir kai GFRP profiliuotis yra įbetonuojamas į stačiakampę formą. Atsižvelgus į atraminių mazgų masę ir įtempių pasiskirstymą kompozitinėje perdangoje, iš pastarųjų mazgų optimaliausias mazgas yra, kai tarpas tarp GFRP profiliuoties viršutinės ir apatinės juostų yra užpildomas betonu. Jo masė yra dvigubai mažesnė už mazgą, kai GFRP profiliuotis yra įbetonuojamas į stačiakampę formą. Taip pats jis padarė didžiausią įtaką tangentiniams įtempiams GFRP profiliuotyje: atramos zonoje tangentiniai įtempiai sumažėjo dvigubai nuo pradinio modelio, o ties viduriu, GFRP profiliuoties sienelėje – 6 %.

5.2 Pasiūlymai

Nagrinėto literatūroje kompozitinės GFRP profiliuoties ir betono perdangos 4 taškų lenkimo bandymo rezultatai rodo, kad tiek 1) jungties tarp GFRP profiliuoties ir betono suirimo, tiek 2) irties GFRP profiliuoties sienelėje atvejai gali būti kritiniai. Nors atliktoje skaitinėje analizėje buvo nagrinėjamas atraminio mazgos stiprinimas apibetonuojant GFRP profiliuotį, norint išvengti 2) suirimo atvejo, galimas ir kitoks stiprinimo būdas. Profiliuoties atsparumą šlyčiai galima patobulinti prie profiliuoties sienelės pridant stiklo pluošto plokšteles $\pm 45^\circ$ kampu (stengiantis nepakenkti tamprumo moduliui išilgine kryptimi). Taip pat galima panaudoti kito arba dvigubo skerspjūvio profiliuoties, pavyzdžiui, dvigubus „lovio“ skerspjūvio profiliuoties. Atraminuose mazguose, vietoje apibetonavimo, kaip sąstandas, tarp viršutinės ir apatinės profiliuoties juostų, iš abiejų pusių galima įterpti mažesnę GFRP profiliuotį.

Tam, kad būtų išvengta jungties tarp GFRP profiliuoties ir betono suirimo atvejo, galima panaudoti tam tikras jungtis, pavyzdžiui, varžtus. Kadangi GFRP profiliuoties forma gali būti įvairi, galima sukuti profiliuotį, kurio viršutinė juosta ar sienelė turėtų išsikišusias dalis, kurios galėtų būti

papildomų jungčių analogu, bet tuo pačiu būtų profiliuočio dalis. Reikėtų pabrėžti, kad reikalingi papildomi jungties tarp betono ir GFRP profiliuočio tyrimai, kuriuose būtų tiriami skirtingų dervų įtaka jungties stipriui. Galbūt derinti dervas su medžiagomis, sustiprinančiomis sukibimą tarp GFRP profiliuočio ir betono.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- American Concrete Institute. (2005). ACI 318-05. *Building code requirements for structural concrete*. USA, ACI committee 318.
- American Society for Testing and Materials. (1995). ASTM D 3039. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. Philadelphia, ASTM.
- Ascione L., Caron, J. F., Correia, J. R., De Corte, W., Godonou, P., Knippers, J., Moussiaux, E., Mottram, T., Oppe, M., Silvestre, N., Thorning, P., Trom, L. (2016). *Prospect for New Guidance in the Design of FRP Structures*. Ispra, European Composites Industry Association.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1982). NBR 7188. *Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). NBR 11578; 2001. *Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). NBR 14859-1. *Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 6118; 2003. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). NBR 8522. *Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão-deformação*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., et al. (2002). Fiberreinforced polymer composites for construction – state-of-the-art review. *Concrete Constructions Journal*, 6(2), 73–87.
- Balaguru, P. (1994). Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period. . *ACI Mater Journal*, 91(3), 280–288.
- Bank, L.C. (2006). *Composites for construction: structural design with FRP materials*. Hoboken, John Wiley & Sons.
- Deskovic, N., Triantafillou, T.C., Meier, U. (1995). Innovative design of FRP combined with concrete: short-term behavior. *Structural Engineering Journal*, 121(7), 1069–1078.
- Fiberline Composites A/S (2003). *The Fiberline Design Manual. 2nd edition*. Denmark, Fiberline Composites A/S.

- Kaw, A.K. (1997). *Mechanics of composite materials*. New York: CRC Press LLC.
- Kraai, P.P. (1985). A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. *Concrete Constructions Journal*, 30(9), 775–778.
- La Rovere, H.L., Santos Neto A.B.S. (2007). Composite slab concrete/FRP profiles: design for crosswalk deck applications. In: Fourth international conference on science and technology of composite materials. COMAT 2007, v. 03. Rio de Janeiro: Authentic Multimedia.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija (2003). STR 2.05.04:2003 *Poveikiai ir apkrovos*. Vilnius.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija (2003). STR 2.05.03:2003. *Statybinių konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas (2004). LST EN 1991-1-1:2004. *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-1 dalis. Bendrieji poveikiai. Tankiai, savasis svoris, pastatų naudojimo apkrovos*. Vilnius, LSD.
- Mendes, P.J.D., Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Taheri, M. (2011). Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck. *Composite structures Journal*, 93(11), 2969-2982.
- Santos Neto A. B. S., La Rovere H. L. (2007). Flexural stiffness characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. *Composite Structures Journal*, 81(2), 274–282.
- Santos Neto, A. B. S., La Rovere, H.L. (2010). Composite concrete/GFRP slabs for footbridge deck systems. *Composite structures Journal*, 92(10), 2554-2564.
- Santos Neto, A.B.S. (2006). *Development of a composite concrete/GFRP slab for footbridge deck systems*. Ph.D. dissertation. Florianópolis, Federal University of Santa Catarina, Civil Engineering Dept.
- Santos Neto, A.B.S., Pelisser, F., La Rovere, H.L., Pinto, R.C.A. (2005). *Influence of the addition of fibers in concrete on shrinkage cracking in thin slabs*. In: IV international ACI/CANMET conference on quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. Olinda.
- SAP 2000 PLUS. (1998). *Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures*. Berkeley: Computers and Structures, [6.13].

Williams, B.K. (2000). *The Development of GFRP Bridge Deck Modules*. Canada, The University of Manitoba faculty of graduate studies.