



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Evaldas Jurgelevičius

**EFEKTYVŪS GELŽBETONINIŲ LENKIAMŲ ELEMENTŲ
STIPRINIMO METODAI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
dr. Nerijus Meslinas

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas
Doc. dr. Mindaugas Augonis

EFEKTYVŪS GELŽBETONINIŲ LENKIAMŲ ELEMENTŲ
STIPRINIMO METODAI

Baigiamasis magistro projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (kodas 621H20001)

Vadovas

dr. Nerijus Meslinas

Recenzentas

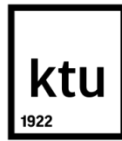
dr. Aušra Malatokienė

Projektą atliko

Evaldas Jurgelevičius

KAUNAS, 2018

Baigiamųjų projektų rengimo,
gynimo ir saugojimo tvarkos aprašo
4 priedas



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros

(Fakultetas)

Evaldas Jurgelevičius

(Studento vardas, pavardė)

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija 621H20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Mišrių komunalinių atliekų mechaninio apdorojimo gamybos paskirties pastato Utenos raj.
laikančiosios konstrukcijos“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. sausio 05 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Evaldo Jurgelevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Efektyvūs gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo metodai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis projektas

EFEKTYVŪS GELŽBETONINIŲ LENKIAMŲ ELEMENTŲ STIPRINIMO METODAI

Evaldas Jurgelevičius

Magistro darbe apžvelgiami gelžbetoninių elementų stiprinimo būdai ir pasirenkamas vienas konkretus būdas. Atlikta pasirinkto stiprinimo metodo analizė, pateikiami atliktų tyrimų rezultatai, atliekami skaičiavimai pagal pasirinktas metodikas bei atliekamas ekonominis palyginimas.

Darbą sudaro: įvadas, penki pagrindiniai skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Įvade trumpai aptariama tiriamą problemą, formuluojami tikslai ir uždaviniai, darbo naujumas ir aktualumas. Pirmame skyriuje apžvelgiami sijų stiprinimo metodai bei pasirenkamas vienas konkretus metodas ir detaliau apžvelgiamas. Antrame skyriuje atliekama pasirinkto stiprinimo metodo atliktų tyrimų analizė, pateikiami gauti rezultatai bei priimtose išvados. Trečiame skyriuje pateikiamos trys galimos skaičiavimo metodikos ir aptariami jų principai. Ketvirtajame skyriuje atliekami skaičiavimai pagal dvi pasirinktas skirtingas metodikas, palyginami gauti rezultatai ir skaičiavimo skirtumai. Penktajame skyriuje atliekamas ekonominis palyginimas, kuriame lyginama sijų stiprinimo ir sijų keitimo kaštai. Darbo pabaigoje pateikiamos bendros darbo išvados.

Darbo apimtis 61 puslapis ir vienas brėžinys.

Raktiniai žodžiai:

Gelžbetoninės konstrukcijos, anglies pluošto kompozitas, laikomoji galia, epoksidiniai klijai, jungtis

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

Master Thesis Project

EFFECTIVE STRENGTHENING METHODS OF BENDING REINFORCED CONCRETE
ELEMENTS

Evaldas Jurgelevičius

Master's thesis gives a review of methods of strengthening reinforced concrete elements and one particular method is chosen. After choosing one particular method, the analysis of the chosen strengthening method is performed, received results are shown, calculations according to chosen method are done and economic comparison is made.

Thesis consists of introduction, five main chapters, conclusions and a list of literature. Introduction gives a brief look about the problem under consideration, formulates goals and objectives, discuss novelty and relevance of work. First chapter gives an overview of the beams enhancement techniques and one particular method is chosen and precisely reviewed. Second chapter involves analysis of the research according to the selected strengthening method, subsequently, received results and accepted conclusions are presented. Third chapter gives three possible calculation methods and discusses their principles. Fourth chapter includes calculations according to two chosen methods, afterwards, received results and differences of calculations are compared. Fifth chapter gives economic comparison by comparing the costs of the beams strengthening and of beams replacement. At the end of the thesis general conclusions of work are presented.

Thesis consist of 61 pages and one drawing.

Keywords:

Reinforced concrete construction, carbon fiber composite, load bearing capacity, epoxy adhesives, rigid connection

Turinys

Įvadas	8
Nagrinėjama problema	8
Darbo aktualumas.....	8
Darbo objektas.....	8
Darbo tikslas.....	8
Uždaviniai	9
Tyrimų metodika/taikomi tyrimų metodai	9
Laukiami rezultatai.....	9
Darbo struktūra.....	9
1. Literatūros analizė	9
1.1. Konstrukcijų stiprinimo metodai	9
1.1.1. Stiprinimas padidinant skerspjūvį	10
1.1.2. Stiprinimas plieniniu lakštu.....	11
1.1.3. Stiprinimas plieniniais profilioočiais	12
1.1.4. Stiprinimas priklijuojama anglies arba stiklo pluoštu armuota juosta	12
1.1.5. Stiprinimas mechaniškai tvirtinama anglies arba stiklo pluoštu armuota juosta	13
1.2. Statybinių konstrukcijų stiprinimas anglies pluoštu	14
1.3. Anglies pluošto kompozito privalumai ir trūkumai stiprinant gelžbetonines konstrukcijas.....	16
1.4. Anglies pluošto kompozito naudojimas	17
1.5. Betono ir anglies pluošto jungties darbas esant ilgalaikėms apkrovoms.....	19
1.6. Pirmojo skyriaus išvados	21
2. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų lenkiamų gelžbetoninių elementų tyrimai	22
2.1. Anglies pluošto su betonu jungties vertinimas	27
2.2. Antrojo skyriaus išvados	30
3. Lenkiamų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimas.....	32
3.1. Sudėtinių strypų teorijos skaičiavimo metodas	32
3.2. Skaičiavimo metodas paremtas ACI 440.2R-08 ir FIB biulletin 14 rekomendacijomis	34
3.3. Girhammaro metodas	37
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	38
4. Gelžbetoninės lenkiamos sijos elgsenos tyrimas	39
4.1. Skaičiuojama šalutinė sija, kuri bus padedama ant kolonų ir bus naudojama kaip perdanga, laikanti konstrukciją	39
4.2. Sudėtinių strypų teorijos skaičiavimo metodas	44
4.3. Skaičiavimai atliekami vadovaujantis ACI 440.2R-08	46
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	51

5. Ekonominis palyginimas	52
5.1. Penktojo skyriaus išvados.....	57
Išvados.....	58
Literatūra ir šaltiniai	59

Įvadas

Šio magistro baigiamojo darbo tema yra „Efektyvūs gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo metodai“. Šios temos pagrindinis tikslas – įsigilinti į visus įmanomus gelžbetoninių elementų stiprinimo būdus ir išsirinkti vieną konkretų būdą bei jį kuo detaliau išanalizuoti.

Pasirinkus vieną konkretų stiprinimo metodą surinkti visą informaciją apie jau atliktus tyrimus, juos kuo detaliau išanalizuoti, sudėlioti visų tyrimų rezultatus. Išanalizavus tyrimų rezultatus atliekami skaičiavimai bei sukuriamas modelis. Pabaigoje atliekama analizė, pateikiamos išvados, kurios atspindi temos aktualumą bei svarbiausius uždavinius.

Nagrinėjama problema

Laikui bėgant senuose gelžbetoniniuose statiniuose atsiranda pažeidų, kurias reikia pašalinti arba kurių plitimą reikia sustabdyti. Dažniausiai tokių pažeistų konstrukcijų tvarkymas yra elemento pakeitimas arba stiprinimas. Konstrukcijų keitimas dažnai brangiai kainuoja arba yra neįmanomas. Dėl šių priežasčių tenka rinktis konstrukcijų stiprinimą. Tradiciniai stiprinimo būdai yra betono apvalkalai arba papildomi plieniniai elementai. Tačiau šie stiprinimo metodai nėra visada tinkami, dėl to tenka ieškoti naujų stiprinimo metodikų. Vienas iš tokių stiprinimo metodų yra elementų stiprinimas anglies pluoštu. Šis metodas turi daug privalumų, lyginant su kitais stiprinimo metodais.

Darbo aktualumas

Konstrukcijų stiprinimas anglies pluoštu, lyginant su kitais metodais, yra greičiausias. Kadangi šis metodas yra ganėtinai naujas, tai turimos informacijos kiekis dar yra ribotas. Nėra tiksliai nustatyta, kokie veiksniai vyksta, kas konkrečiai lemia jungties tarp betono ir anglies pluošto stiprumą. Konkretūs projektavimo metodai, kuriuos taikant būtų galima suprojektuoti efektyvią sustiprintą konstrukciją, vis dar yra kuriami arba tobulinami, kad būtų galima kuo efektyviau sustiprinti konstrukcijas.

Darbo objektas

Išorine anglies pluošto juosta sustiprinti gelžbetoniniai lenkiami elementai.

Darbo tikslas

Atlikti gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo būdų analizę.

Uždaviniai

Nustatyti gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo priežastis ir reikalavimus.

Atlikti gelžbetoninių elementų stiprinimo būdų analizę. Nustatyti stiprinimo būdų privalumus ir trūkumus. Pagal pasirinktus kriterijus pasirinkti konkretų stiprinimo būdą.

Atlikti sustiprintų gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprumo skaičiavimo metodikų apžvalgą.

Parinkti gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo metodiką, atlikti skaičiavimus ir palyginti gautus rezultatus.

Tyrimų metodika/taikomi tyrimų metodai

Analitinis ir skaitinis modeliavimas, gautų rezultatų palyginimas.

Laukiami rezultatai

Pasirinkto gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo būdo pagrindimas, matematinio ir skaitinio modelių sukūrimas. Gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas. Skaičiavimo metodikos tikslinimas.

Darbo struktūra

Darbą sudaro įvadas, penki pagrindiniai skyriai, išvados ir naudotos literatūros šaltinių sąrašas. Iš viso darbą sudaro 61 puslapis.

1. Literatūros analizė

1.1. Konstrukcijų stiprinimo metodai

Tinkama pastatų priežiūra yra svarbi siekiant užtikrinti ilgą pastatų eksploatavimą ir gerą išvaizdą. Laikui bėgant gelžbetoniniuose elementuose susidaro pažeidimai, nusidėvėjimai, kuriuos reikia pašalinti arba kurių plitimą reikia sustabdyti. Tokie pažeidimai, nusidėvėjimai atsiranda dėl netinkamos eksploatacijos ar kenksmingos aplinkos. Dažnai tokią pažeistą konstrukciją reikia pakeisti nauja arba sustiprinti. Poreikis pakeisti ar stiprinti kurią nors konstrukciją gali atsirasti ne tik dėl elemento pažeidimų, bet ir dėl pakeistos pastato paskirties. Dažnai elemento keitimas brangiai kainuoja ir ilgai užtrunka bei reikalauja didelių kaštų, todėl kaip alternatyva dažniausiai yra pasirenkamas konstrukcijos stiprinimas. Egzistuoja keletas būdų padidinti gelžbetoninio elemento laikomąją galią. Svarbiausia rasti patį tinkamiausią stiprinimo metodą pastatui, o norint tai padaryti, reikia atsižvelgti į daug faktorių:

- kiek reikia padidinti laikomąją galią;
- pastato skaičiuojamosios schemos pakitimai sustiprinus elementą;
- kokios esamos aplinkos sąlygos;
- kokia konstrukcijų būklė stiprinimo darbų metu (prasta betono paviršiaus būklė pastate gali būti priežastis, neleidžianti pasirinkti stiprinimo metodų, kai prie betono yra klijuojama stiprinančioji medžiaga.);
- kokie gabarito reikalavimai (sustiprinus konstrukciją, ji negali tapti per didelė);
- ar konstrukcija yra patogiausiai pasiekama (jei konstrukciją sunku pasiekti, priėjimas prie jos ribotas, gali nebetikti metodai, kuriems įgyvendinti naudojamos didelių matmenų detalės);
- kokia numatoma darbų atlikimo kaina;
- koks darbų atlikimo terminas.

1.1.1. Stiprinimas padidinant skerspjūvį

Vienas iš populiariausių ir seniausių būdų sustiprinti gelžbetoninę konstrukciją yra jos skerspjūvio padidinimas. Esamoje konstrukcijoje išgręžiamos skylės, į jas įstatomi inkariniai strypai, o aplink strypus injektuojamas specialus betono mišinys. Priklausomai nuo pasirinkto stiprinimo varianto, aplink esamą konstrukciją padaromas armatūros strypynas. Pasitaiko, kad kartu su strypyno konstravimu montuojami klojiniai. Pastačius klojinius, betonuojama (betonavimas dažnai vyksta keliais etapais). Toks konstrukcijos stiprinimas trunka nemažai laiko, tačiau jam reikalingos gana pigios medžiagos. Šis metodas pasirenkamas, kai yra daug stiprinamų elementų.

Dar vienas galimas variantas padidinti gelžbetoninio elemento skerspjūvį – naudoti gamykloje pagamintus gelžbetoninius antdėklus su skylėmis [Demir, Tekin 2011]. Konstrukcijoje esančiame elemente išgręžiamos skylės, kurios atitinka skylės antdėkle. Abu elementai sugretinami ir įstatomi inkariniai strypai. Vėliau aplink strypus injektuojamas specialus betono mišinys. Šis variantas yra greitesnis už anksčiau aptartą, nes nereikia laukti, kol sukietės betonas, o injektuojamasis mišinys stingsta daug greičiau nei paprastas betonas. Tokio stiprinimo trūkumas yra tai, kad skirtingų antdėklų gamyba kiekvienam elementui yra neracionali. Šis metodas naudojamas, kai visi stiprinami elementai yra vienodi.

Demiras ir Tekinas (Demir, Tekin 2011) atliko eksperimentinius tyrimus su iš anksto gamykloje pagamintais papildomais gelžbetoniniais elementais sustiprintomis sijomis. Sijos buvo stiprinamos naudojant dviejų rūšių stiprinančius elementus: stačiakampio ir U formos skerspjūvio. Stačiakampio formos elementas buvo tvirtinamas prie stiprinamos sijos apačios, o

U formos elementas – prie stiprinamos sijos apačios ir šonų. Bandiniai buvo bandomi iki suirimo. Sijų, sustiprintų stačiakampio skerspjūvio elementu, laikomoji galia padidėjo iki 41 %, o U formos skerspjūvio elementu sustiprintų sijų laikomoji galia padidėjo iki 76 % [3].

Stiprinimo metodai, kuomet yra didinamas gelžbetonio elemento skerspjūvio plotas, dažniausiai naudojami ne pažeistoms konstrukcijoms stiprinti, o rekonstruojant pastatus, kai ketinama padidinti apkrovas jau esančioms konstrukcijoms. Vykdam tokius darbus dažniausiai neapsiribojama tik konstrukcijų stiprinimu: pastatas yra plečiamas, didinamas aukštų skaičius, keičiami planiniai sprendiniai, betonuojamos naujos konstrukcijos. Šiame procese konstrukcijų stiprinimas nėra ilgiausiai trunkanti dalis, be to, visa reikalinga technika yra statybvietėje.

1.1.2. Stiprinimas plieniniu lakštu

XX a. septintajame dešimtmetyje pradėtas naudoti lenkiamų konstrukcijų stiprinimo metodas – plieninio lakšto priklijavimas prie sijos apačios epoksidine derva (Swamy *et al.* 1987, 1989; Barnes *et al.* 2001; Sevuk *et al.* 2005; Adhikary ir Mutsuyoshi 2006; Arslan *et al.* 2008; Su *et al.* 2010). Prieš klijuojant, betono paviršius paruošiamas: nušveičiamas, nuvalomas ir gruntuojamas. Abu paviršius ištepamas kuo plonesniu dervos sluoksniu, plieninė juosta lipdoma prie betono ir fiksuojama, kol derva sukietės. Galuose juosta tvirtinama papildomais varžtais, kad būtų pagerintas juostos galų inkaravimas ir kad juosta nenukristų sudegus dervai gaisro metu. Tokiu būdu sustiprinus siją, padidėja jos laikomoji galia ir standumas, tačiau išskyla staigios irties pavojus (konstrukcija stipriai perarmuojama). Prieš sijai suyrant, nepastebimi dideli įlinkiai. Šitaip sustiprintos sijos laikomoji galia padidėja 10 – 15 % [3].

Stiprinimo metodas plieniniu lakštu dažniausiai naudojamas pastatų ir tiltų konstrukcijų stiprinimui. Šis būdas ganėtinai patogus, tačiau turi ir trūkumų, kurie susiję su tuo, kad naudojama stiprinančioji medžiaga – plienas. Plieninės detalės pasižymi didele mase, lengvai paveikiamos korozijos ir yra ribotų gabaritų, todėl būtina įrengti jungtis. Taikant šį metodą, būtina stiprinančiosios juostos galuose įrengti papildomus inkarinius varžtus, kurie sumažina irties staigumą ir apsaugo žmones ar jų turtą avarijų atveju. Varžtai laiko plieninę juostą, pritvirtintą prie sijos, net jei klijų sluoksnis yra pažeistas.

Jumaatas ir Alamas (Jumaat ir Alam 2007) atliko eksperimentinius tyrimus su sijomis, sustiprintomis priklijuotomis plieninėmis juostomis. Plieninės juostos prie sijų buvo klijuojamos epoksidine derva, o galuose papildomai tvirtinamos inkarais. Sijų laikomoji galia padidėjo iki 56 % (lyginant su kontroline, nesustiprinta sija). Sijų standumas taip pat padidėjo. Sustiprintos sijos įlinkis buvo 37 % mažesnis nei kontrolinės sijos [3].

1.1.3. Stiprinimas plieniniais profiliuočiais

Lenkiami gelžbetoniniai elementai taip pat dažnai stiprinami prie jų prijungiant plieninius profiliuočius. Taikant šį būdą detalės jungiamos varžtais. Vienas varžto galas inkaruojamas betone, o kitas yra srieginis. Galimas ir toks variantas, kai abiejuose varžto galuose yra sriegis, o varžtas pereina kiaurai per gelžbetoninį elementą. Abiem atvejais, įstačius varžtus į skylės, jos injektuojamos. Taip sujungti gelžbetoniniai ir plieniniai elementai nedirba visiškai kartu, nes varžtinėse jungtyse galimas praslydimas, be to, patys varžtai gali deformuotis. Labai sunku vertinti, kokią apkrovos dalį perima plieniniai profilioočiai – dažniausiai jie parenkami su didesne atsarga nei reikia, dėl to šis stiprinimo būdas yra neekonomiškas. Jis naudojamas tik pavieniams elementams stiprinti.

1.1.4. Stiprinimas priklijuojama anglies arba stiklo pluoštu armuota juosta

XX a. devintajame dešimtmetyje statybose pradėtas taikyti stiprinimo metodas naudojant armuotą polimero juostą (El-Mihilmy, Tedesco 2000; Buyukozturk, Karaca 2002; Eshwar *et al.* 2004; Lu *et al.* 2005; Pham *et al.* 2006; De Lorenzis, Teng 2007; Ozcan *et al.* 2009). Šiuo būdu galima stiprinti daugelį gelžbetoninių elementų, pvz.: kolonas, sijas, perdangas, sienas. Sustiprinus elementą armuota polimero juosta, galima padidinti jo lenkiamąją, šlyjamąją ir sukamąją laikomąją galią bei elemento standumą. Bonaccio ir Maalejaus (2001) darbas rodo, kad trečdalis sustiprintų sijų laikomoji galia padidėja 50 % ir daugiau, sijų standumas taip pat labai padidėja. Pannirselvamas ir kiti autoriai (Pannirselvam *et al.* 2009) atliko eksperimentinius tyrimus su įvairaus tipo stiklo pluoštu armuotomis polimerinėmis juostomis. Tyrimo metu išbandytos sijos sustiprintos prie jų klijuojant stiklo pluošto demblį, stiklo pluošto audinį, viena kryptimi orientuotą stiklo pluoštą ir stiklo pluošto demblio bei audinio mišinį. Sijų laikomoji galia, stiprinant jas stiklo pluošto dembliu, padidėjo iki 7 %, stiprinant stiklo pluošto audiniu – iki 43 %, stiprinant viena kryptimi orientuotu stiklo pluoštu – iki 71 %, o stiprinant stiklo pluošto demblio bei audinio mišiniu – iki 85 % [3].

Lyginant su kitais stiprinimo metodais, stiprinimas pluoštu armuotu polimeru turi daug privalumų. Pluoštu armuotos medžiagos pasižymi didesniu stipriu ir mažesniu tankiu nei plienas. Teisingai išnaudojant šias savybes, pluoštu armuoti elementai įgauna gerokai didesnę stiprio ir svorio santykį nei plienas, todėl konstrukcijos stiprinimas tampa gerokai paprastesnis ir greitesnis. Šis stiprinimo būdas pasirenkamas, kai yra sunkiai prieinamos vietos, nes prieš montavimą pluoštu armuotas polimeras yra labai lankstus, o jeigu prie konstrukcijos klijuojamas audinys, o ne iš anksto pagaminta juosta, galima sustiprinti netgi labai sunkiai

pasiekiamas vietas. Kadangi medžiaga yra ganėtinai lengva, tai galima atsisakyti kėlimo technikos, kuri būtų reikalinga naudojant plieną. Nereikia varžtų, naudojamų laikinam detalių tvirtinimui, kol klėjai sustings. Kadangi nereikia varžtų, nereikia ir skylių jiems, nekyla grėsmė gręžiant pažeisti gelžbetonyje esančią armatūrą. Audiniu arba pluoštu armuotų polimerų juostos būna ganėtinai ilgos, todėl nereikia įrengti papildomų jungčių. Kai konstrukcijos forma sudėtinga, audinys prie jos klijuojamas. Jis lengvai atkartoja konstrukcijos išlinkius, vietos su aštriomis briaunomis taip pat nesukelia problemų. Priklijavus armuotą polimerą prie konstrukcijos, jos matmenys pasikeičia labai mažai, todėl, atlikus apdailos darbus, pokyčių nesimato. Sustiprinta konstrukcija praktiškai nereikalauja priežiūros, o ją pažeidus mechaniškai, remontas yra labai paprastas. Įvertinus visus šiuos privalumus, konstrukcijos stiprinimas armuotu polimeru yra gerokai paprastesnis ir spartesnis procesas, be to, reikalauja mažiau techninės įrangos, negu konstrukcijų stiprinimas plienine juosta.

Konstrukcijų stiprinimas armuotais polimerais turi ir trūkumų. Pagrindinis trūkumas yra ganėtinai mažas atsparumas ugniai. Sustiprintą konstrukciją reikia papildomai apsaugoti nuo ugnies poveikio. Kitas trūkumas yra tai, kad beveik nėra projektavimo normų, reglamentuojančių, kaip projektuoti tokiu būdu sustiprintas konstrukcijas. Šis stiprinimo metodas naujas, todėl patirties sukaupta nedaug, o kvalifikuotų darbininkų mažai. Medžiagos, naudojamos taikant šį stiprinimo metodą, yra labai brangios. Norint išvelgti ekonominę naudą, reikia įvertinti daug veiksnių. Šis stiprinimo būdas reikalauja ilgo pasiruošimo. Betono paviršių, prieš klijuojant polimero juosta, reikia paruošti, nušveisti ir kruopščiai nuvalyti.

1.1.5. Stiprinimas mechaniškai tvirtinama anglies arba stiklo pluoštu armuota juosta

Siekiant dar labiau sumažinti darbų trukmę ir darbininkų kvalifikacijos poreikį, pradėtas plėtoti metodas – iš anksto pagamintą armuotą polimero juosta mechaniškai tvirtinti prie gelžbetoninės sijos (Lamana *et al.* 2001; Lamana 2002; Bank 2004). Armuota polimero juosta, kurioje iš anksto yra padaromos skylės, yra prikniedijamos prie sijos, naudojant specialų montavimo pistoletą. Tvirtinant juosta šiuo metodu sutaupoma daug laiko, nes visiškai nereikia paruošti betono paviršiaus, o konstrukcija gali būti naudojama iškart po to, kai baigiami juostos tvirtinimo darbai – nereikia laukti, kol klėjai sukietės. Labai didelis šio metodo privalumas yra kur kas lengviau prognozuojamas suirimo pobūdis. Jeigu polimerinė juosta nepažeista, konstrukcija suyra tvirtinimo varžtams išglemžus betoną juostos galuose arba varžtams po truputį išsitraukiant iš betono. Esant šiems ir ties atvejams, prieš sijos suirimą, pastebimas didelis įlinkis [3].

Lamana ir kt. atliko sijų, sustiprintų mechaniškai tvirtinama kompozitive juosta, tyrimus (Lamana 2002). Tyrimų metu išbandytos nedidelės sijos, pagamintos iš skirtingo stiprio betono. Sijų armavimo procentas buvo kintamas. Atliekant tyrimą taip pat išbandytos tokios pat sijos, sustiprintos priklijuotu anglies pluoštu. Sijų, pagamintų iš betono, kurio stipris 20 MPa, bandymų rezultatai rodo, kad jų laikomoji galia padidėja nuo 16 % iki 30 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Šių sijų stiprinimas priklijuojant anglies pluoštą buvo 33 % efektyvesnis, nei stiprinimas mechaniškai tvirtinama anglies pluošto juosta. Bandant sijas, pagamintas iš 40 MPa stiprio betono, pastebėtas mažesnis mechaniškai tvirtinamos kompozitinės juostos stiprinimo sistemos efektyvumas. Šių sijų laikomoji galia padidėjo nuo 10 % iki 20 %. Nepaisant to, kokio stiprio betonas panaudotas sijoms gaminti, visos sijos iro lėtai, buvo pastebimi dideli įlinkiai. Šių tyrimų metu, tvirtinant juostą prie betono, skylės į betoną nebuvo gręžiamos.

Bankas (Bank 2004) atliko didesnių sustiprintų sijų bandymus. Šių bandymų metu kompozitinė juosta buvo tvirtinama prie betono, kuriame prieš tai buvo išgręžtos skylės. Didesnių sijų bandymo rezultatai rodo, kad sustiprintų sijų laikomoji galia padidėjo nuo 13,8 % iki 20,1 %. Tų pačių tyrimų metu išbandytas stiprinimo sistemos patobulinimas, kai juostos galuose įsukami inkariniai varžtai. Šių bandymų rezultatai rodo, kad sijų laikomoji galia padidėjo nuo 52 % iki 70 %, lyginant su kontroline sija.

Lyginant du stiprinimo variantus, kai skylės į betoną negręžiamos ir kai gręžiamos, matyti, kad stiprinimo sistemos efektyvumas beveik nepriklauso nuo to, ar prieš tvirtinant juostą prie betono jame buvo išgręžtos skylės.

1.2. Statybinių konstrukcijų stiprinimas anglies pluoštu

Gelžbetoninių konstrukcijų ilgalaikiškumas agresyvioiose aplinkose gali sumažėti iki 7–10 kartų, todėl racionalu vietoj plieninės strypinės armatūros naudoti kompozitinę armatūrą: stiklo plastiko, bazalto plastiko, anglies plastiko. Naudojant kompozitinę armatūrą galima sumažinti stiprinamos konstrukcijos skerspjūvį, nes nereikalingi dideli apsauginiai sluoksniai, taip pat nėra aktualūs pleišėtumų reikalavimai [*Michailov 1990*].

Anglies pluošto kompozito elementas būna sudarytas iš dviejų medžiagų: anglies pluošto ir epoksidinės dervos (matricos). Priklausomai nuo to, kokios konkrečiai konstrukcijos stiprinamos, priklauso ir pasirenkamas anglies pluošto kompozito tipas. Anglies pluoštas gali būti iš anksto impregnuotas epoksidine derva ir gali būti tik atskiros anglies pluošto juostos, kurios klijuojant atskirai impregnuojamos epoksidine derva. Naudojant iš anksto impregnuotas anglies pluošto juostas dažniausiai stiprinamos didelio tarpatramio sijos. Ypač jeigu stiprinama

įtemptu anglies pluoštu. Pagrindinė kompozito armuojamoji medžiaga yra anglies pluoštas. Todėl naudojant šį kompozitinį lakštą reikėtų atkreipti dėmesį į armavimo anglies pluoštu procentą, nes nuo jo kiekio priklauso elemento tempiamasis stipris. Atskiromis anglies pluošto juostomis dažniausiai stiprinamos apvalios arba stačiakampės formos konstrukcijos.

Stiprinant lenkiamuosius elementus siekiama, kad pluošto kompozitas perimtų dalį tempimo įtempių. Didesniam stiprinimo efektui pasiekti galima naudoti iš anksto įtemptą anglies pluošto kompozitą ir sumažinti tempiamosios plieninės strypinės armatūros įtempius. Kompozitinis sluoksnis, perimdamas tempimo įtempius, sukelia šlyties deformacijas tempiamame betone. Todėl kyla pavojus, kad kompozitinis sluoksnis gali atplyšti nuo betono paviršiaus, net nepadidinus konstrukcijos laikomosios galios. Norint padidinti konstrukcijos sustiprinimo efektyvumą anglies pluošto kompozitu, kuriami ir tiriama įvairūs pluošto inkaravimo metodai [19]. Papildomai inkaravus anglies pluošto kompozito juostas, padidėja sijų laikomoji galia ir pasikeičia suirimo pobūdis.

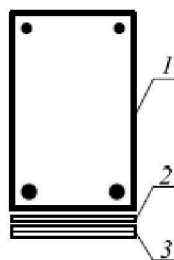
Stiprinant gniuždomuosius elementus dažniausiai siekiama suvaržyti skersines deformacijas, sukuriant išorinį anglies pluošto kompozitinį apvaskalą. Stiprumo prieaugis labiausiai priklauso nuo betono stiprio. Esant labai dideliame betono gniuždomajam stipriui šis prieaugis gali siekti iki 50 % [28].

Kolonų ir sijų sandūros dažniausiai stiprinamos dėl sumažėjusio mazgo standumo. Dažniausiai tokių pažeidimų atsiranda seismiškai aktyviose pasaulio vietose. Todėl atliekami tyrimai su dinamine apkrova, norint iširti anglies pluošto kompozito įtaką konstrukcijos nuovargiui [*Triantafillou 2001*].

Anglies pluošto juostos lengvai pritaikomos konstrukcijoms stiprinti, nes nereikalauja daug techninės įrangos. Naudojamos juostos gali būti nepertraukiamos, dėl to yra sumažinamas sandūrų skaičius [*Meier 2000*], todėl dažniausiai šiuo metodu stiprinamos didelio tarpatramio konstrukcijos. JAV, Japonijoje, Kanadoje, Rusijoje, Europos Sąjungoje kuriamos projektavimo rekomendacijos, skirtos konstrukcijoms stiprinti anglies pluošto kompozitu. Mokslinių tyrimų centruose „EMPA“, „QuakeWrap“, „PMI“ kuriamos ir tobulinamos techninės pluošto naudojimo priemonės bei projektavimo rekomendacijos. Moksliniame institute NYYŽB (Rusija) jau 1978 m. buvo kuriama skaičiavimo metodika, skirta betoninėms konstrukcijoms, armuotoms kompozitine armatūra [*Michailov 1990*].

Konstrukcijoms, sustiprintoms kompozitinėmis medžiagomis, didelę įtaką turi betono ir kompozito jungtis. Tyrimais nustatyta, kad konstrukcijai suyrant dažniausiai anglies pluošto kompozitas nepasiekia savo ribinės deformacijos. Kompozitas, perimdamas tempimo įtempius, sąlyčio su betonu vietoje sukelia šlyties deformacijas, galinčias pakeisti konstrukcijos elgseną.

Gelžbetoninės sijos, sustiprintos anglies pluošto kompozitu, skerspjūvį pagal sluoksnius galima suskirstyti kaip parodyta 1.1 paveiksle [33].



1.1 pav. Sustiprintos gelžbetoninės sijos skerspjūvio skirstymas pagal atskirus elementus: 1 – gelžbetoninis elementas; 2 – epoksidinio glaisto ir klijų sluoksnis; 3 – kompozitinis (anglies pluoštu armuoto polimero) sluoksnis

Kiekvieną iš šių sluoksnių konstrukcijos darbo metu veikia apkrova, temperatūra, drėgmė, agresyvioji aplinka. Sluoksnių reakcija į minėtus poveikius sukelia skirtingo pobūdžio deformacijas ir daro poveikį bendram konstrukcijos darbui. Todėl toliau aptariamas kiekvieno sluoksnio darbas veikiant ilgalaikiai apkrovai esant skirtingam apkrovos, drėgmės, temperatūros poveikiui. Pagal charakteringus tyrimus, atliekamus tam tikriems veiksniams ir parametrams, darantiems įtaką sijos laikomajai galiai, nustatyti, galima išskirti: anglies pluošto kompozito medžiagų tyrimus, betono ir kompozito kontakto šlyties tyrimus, sustiprintu sijų laikomosios galios ir elgsenos tyrimus [28].

1.3. Anglies pluošto kompozito privalumai ir trūkumai stiprinant gelžbetonines konstrukcijas

Vienas iš stiprinimo būdų yra konstrukcijas stiprinti išorine anglies pluošto armatūra. Šis stiprinimo metodas pradėtas taikyti gan neseniai ir yra plačiai paplitęs visame pasaulyje.

Konstrukcijų stiprinimo anglies pluoštu būdai yra:

- išorinio anglies pluošto priklijavimas tempiamoje zonoje, siekiant padidinti laikomąją galią sijose ir perdangose;
- išorinio anglies pluošto klijavimas sijų šonuose, siekiant padidinti įstrižojo pjūvio laikomąją galią;
- gniuždomųjų elementų laikomosios galios padidinimas, apvyniojant juos išoriniu anglies pluoštu visu perimetru.

Stiprinimui naudojant anglies pluošto metodą pranašumą, lyginant su tradiciniu stiprinimu plieniniais elementais, lemia [Hollaway, leeming 2000; TR55 2000; Van Den

Einde et al 2003; GangaRao et al 2007; Balaguru et al 2008; Bakis et all 2002] šios priežastys:

- stiprio ir svorio santykis yra geresnis nei plieno. To paties stiprio anglies pluoštas sudaro tik 10% plieno svorio. Dėl to, stiprinant konstrukcijas, jų savasis svoris padidėja nedaug;
- anglies pluoštas, lyginant su plieniniais elementais, yra gerokai plonesnis. Todėl stiprinant konstrukcijas tokia medžiaga konstrukcijų matmenys nepadidėja. Taip pat anglies pluoštas gali būti klijuojamas sluoksniais ir gali tarpusavyje persidengti, kas yra aktualu, jeigu konstrukciją reikia stiprinti dviem kryptimis
- anglies pluoštas pasižymi daug geresniu priglundimu prie nelygaus konstrukcijų paviršiaus ar prie kokių sudėtingų formų;
- stiprinimo laikas yra trumpesnis, nei naudojant plieninius elementus. Anglies pluošto transportavimas daug patogesnis dėl nedidelio svorio;
- šis pluoštas pasižymi dideliu atsparumu agresyviai aplinkai.

Eksperimentiniais tyrimais buvo įrodyti bei nustatyti agresyvios aplinkos poveikiai išoriniam anglies pluoštui [*Karbhari et al 2003; Grace 2004; Grace. Singh 2005; Toutanji. Gomez 1997; Green et all 2000; Silva, Biscaia 2008; Au, Buyukozturk 2006; FIB 2001; Gheorghiu et al 2004*]:

- pagrindinė anglies pluošto savybė – tai atsparumas korozijai, būtent dėl šios priežasties medžiaga yra naudojama gelžbetoninėms konstrukcijoms stiprinti;
- anglies pluoštas pasižymi atsparumu rūgštinei ir šarminei aplinkai;
- užšalimo ir atšilimo ciklai neturi jokios neigiamos įtakos anglies pluoštui.

Anglies pluošto trūkumai:

- šios medžiagos atsparumas ugniai yra mažas;
- konstrukcijos, kurios sustiprinamos anglies pluoštu, tampa mechaniškai pažeidžiamesnės;
- anglies pluošto kaina yra didesnė, lyginant su plieniniais elementais;
- nėra pakankamai gerai ištirtas konstrukcijų, sustiprintų anglies pluoštu, nuovargis.

1.4. Anglies pluošto kompozito naudojimas

Atlikti tyrėjų tyrimai rodo, kad anglies pluošto ribinis santykinis pailgėjimas tempiant siekia iki 1,3–2,3 %. Projektavimo rekomendacijose *ACI440* vertinamas ilgalaikis aplinkos poveikis anglies pluoštui, todėl nurodo jo stiprį sumažinti padauginus iš koeficiento C_E , kuris priklauso nuo aplinkos, kurioje eksploatuojama konstrukcija, ir kompozito, pluošto matricos tipo. Atitinkamai šis stiprio redukavimo koeficientas C_E kinta nuo 0,5 iki 0,95. Anglies pluošto

kompozito matricos (epoksidinių klijų) ilgalaikiai tyrimai rodo, kad esant skirtingam drėgmės poveikiui, sumažėja tamprumo modulis, bei tempiamasis stipris. Drėgmės poveikis epoksidinių medžiagų valkšnumo deformacijas gali padidinti iki penkių kartų [34].

Projektavimo rekomendacijos FIB 14 nurodo, kad kompozitinio sluoksnio stiprumo ir tamprumo modulio savybės skaičiuojamos pagal santykinį jų tūrį. Tamprumo modulis: $E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m$ ir tempiamasis stipris: $f_f = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m$, čia E_{fib} , f_{fib} – anglies pluošto tamprumo modulis ir tempiamasis stipris; E_m , f_m – epoksidinių klijų tamprumo modulis ir tempiamasis stipris; V_{fib} ir V_m – anglies pluošto ir epoksidinių klijų santykinis tūris. Nustatant kompozito tempiamąjį stiprį pagal klijų kiekį, tamprumo modulis gali sumažėti iki 50 %, o tempiamasis stipris gali padidėti iki 2 %. Todėl vertinant ilgalaikės apkrovos ir aplinkos poveikio įtaką kompozito matricai, galima redukuoti jo stiprį. Vertinant, kad anglies pluoštas yra tampri medžiaga, tamprumo modulio dydį galima redukuoti naudojant epoksidinių klijų mechaninių savybių redukavimo koeficientą, $E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot k \cdot V_m$ čia $k < 1$ [28].

Tyrimai rodo [Kawada et al. 2005], kad stiklo ir anglies pluošto armatūra drėgmės įtakai nepasiduodavo, bet vertinant betono ir epoksidinių klijų jungti galima abejoti, ar neverta vertinti drėgmės įtakos. Todėl atliekami betono ir kompozitinio elemento jungties tyrimai įvairios aplinkos sąlygomis [Ferrier et al. 2001].

Dauguma tyrėjų skaičiuodami atsižvelgia, kad anglies pluošto kompozitas dirba tampriai su vienodu tamprumo moduliu. Tačiau atlikti [Ditcher et al. 1979, 1981] tyrimai rodo, kad anglies pluošto kompozitas dirba netiesiškai tampriai. Tyrimuose [Ditcher et al. 1979, 1981] nustatyta, kad atliekant gniuždymo bandymus tamprumo modulis gali sumažėti iki 39 %, o tempiant tamprumo modulis gali padidėti iki 25 %. Pagrindine tokio netiesiškumo priežastimi nurodo pluošto fibrų kryptį. Taip pat galimas netiesiškumo atvejis dėl skirtingo klijais nepadengtų fibrų darbo. Netiesinis darbas gniuždant gali įvykti dėl pluošto fibrų klupumo, o tempimo atveju dėl fibrų išsitiesinimo tempimo jėgos kryptimi. Puasono koeficientas tempiant mažėja, o gniuždant didėja, tačiau Puasono koeficiento kitimas rodo, kad kompozitas skersine kryptimi dirba tampriai plastiškai, nes po nukrovimo lieka likutinės skersinės deformacijos dėl kompozito matricos pažeidimo. Vidutinis Puasono koeficientas tempimui ir gniuždymui siekia 0,33. Anglies pluoštu armuotu kompozitu tempiamasis stipris būna didesnis negu gniuždomasis [28].

Netiesiniai reologiniai modeliai kuriami anglies pluošto plastiko darbui analizuoti. Vertinamas ne tik epoksidinių klijų – matricos senėjimas, bet ir anglies pluošto fibros kontakto tarp matricos netiesinis darbas [Li, Weng 1995]. Fibroms taikomos tamprios medžiagos savybės, o kontaktui – tampriai plastinės. Tyrimai rodo, kad realybėje kontaktas yra silpnas ir

turi būti vertinamas fibros su matrica jungties standumas. Todėl ultragarsiniais prietaisais tiriama anglies pluošto plastikai, siekiant nustatyti tuštumų skaičių ir tinkamą mechaninį modelį.

Cheminiai fibrų paviršiaus tyrimai rodo [Wu, Cheng 2005], kad fibrų sukibimas su matricos medžiaga gana prastas. Cheminis ir plazminis fibrų paviršiaus apdirbimas taikomas siekiant padidinti fibros sukibimą su matrica. Nustatyta, kad cheminiu būdu apdirbant paviršius, kompozito stiprumą galima padidinti iki 15 %. Pačių fibrų stiprumui cheminis apdirbimas įtakos neturėjo [Wu, Cheng 2005].

Tiriant kompozito stiprumo charakteristikas vandens ir rūgštinių skysčių terpėje nustatyta, kad jų įtaka kompozito stiprio sumažėjimui ir plyšių vystymuisi vienoda [Kawada et al. 2005]. Energijos kiekis, reikalingas atsirasti plyšiams, yra mažesnis, kai kompozito drėgnis padidėja. Todėl šlyties įtempiai tarp kompozito elementų sluoksnių mažėja esant pastoviams įtempiams [28].

Kompozito matricos standumas daro įtaką kompozitinio elemento ilgalaikiškumui. Tyrimai rodo, kad mažiau elastinga matrica užtikrina ilgesnį kompozito ilgalaikiškumą, o elastingesnė – mažesnį [Kazanci et al. 2001].

Tiriant anglies pluoštu armuotų kompozitinių elementų mechaninių savybių kitimą esant skirtingam temperatūros ir drėgmės režimui lauko sąlygomis, per 10 metų nustatyta, kad vidinių sluoksnių matricos degradavimas disorientuoja vidinius sluoksnius [Startsev et al. 1999], o anksčiau minėta, kad fibrų kryptis turi įtakos valkšnumo intensyvumui. Dėl vidinių sluoksnių rišiklio (matricos) degradavimo sumažėja šlyties modulis tarp sluoksnių. Saulės ultravioletinių spindulių poveikis labiausiai pažeidžia išorinius sluoksnius, bet kompozito mechaninės savybės pakinta per visa kompozito storį. Tyrimais nustatė, kad per metus tempiamasis stipris sumažėjo 16 %. Aplinkos poveikis kompozito tempiamąjį stiprį, tamprumo modulį, šlyties modulį ir atsparumą nuovargiui sumažino iki 30 % [Startsev et al. 1999] [28].

1.5. Betono ir anglies pluošto jungties darbas esant ilgalaikėms apkrovoms

Daugelis tyrėjų [Davis et al. 2004; Ferrier, Hamelin 2002; Ferrier et al. 2001, 2010; Gao et al. 2003] yra atlikę trumpalaikius ir ilgalaikius bandymus, siekdami iširti betono ir anglies pluošto kompozito tarpusavio sąveiką. Kompozitinį sluoksnį dažniausiai sudaro epoksidiniai klijai ir anglies pluoštas. Betono ir kompozito jungtyje neišvengiamai sukeliama tangentiniai įtempiai, kurie sukelia šlyties deformacijas. Todėl būtina tinkamai paruošti betoninį paviršius, kad jis nebūtų silpnas, supleišėjęs ir trapus.

Konstrukcijų vienalytiškumui ir sluoksnių tarpusavio sąveikai vertinti siūloma naudoti vienalytiškumo koeficientą, kuris garantuotų sluoksnių jungties vientisumą [Koelov *et al.* 1989]:

$$\sigma \geq f_{MON} \cdot M_{MON} \quad (1.1)$$

čia – σ klijų jungties stipris; f_{MON} – analogiško vientiso elemento stipris; M_{MON} – vienalytiškumo koeficientas.

Epoksidinių klijų sudėtis – taip pat labai svarbus kriterijus nagrinėjant jungties stiprumą: ties jungtimi yra impregnuojamas betonas ir taip pasikeičiamos jo fizikinės bei mechaninės savybės. Dėl šių priežasčių šio sluoksnio stipris padidėja [Gao *et al.* 2003]. Tyrėjai atliko jungties stiprio tyrimus vertinant epoksidinių klijų modifikatoriaus kiekį. Padidėjus modifikatoriaus kiekiui nuo 0 iki 20 % buvo padidintas kontakto stiprumas iki 10 % ir ribinė šlyties deformacija iki 50 %. Todėl modifikatorius padidinimas padidina kontakto stiprumą, bei padidina ir pleišėtumo ribą.

Yra pasiūlyta metodika, kurią taikant galima įvertinti įmirkusio sluoksnio įtaką kompozitiniam elementui [33]. Elemento darbo metu plyšių vystymosi pobūdis rodo [33], kad impregnuoto betono tempiamasis stipris kur kas didesnis už paprasto betono ir horizontalus plyšys susiformuoja virš impregnuotojo sluoksnio (1.2 pav.).



1.2 pav. Plyšių vystymosi charakteris virš kompozitinio sluoksnio

Padidėjusi aplinkos temperatūra sumažina jungties šlyties modulį. Yra atlikti išsamūs tyrimai jungties stiprumo priklausomybei tirti nuo aplinkos poveikio [Ferrier, Hamelin 2002; Ferrier *et al.* 2001, 2010]. Skirtingų tamprumo charakteristikų klijų naudojimas esant skirtingam aplinkos temperatūriniam poveikiui parodo skirtingą kontakto šlyties valkšnumo deformacijų pobūdį. Netgi 10 °C temperatūros pokytis daro poveikį šlyties deformacijų vystymosi greičiui. Kuo mažesnis medžiagų, esančių jungtyje, tamprumo modulis, tuo mažesnis jungties šlyties modulius. Tyrimų rezultatų apžvalgoje [Ferrier, Hamelin 2002;

Ferrier et al. 2001, 2010] nurodyta, kad jungties stiprumas priklauso nuo polimero rūšies ir aplinkos temperatūros. Tyrimai parodė, kad didesnėje temperatūroje šlyties modulis mažėja sparčiau. Tinkamiausios medžiagos, užtikrinančios gerą sluoksnių jungtį, yra tuo atveju, kai jų tamprumo modulis didesnis negu 10 GPa. Jungtį veikiant apkrova, ne didesne kaip $0,4Fu$ (Fu – ribinė jungties laikomoji galia), pasireiškia tik tiesinis valkšnumas. Tyrėjai [*Ferrier et al. 2010*] pasiūlė analitinę šlyties deformacijų išraišką, kuri įvertina ilgalaikę apkrovą ir temperatūros įtaką:

$$\gamma(t, T) = \gamma_{imi} + \gamma_{creep} = \frac{\tau_{ave}}{G(t_0)} + \tau_{ave} \cdot D(t, T), \quad (1.2)$$

Čia $\tau_{ave} = \frac{F}{A_{adh}}$ - vidutiniai tangentiniai įtempiai sąlyčio vietoje; $G = \frac{\tau_{ave}}{\gamma}$ - šlyties modulis. Šlyties deformacijos pagal eksperimentinius duomenis apskaičiuojamos pagal formulę $\gamma = \frac{\Delta l_2 - \Delta l_1}{s}$; Δl_1 – kompozitinio elemento deformacija; $D(t, T)$ – laipsninė funkcija, apibūdinanti reologines kontakto savybes, priklausomai nuo aplinkos temperatūros. Atlikę eksperimentinius tyrimus ir skaičiavimus tyrėjai pasiūlė sumažinti ribines pluošto kompozito deformacijas nuo 35 % iki 90 %, priklausomai nuo klijų tipo ir aplinkos temperatūros.

Jungties betono drėgmės pokyčiai rodo, kad 50° C aplinkos temperatūroje jungtis prarasdavo drėgmę ir epoksidiniai klijai toliau kietėdavo. O esant 50 % aplinkos drėgmei ir 18 °C aplinkos temperatūrai drėgmės kiekis jungtyje nekito [*Davis et al. 2004*].

1.6. Pirmojo skyriaus išvados

1. Laikui bėgant senuose gelžbetoniniuose statiniuose atsiranda pažeidimų, kurias reikia pašalinti arba kurių plitimą reikia sustabdyti. Dažniausiai tokių pažeistų konstrukcijų tvarkymas yra elemento pakeitimas arba stiprinimas.
2. Pasirinkus stiprinti pažeistą elementą svarbiausia rasti tinkamą stiprinimo metodą, kad pasiekti geriausią rezultatą.
3. Anglies pluošto kompozitas, lyginant su kitais stiprinimo metodais, pasižymi labai geromis savybėmis ir turi gana didelį pranašumą prieš kitus stiprinimo metodus.
4. Pažeistus lenkiamus gelžbetoninius elementus stiprinus anglies pluošto kompozitu padidiname elemento laikomąją galią ir sumažiname įlinkį. Laikomoji galia, įlinkis ir elemento suirtis priklauso nuo pasirinkto anglies pluošto skerspjūvio.
5. Stiprinant anglies pluoštu svarbu įvertinti jungties darbą tarp anglies pluošto ir betono. Kadangi šioje jungtyje vyrauja tangentiniai įtempiai, kurie sukelia šlyties deformacijas, dėl to elementai tinkamai nesukimba ir dirba kaip du skirtingi elementai.

2. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų lenkiamų gelžbetoninių elementų tyrimai

Tyrėjai [*Chami et al. 2009*] atliko betoninių ir gelžbetoninių elementų, papildomai armuotų anglies pluošto kompozitu, ilgalaikius tyrimus. Ilgalaikės apkrovos trukmė – vieneri metai. Iš viso išbandytos 26 sijos su skirtingu armavimo kiekiu kompozitu. Sustiprintų elementų ilgalaikės apkrovos intensyvumas sudarė 59 % ir 78 % kontrolinių elementų laikomosios galios. Tyrimo metu siekta nustatyti, ar esant tokiam apkrovos intensyvumui nebus prarasta sijų laikomoji galia dėl valkšnumo deformacijų vystymosi. Prieš ilgalaikį bandymą kontrolinių elementų laikomoji galia patikrinta statine apkrova ir nustatyti du pagrindiniai elementų suirimo pobūdžiai. Sijos, kurios tempiamojoje zonoje buvo armuotos plienine strypine armatūra ir anglies pluošto kompozitu, suirdavo gniuždomojoje zonoje, o sijos, kurios tempiamojoje zonoje armuotos tik anglies pluošto kompozitu, suirdavo kompozitui nuplyšus su betonu. Ilgalaikio tyrimo metu nustatyta, kad sijose, kuriose tempiamoji zona nebuvo armuota plienine strypine armatūra, didžiausi plyšiai būdavo tarpatramio viduryje. Didžiausias valkšnumo deformacijų intensyvumas pasireiškia gniuždomosios zonos betone ir per visą bandymo laikotarpį sudarė 175 % nuo pradinių deformacijų. Tyrėjai [*Chami et al. 2009*] teigia, kad kompozito kiekis įlinkio prieaugiui neturi įtakos [28].

Tyrėjai [*Wanwei ir Guo 2006*] atliko ilgalaikius anglies pluošto kompozitu sustiprintų gelžbetoninių sijų bandymus. Tyrimais nustatė, kad stiprinamų sijų laikomoji galia mažėja, kai gelžbetoninės sijos stiprinamos prie didesnio apkrovos lygio. Sijų laikomoji galia, palyginus su paprasta gelžbetonine sija, padidėjo iki 22,5 % ir 41,2 %.

[*Tan ir Saha 2006*] atliko gelžbetoninių sijų, sustiprintų stiklo pluošto kompozitu, ilgalaikius tyrimus. Tyrimų tikslas – ištirti ilgalaikės apkrovos įtaką sustiprintų sijų elgsenai. Bandinių veikimo ilgalaikės apkrovos trukmė – dveji metai. Pagrindiniai įlinkį lemiantys faktoriai buvo: kompozito armavimo procentas ir ilgalaikės apkrovos intensyvumas. Tyrėjai nustatė, kad armavimo procentą padidinus nuo 0,64 % iki 1,92 %, įlinkis sumažėjo nuo 23 % iki 33 %.

Tyrėjai [*Diab et al. 2009*] atliko gelžbetoninių sijų, sustiprintų įtemptų anglies pluoštu, ilgalaikius bandymus lauko sąlygomis. Dvidešimt mėnesių jie tyrė aplinkos poveikio įtaka sijų elgsenai esant skirtingam pluošto įtempimo lygiui ir inkaravimo būdai. Iš viso buvo ištirtos septynios sijos su skirtingu pluošto kiekiu ir jo įtempimo lygiu. Pradinis įtempis siekė 20–30 % ribinės pluošto laikomosios galios, o aplinkos temperatūra svyravo nuo 7 °C iki 30 °C. Atleidžiant pluošto įtempimo mechanizmą nustatyta, kad mažiausias pasislinkimas fiksuojamas

sijose, kuriose kompozitas yra papildomai inkaruojamas. Tyrėjai atkreipia dėmesį, kad didžiausios šlyties valkšnumo deformacijos pasireiškia tose zonose, kuriose didžiausia šlyties įtempių koncentracija, t. y. pluošto priklijavimo galuose. Bandiniuose, kurių kompozitas papildomai inkaruotas, pasireiškė mažesnės šlyties deformacijos, kurios didėdavo tiesiškai iki pat sijos nukrovimo, nes šlyties įtempiai pasiskirstydavo tarp betono ir inkaravimo plokštės.

[Benjeddou et al 2007] atliko tyrimus nustatyti anglies pluošto juostos pločio įtakos priklausomybės, lenkiamosioms gelžbetoninėms sijoms, sustiprintoms išorine anglies pluošto armatūra. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad sijų tempiamojoje zonoje priklijuoto anglies pluošto plotis turi įtakos suirimo pobūdžiui ir laikomajai galiai. Kai santykis $bc/bf = 1,2$ (bc – gelžbetoninės sijos plotis; bf – anglies pluošto juostos plotis), išorinės armatūros juostos galas atplėšiamas kartu su betono sluoksniu. Sijos suyra klijų sluoksnyje, atplėšiant pluošto juostos galą, kai santykis $bc/bf = 2,4$. Sijų laikomoji galia, kai santykis $bc/bf = 1,5$ ir $bc/bf = 2,4$, padidėja atitinkamai 50 % ir 40 %, lyginant su kontroliniais bandiniais [19].

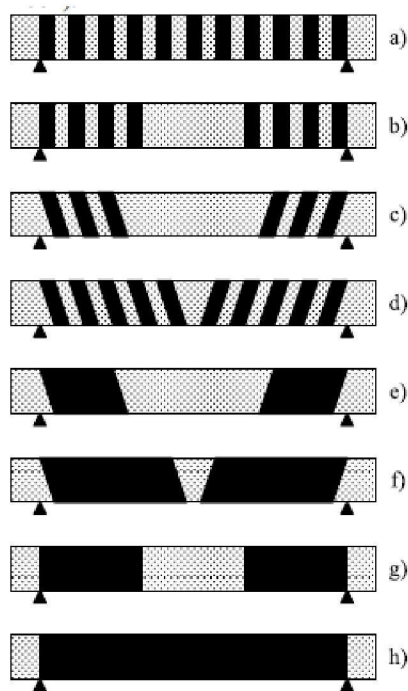
Tyrimų [Zhang et al 2006] rezultatų analizė rodo, kad apkrovos dydis prieš stiprinant gelžbetonines sijas neturi įtakos bandinių įlinkiams ir laikomajai galiai. Prieš klijuojant anglies pluoštą sijos buvo apkrautos 30 %, 60 % ir 80 % nesustiprinto elemento laikomosios apkrovos. Gelžbetoninės sijos sustiprintos jų nenukraunant. Tyrimams naudotos dvi serijos sijų su skirtingu išorinės armatūros kiekiu (anglies pluoštas sudarė 6 % ir 12 % tempiamosios strypinės plieno armatūros ploto). Sijų, sustiprintų vienu anglies pluošto sluoksniu, laikomoji galia, nepriklausomai nuo pradinės apkrovos lygio, yra 41 % didesnė nei nesustiprintų sijų. Sijų, sustiprintų dviem sluoksniais anglies pluošto, laikomoji galia, nepriklausomai nuo pradinės apkrovos lygio, yra 77 % didesnė nei nesustiprintų sijų.

Bandymais nustatyta, kad didėjant anglies pluošto sluoksnių skaičiui, sustiprinimo efektas nedidėja. Sijų B2, B3, B4, B5 laikomoji galia yra 22 %, 45 %, 38 %, 33 % didesnė nei kontrolinio bandinio. Galima spręsti, kad yra ribinis išorinės armatūros kiekis, kurį toliau didinant sustiprinimo efektas nebedidėja. Tai aiškinama tuo, kad didėjant anglies pluošto kiekiui, pereinamojo betono sluoksniu, į kurį įsigėrę klijai, stipris bei jungties tarp gelžbetoninio elemento ir pluošto stipris nepadidėja. Bandymų rezultatai parodė, kad didžiausia laikomoji galia pasiekama tada, kai sijos sustiprintos dviem išorinės armatūros sluoksniais (B3) (armavimo anglies pluoštu procentas – 0,15 %). Sijos, kurios sustiprintos dviem ir daugiau išorinės armatūros, suiro atplėšiant anglies pluošto armatūra kartu su betonu.

Tyrėjų grupė [Avril et al. 2003], atlikusi lenkiamųjų sustiprintų gelžbetoninių sijų elgsenos tyrimus, veikiant trumpalaikei apkrovai, nustatė, kad sustiprintos gelžbetoninės sijos tempiamojoje armatūroje pasiekus įtempių lygį $0,6f_y$, naujų plyšių (palyginti su nesustiprinta

sija) neatsiranda, o tik vystosi esamų plyšių plotis. Didinant sustiprintų sijų apkrovos lygį nauji atsiradę plyšiai buvo dviejų kategorijų ir jų vystymasis priklausė nuo kompozitinio sluoksnio pasislinkimo. Tai pasvirieji plyšiai, linę jungtis su esamais statmenais plyšiais, ir nauji statmenieji plyšiai, atsirandantys tarp dviejų esamų plyšių. Sustiprinimo efektas sumažino plyšių plotį, bet padidino jų skaičių ir jų pločių suma buvo panaši kaip nesustiprintose sijose. Vertinant pasvirųjų plyšių vystymąsi galima teigti, kad jų atsiradimo priežastis – šlyties jėgos tempiamojoje betono ir kompozito jungtyje. Tačiau niekur nenurodoma, kad dėl šių plyšių atsivėrimo dalies esamų statmenųjų plyšių plotis sumažėtų. Taip pat teigiama, kad nukrovus gelžbetonines sijas plyšiai galutinai neužsiveria dėl frakcijos tempiamosios armatūros ir betono jungtyje [28].

Lenkiamieji gelžbetoniniai elementai gali būti stiprinami ir įstrižajame pjūvyje. Naudojamų konstrukcijų įstrižojo pjūvio laikomoji galia gali būti nepakankama dėl padidėjusių apkrovų, armatūros korozijos ar betono pažeidimų. Gelžbetoninių konstrukcijų suirimas įstrižajame pjūvyje įvyksta staiga, todėl daugelis autorių skiria nemažą dėmesį konstrukcijų įstrižojo pjūvio stiprinimui išorine anglies pluošto armatūra. Sustiprintų konstrukcijų tyrimų rezultatai rodo, kad išorinę armatūrą galima efektyviai naudoti įstrižajam pjūviui stiprinti (Labossiere et al 2000; Leung, Balendran 2003; Hag Elsafi et al 2001; Hag Elsafi et al 2004; Ghosh, Karbhari 2007; Wang et al 2007; Di Ludovico et al 2005; Bencardino et al 2005; Khalifa et al 1999; Khalifa, Nanni 2000; Li et al 2001a; Al-Amery, Al-Mahaidi 2005; Nanni, Khalifa 2002; Li et al 2001b; Taljsten 2003; Carolin 2003; Chen, Teng 2003a; Rizzo, De Lorenzis 2007; Kachlakev, McCurry 2000; Aprile, Benedetti 2004; Hadi 2003; Wang, Chen 2003; Monti, Liotta 2007; Chen, Teng 2003b; Abdel et al 2003; Pellegrino, Modena 2006; Pimanmas, Pornpongsaroj 2004).

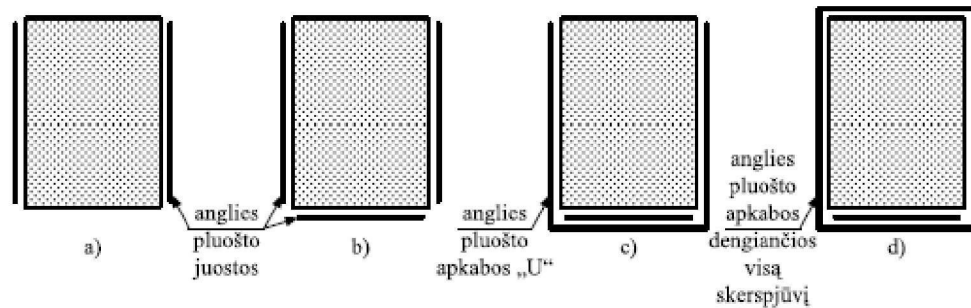


2.1 pav. *Gelžbetoninių sijų įstrižojo pjūvio sustiprinimo būdai*

Tyrimais įrodyta, jeigu stipriname įstrižąjį pjūvį, tokiu atveju būtina stiprinti ir statmenąjį pjūvį. Jeigu gelžbetonines konstrukcijas sustipriname įstrižajame pjūvyje U formos apkabomis, pasiekama geresnė tempiamoje zonoje esančio pluošto sukibtis su betonu.

Tyrimais nustatyta, kad įstrižojo pjūvio laikomoji galia priklauso nuo išorinės armatūros apkabos aukščio ir pločio, l_a/d santykio (l_a – atstumas nuo atramos iki sutelktosios jėgos; d – naudingasis skerspjūvio aukštis), pluošto savybių. Geriausi rezultatai buvo pasiekti padengus visą sijų skerspjūvį anglies pluoštu (2.2 pav., d). Pluošto klijavimas 45° kampų (2.2 pav., c, d, e, f, ir 2.1 pav., c), taip pat gerokai padidina įstrižojo pjūvio laikomąją galią. Iš gautų tyrimų rezultatų matoma, kad mažiausiai efektyvumas pasiekiamas pasirinkus II juostų klijavimo stiprinimo būdą (2.2 pav., a).

Atliktais tyrimais įrodyta, kad pasiekus tam tikrą naudojamą išorinės armatūros kiekį stiprinimo efektas visai nebedidėja arba didėja neženkiai. Kad efektyviai išnaudoti išorinę armatūrą, svarbu užtikrinti tinkamą pluošto sukibtį su betonu papildomai inkaruojant išorinės armatūros galus. Geresnis anglies pluošto ir betono jungties stiprumas pasiekiamas tinkamai paruošus konstrukcijų paviršių, prie kurio yra klijuojama išorinė armatūra. Jeigu papildomai inkaruojama anglies pluošto armatūra, tai pasiekiami jos didžiausieji įtempiai bei pasikeičia suirimo pobūdis.



2.2 pav. Gelžbetoninių sijų įstrižojo pjūvio sustiprinimas skerspjūvį padengiant: a – II formos juostomis; b – atskiromis juostomis; c – U formos apkabomis; d – viso skerspjūvio padengimas

Tyrėjai [Ferrier et al. 2003] atliko lenkiamųjų gelžbetoninių sijų ir sustiprintų gelžbetoninių sijų pleišetumo tyrimus. Tyrimų tikslas – ištirti stiprinamų konstrukcijų pažeidimų įtaką stiprinimo efektyvumui. Elgsenai ištirti jie iš viso išbandė tris gelžbetonines sijas, kurių skerspjūvio matmenys 150×200 mm, lenkimo tarpatramio ilgis – 2000 mm. Pirmoji sija apkrauta iki suirimo be sustiprinimo. Antroji sija apkrauta iki 0,6MR ir nukrovus apkrova sustiprinta. Po to sija apkrauta iki suirimo. Trečioji sija papildomai armuota pluošto kompozitu ir apkrauta iki suirimo. Stiprinimas kompozitu sijų standumą padidino 45 % ir kreivis prie suirimo buvo toks pat, kaip sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, be išorinės apkrovos poveikio. Tyrėjai nustatė, kad plieninės tempiamosios armatūros įtempių prieaugis buvo mažesnis, o tai sumažino besivystančių plyšių plotį, palyginti su nesustiprinta sija. Nesustiprintų sijų pleišėjimo apkrova siekė 8,75 kN, o sustiprinus kompozitu ši apkrova padidėjo iki 30 kN. Ši apkrova priklausė nuo plieninės armatūros bei kompozito kiekio. Sustiprinimas kompozitu plyšių tankio pasiskirstymo nepakeitė, tačiau plotį sumažino. Taip pat nustatyta, kad plyšių aukštis nepriklauso nuo to, kada buvo sustiprinta sija. Eksperimentinių tyrimų rezultatams patikrinti atlikti plyšio pločio skaičiavimai pagal EC2 reikalavimus. Plyšio pločio skaičiavimo išraiška [28]:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_m \quad (2.1)$$

Remdamiesi atliktais skaičiavimas tyrėjai teigia, kad nesustiprintos sijos eksperimentiniai plyšių pločiai buvo panašūs į apskaičiuotus pagal EC2, bet sustiprintų sijų plyšių plotis buvo gerokai mažesnis. Todėl skaičiuojant plyšio plotį pagal EC2 reikalavimus, armatūros įtempiai buvo dauginami iš proporcingumo koeficiento α . Koeficientas α nustatytas pagal sąlygą:

$$\sigma_{s,f} = \frac{d-X}{d-X_f} \cdot \frac{I_f}{I} \cdot \sigma_s = \alpha \cdot \sigma_s, \quad (2.2)$$

Tada deformacijos tempiamosios armatūros lygyje, nevertinant tempiamo betono standumo, yra:

$$\varepsilon_m = \frac{\alpha \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \left(1 - \beta_{1,m} \cdot \beta_{2,m} \cdot \left(\frac{\sigma_{sr,f}}{\alpha \cdot \sigma_s} \right)^2 \right) + \varepsilon_{m0} , \quad (2.3)$$

Atlikti pakeitimai leido sumažinti eksperimentinių ir apskaičiuotųjų reikšmių skirtumus, tačiau pradinių deformacijų reikšmė ε_{m0} turi būti nustatyta eksperimentais, o kiti koeficientai imami iš EC2.

2.1. Anglies pluošto su betonu jungties vertinimas

Veikiant ilgalaikiai apkrovai, šlyties jėga jungtyje tarp sluoksnių gali būti vertinama pritaikius EMM ar AEMM metodikas (bet tik žinant kompozito sluoksnio deformacijas) [Tan et al. 2007]:

$$T_{FRP} = \varepsilon_{FRP}(t) \cdot \frac{E_{FRP}(t_0)}{1 + \varphi_{FRT}(t)} b \cdot t_{FRP} \quad (2.4)$$

Tyrėjai Wu, Diab (2007) kontakto valkšnumo efektui vertinti pritaikė Maksvelo sudėtinę teoriją. Šiuo atveju jungties tangentiniai įtempiai laiko momentu t apskaičiuojami pagal formulę:

$$\tau(t; t_0) = R(t; t_0) \cdot s(t) \quad (2.5)$$

Čia: $R(t; t_0)$ – šlyties relaksacijos funkcija išreiškiama taip:

$$R(t; t_0) = k_{\infty}(t_0) + \sum_{\mu=1}^n k_{\mu}(t_0) e^{\frac{t-t_0}{\lambda \cdot \mu}} \quad (2.6)$$

$s(t)$ – sluoksnių pasislinkimas vienas kito atžvilgiu jungtyje.

Šlyties įtempiai po laiko prieaugio Δt :

$$\tau(t + \Delta t) = \tau(t) + \Delta \tau + (\Delta t) \quad (2.7)$$

O šlyties įtempių prieaugis:

$$\Delta \tau(\Delta t) = \sum_{\mu=0}^n \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\lambda \cdot \mu}} \right) \left(\frac{k_{\mu}(t^*) \lambda \cdot \mu}{\Delta \tau} \Delta s(\Delta \tau) - \tau_{\mu}(t) \right) \quad (2.8)$$

Poslinkio prieaugis:

$$\Delta s(\Delta t) = \Delta s^e(\Delta t) + \Delta s^c(\Delta t) \quad (2.9)$$

Čia: $\Delta s^e(\Delta t)$ - tampri poslinkio prieaugio dalis; $\Delta s^c(\Delta t)$ – valkšnumo sukelta poslinkio dalis.

Siūlomas skaičiavimo modelis reikalauja, kad jungties tamprumo koeficientai k_∞ ir k_μ turi būti nustatyti ilgalaikiais eksperimentiniais tyrimais. Norint gauti tikslesnius rezultatus, šlyties įtempių relaksacijos lygtis reikalauja daugiau jungties standumo koeficientų, kitu atveju skaičiavimo rezultatų tikslumas padidės tik esant didesniai laiko tarpui.

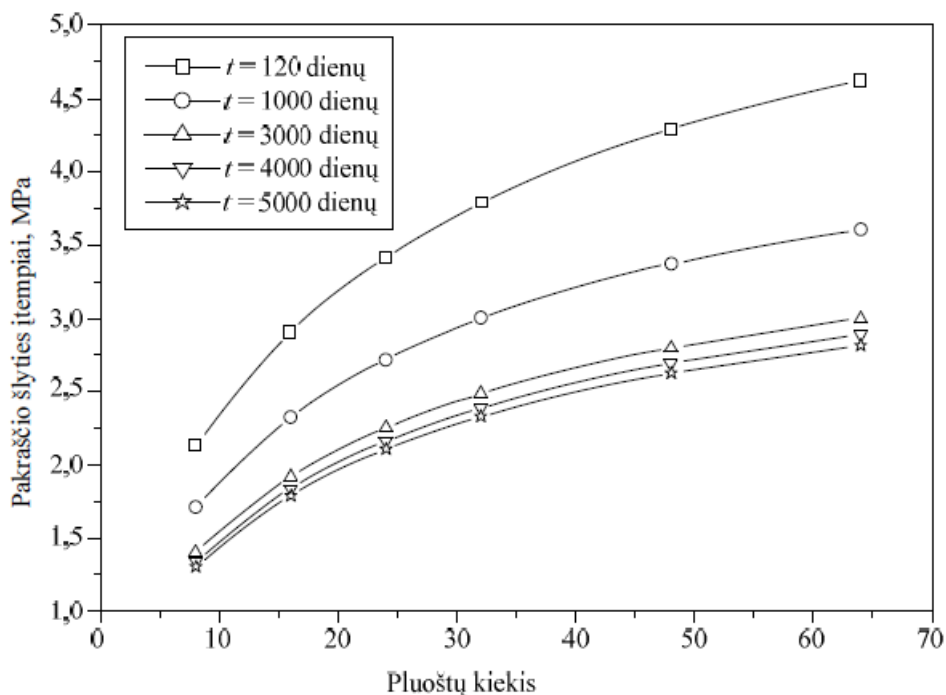
Skaičiavimo teorijų apžvalga rodo, kad sluoksnių sukibties stiprumas sluoksnių ašimis bei lenkiamasis standumas gali būti vertinami pagal sudėtinių strypų metodiką. Apatinio betoninio sluoksnio deformacijas Benyoucef *et al.* (2007) pasiūlė išreikšti taip:

$$\varepsilon_c(x) = \frac{du_c(x)}{dx} = \frac{e \cdot M_c(x)}{E_c \cdot I_c} - \frac{N_c(x)}{E_c \cdot A_c} + \alpha T_c \quad (2.10)$$

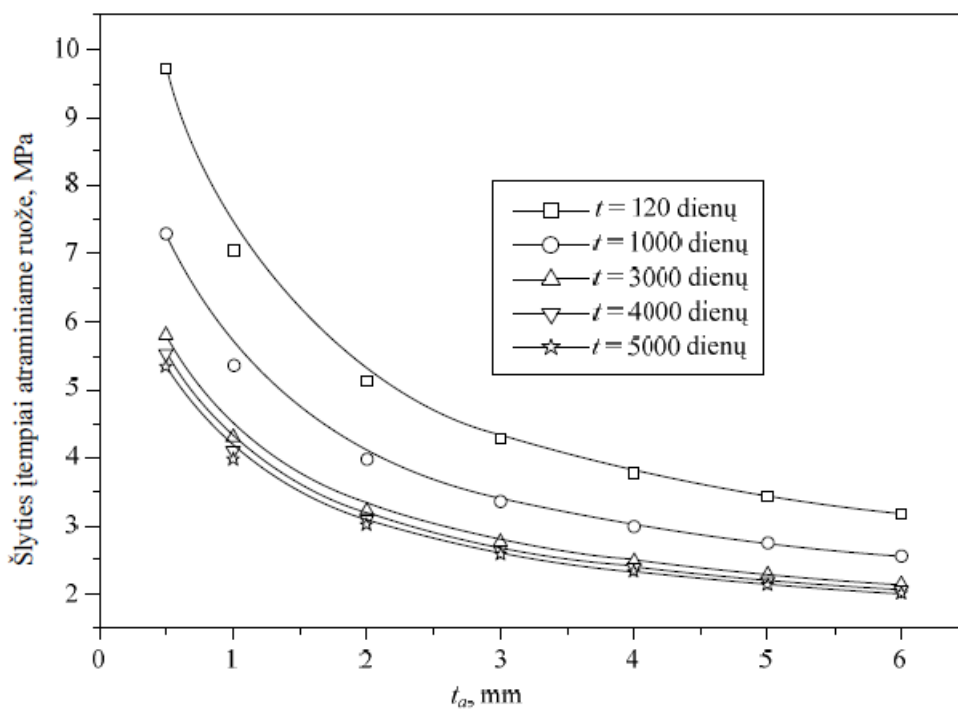
Čia: $u_c(x)$ - horizontalus pasislinkimas tarp tempiamųjų sluoksnių (betono ir kompozito); I_c – gelžbetoninio elemento inercijos momentas; A_c – gelžbetoninio elemento skerspjūvio plotas; E_c – gelžbetoninio elemento tamprumo modulis. Dažniausiai tamprumo modulio kitimas laikui bėgant aprašomas pagal efektyviojo modulio arba modifikuoto efektyviojo modulio metodika; α – betono temperatūrinis plėtimosi koeficientas; T_c - temperatūros pokytis.

Gauti skaičiavimo rezultatai [Benyoucef *et al.* 2007] rodo, kad kompozitinio sluoksnio ašinis standumas turi įtaką sluoksnių pasislinkimui vienas kito atžvilgiu ir atitinkamai šlyties įtempių intensyvumui. Esant didesniai pluoštų kiekiui sukeliama didesni šlyties įtempiai ir ilgalaikės apkrovos atveju jungties standumas mažėja (2.3 pav.) [Benyoucef *et al.* 2007].

Klijų sluoksnio storis daro įtaką šlyties įtempių pasiskirstymui. Didėjant klijų storiui, šlyties įtempiai mažėja ir gaunamas atitinkamai mažesnis įtempių sumažėjimas veikiant ilgalaikiai apkrovai (2.4pav.) [Benyoucef *et al.* 2007].



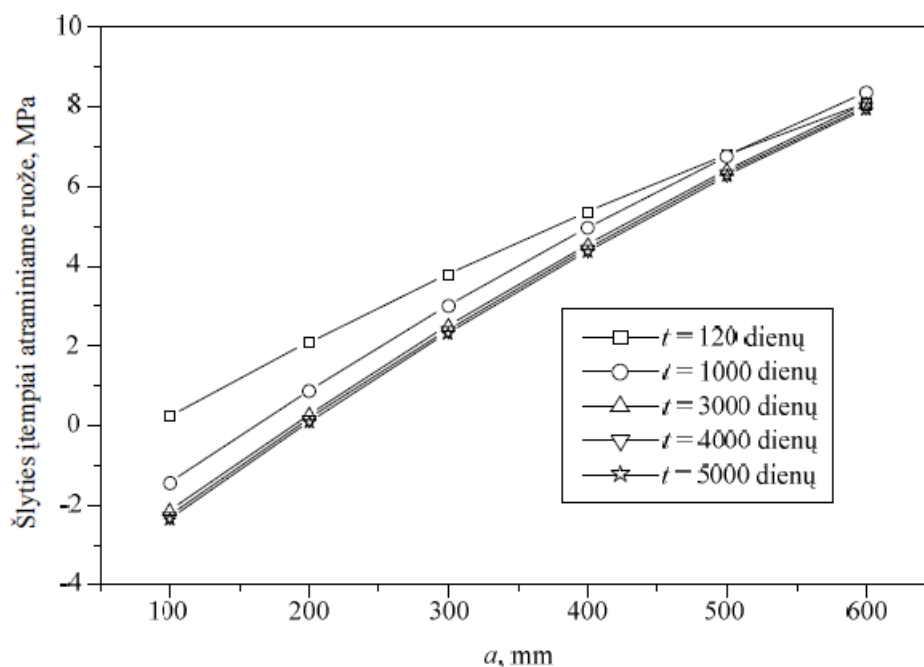
2.3 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo pluoštų kiekio [Benyoucef et al.2007]



2.4 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo epoksidiniu klijų sluoksnio storio [Benyoucef et al. 2007]

Tokių elgesį galima paaiškinti tuo, kad didelis klijų sluoksnis sukuria tampriai plastiškai lankstų pagrindą, per kurį kompozitas savo tempimo jėga sukelia šlytį betone.

Kompozito priklijavimo ilgis taip pat daro poveikį šlyties deformacijų intensyvumui betono ir anglies pluošto kompozito jungtyje (2.5 pav.) [Benyoucef et al. 2007].



2.5 pav. Šlyties įtempių intensyvumo priklausomybė nuo pluošto kompozito laisvojo galo atstumo iki atramos [Benyoucef et al. 2007]

Aplinkos drėgmės pokytis rodo, kad sąlyčio vietoje kinta šlyties įtempių intensyvumas, o normaliniai įtempiai beveik nekinta [Benyoucef et al. 2007]. Todėl aplinkos poveikis didžiausią įtaką daro kontakto elgsenai, bet ne kompozito elementui.

2.2. Antrojo skyriaus išvados

1. Daugelio autorių atlikti ekperimentiniai tyrimai įrodė, kad pasirinkus stiprinimą anglies pluošto kompozitu gaunami rezultatai yra teigiami ir galima konstrukcijos laikomąją galią padidinti iki 50%.

2. Gelžbetoninių lenkiamų elementų išankstinės apkrovos lygis prieš stiprinant lenkiamus elementus turi nedidelę įtaką sustiprintų konstrukcijų laikomajai galiai. Atlikti tyrimai rodo, kad įlinkis priklauso nuo lenkiamų elementų pradinio standumo, o ne nuo apkrovos lygio, kai klijuojamas anglies pluoštas.

3. Daugumos autorių atliktų turimų rezultatų parodė, kad stiprinamo gelžbetoninio elemento ir anglies pluošto jungtis nėra visiškai standi, tačiau tyrimų autoriai savo darbuose to neanalizuoja ir siūlo skaičiavimo metodikose to tiesiogiai nevertinti.

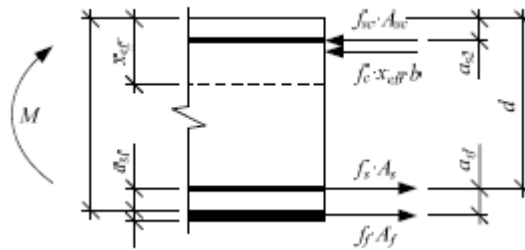
4. Atlikti tyrimai rodo, kad pasiekus tam tikrą išorinės armatūros kiekį stiprinimo efektas nedidėja arba didėja nedaug. Norint efektyviai išnaudoti išorinę armatūrą, būtina užtikrinti gerą pluošto sukibtį su betonu papildomai inkaruojant.

3. Lenkiamų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimas

3.1. Sudėtinių strypų teorijos skaičiavimo metodas

Anglies pluošto kompozitu sustiprintų sijų laikomajai galiai skaičiuoti dažniausiai taikomas klasikinis statmenojo pjūvio metodas, sudėtinių strypų metodas (Ржаницын 1986), sluoksnių metodas.

Klasikinėse statmenojo pjūvio metodikose, skaičiuojant elemento laikomąją galią, sudaroma vidinių ir išorinių jėgų (3.1 pav.) pusiausvyros lygtis. Šioje metodikoje vertinama, kad kompozitinio sluoksnio sukibtis su betonu yra standi ir poslinkio tarp sluoksnių nėra.



3.1 pav. Šlyties įtempių intensyvumo priklausomybė nuo pluošto kompozito laisvojo galo atstumo iki atramos [Benyoucef et al. 2007]

Remiantis sudėtinių strypų teorija, sijos laikomoji galia randama pagal formulę:

$$M_R = k(x) \cdot M_{R0} \quad (3.1)$$

Čia: M_{R0} – sijos laikomoji galia, kai ryšys tarp sluoksnių yra visiškai standus. Šis dydis randamas pagal formulę:

$$M_{R0} = f_e \cdot A_e \cdot (h - 0,5 \cdot x_{eff} - 0,5 \cdot h_e) + f_y \cdot A_y \cdot (h - 0,5 \cdot x_{eff} - a_{s1}) \quad (3.2)$$

Čia: f_e – sustiprinimui naudojamos kompozitinės juostos stipris, A_e – šios juostos skerspjūvio plotas, h – visas sustiprintos sijos aukštis, x_{eff} – betono gniuždomosios zonos aukštis, h_e – kompozitinės juostos aukštis, f_y – tempiamasis strypinės armatūros stipris, A_y – tempiamosios strypinės armatūros plotas, a_{s1} – atstumas nuo sijos skerspjūvio apačios iki tempiamosios strypinės armatūros centro .

Koeficientas $k(x)$, įvertina jungties tarp anglies pluošto ir betono standumą ir yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k(x) = \left(1 - \frac{ch(\lambda \cdot (0,5 \cdot l - a))}{\lambda \cdot x \cdot ch(0,5 \cdot \lambda \cdot l)} \cdot sh(\lambda \cdot x) \right) \quad (3.3)$$

Čia: l – sijos tarpatramio ilgis, a – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėjimo taško, x – atstumas nuo atramos iki nagrinėjamo sijos taško, λ – jungties standumą vertinantis koeficientas. Šis koeficientas randamas remiantis formule:

$$\lambda = \sqrt{\alpha \cdot \gamma} \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{b \cdot G_{weff}}{z} \quad (3.5)$$

$$\gamma = \frac{1}{E_{cm} \cdot A_{eff}} + \frac{1}{E_e \cdot A_e} + \frac{z^2}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \quad (3.6)$$

Čia: b – sijos skerspjūvio plotis, z – atstumas nuo sustiprintos sijos skerspjūvio centro iki kompozitinės juostos centro, E_{cm} – betono tamprumo modulis, E_e – kompozitinės juostos tamprumo modulis, A_{eff} – efektyvusis skerspjūvio plotas, I_{eff} – efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas, G_{weff} – jungties tarp sluoksnių standumas. Šis standumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_{weff} = 0,001 \cdot K \cdot E_{cm} \quad (3.7)$$

Čia: K – koeficientas įvertinantis papildomą kompozitinės juostos tvirtinimą prie gelžbetoninės sijos.

Skaičiuojant betono gniuždomo zonos aukštį priimama, kad visų siją sudarančių komponentų įtempių reikšmės yra lygios medžiagų, iš kurių pagaminti tie komponentai, stipriams. Gniuždomos zonos aukštis randamas taikant formulę:

$$x_{eff} = \frac{f_e \cdot A_e + f_{y1} \cdot A_{s1} + f_{y2} \cdot A_{s2}}{f_c \cdot b} \quad (3.8)$$

Čia: f_{y1} – tempiamos armatūros stipris, f_{y2} – gniuždomosios armatūros stipris, f_c – betono stipris, A_{s1} – tempiamosios armatūros plotas, A_{s2} – gniuždomos armatūros plotas, b – skerspjūvio plotis.

3.2. Skaičiavimo metodas paremtas ACI 440.2R-08 ir FIB biulletin 14 rekomendacijomis

Skaičiuojant vadovaujantis šiomis rekomendacijomis, laikomasi prielaidų, kad:

- Betonos tempiamasis stipris nėra vertinamas;
- Galioja plokščių pjūvių hipotezė;
- Ryšys tarp skirtingų medžiagų sluoksnių yra standus.

Anglies pluošto deformacija ε_f , tempiamos plieninės armatūros deformacija ε_{s1} ir gniuždomos plieninės armatūros deformacija ε_{s2} apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - x}{x} \right) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_1 - x}{x} \right) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{x - d_2}{x} \right) \quad (3.11)$$

Čia: ε_{cu} – ribinė betono deformacija, d_f – atstumas nuo labiausiai gniuždomo betono sluoksnio iki anglies pluošto centro, x – gniuždomos zonos aukštis, d_1 – atstumas nuo labiausiai gniuždomo betono sluoksnio iki tempiamos armatūros centro, d_2 – atstumas nuo labiausiai gniuždomo betono sluoksnio iki gniuždomos armatūros centro.

Įtempiai anglies pluošto juostoje ir plieninėje armatūroje randami taikant formules:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_y, \sigma_{s1} = E_{s1} \cdot \varepsilon_{s1}, \text{ o jei ne, } \sigma_{s1} = \sigma_y$$

$$\varepsilon_{s2} < \varepsilon_y, \sigma_{s2} = E_{s2} \cdot \varepsilon_{s2}, \text{ o jei ne, } \sigma_{s2} = \sigma_y$$

Čia: E_f – anglies pluošto tamprumo modulis, ε_y – plieninės armatūros takumo deformacija, E_{s1} ir E_{s2} – tempiamos ir gniuždomos armatūrų tamprumo moduliai, σ_y – armatūros takumo įtempiai.

Betono gniuždymo įtempių atstojamoji apskaičiuojama taikant formulę:

$$F_c = 0,85 \cdot \psi \cdot f_c \cdot b \cdot x \quad (3.13)$$

Čia: f_c – betono griuždomasis stipris, b – skerspjūvio plotis, ψ – koeficientas naudojamas tikrajai griuždomojo betono deformacijos diagramai pakeisti į stačiakampę.

Skaičiuojant griuždomos zonos aukštį priimta, kad ribinės deformacijos vertė betone ir tempiamoje armatūroje pasiekama vienu metu. Horizontalių jėgų pusiausvyra aprašoma lygtimi:

$$0,85 \cdot \psi \cdot f_c \cdot b \cdot x + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = f_{s1} \cdot A_{s1} + \sigma_f \cdot A_f \quad (3.14)$$

Čia: σ_c – įtempiai griuždomame betone, f_{s1} – tempiamos armatūros stipris, A_{s2} – griuždomos armatūros plotas, A_{s1} – tempiamos armatūros plotas, A_f – anglies pluošto plotas. Neutrali ašis yra randama sprendžiant lygtį priartėjimo būdu.

Laikomoji galia skaičiuojama taikant šią formulę:

$$M = f_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - \gamma \cdot x) + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot (\gamma \cdot x - d_2) + \sigma_f \cdot A_f \quad (3.15)$$

Vadovaujantis ACI 440.2R-08 ir FIB biulletin 14 yra siūlomos koeficientų ψ ir γ vertės. ACI 440.2R-08 siūloma $\psi = 0,85$ ir $\gamma = 0,65 - 0,85$, priklausomai nuo betono stiprio. FIB biulletin 14 yra šiek tiek kitaip ir ši metodika išskiria du irties variantus. Pirmu atveju irtis vyksta griuždomoje zonoje ($\varepsilon_f < \varepsilon_{fu}$). Tokiu atveju yra siūloma $\psi = 0,8$ ir $\gamma = 0,4$. Antruoju atveju irtis jau vyksta kompozitinėje juostoje ($\varepsilon_f > \varepsilon_{fu}$) tada koeficientai yra skaičiuojami taikant formules:

$$\psi = 1000 \cdot \varepsilon_{ce} \cdot \left(0,5 - \frac{1000}{12} \cdot \varepsilon_{ce}\right), \text{ jei } \varepsilon_{ce} < 0,002 \quad (3.16)$$

$$\psi = 1 - \frac{2}{3000 \cdot \varepsilon_{ce}}, \text{ jei } 0,002 < \varepsilon_{ce} < 0,0035 \quad (3.17)$$

$$\gamma = \frac{8 - 1000 \cdot \varepsilon_{ce}}{4 \cdot (6 - 1000 \cdot \varepsilon_{ce})}, \text{ jei } \varepsilon_{ce} < 0,002 \quad (3.18)$$

$$\gamma = \frac{1000 \cdot \varepsilon_{ce} \cdot (3000 \cdot \varepsilon_{ce} - 4) + 2}{2000 \cdot \varepsilon_{ce} \cdot (3000 \cdot \varepsilon_{ce} - 2)}, \text{ jei } 0,002 < \varepsilon_{ce} < 0,0035 \quad (3.19)$$

FIB biulletin 14 lenkiamų gelžbetoninių elementų įlinkius siūlo skaičiuoti pagal formulę:

$$\omega = \omega_1 \cdot (1 - \zeta_b) + \omega_2 \cdot \zeta_b \quad (3.20)$$

Čia: ω_1 ir ω_2 – elemento įlinkiai iki plyšių susidarymo ir po to, kai atsiveria plyšiai. Šie įlinkiai randami pagal formules:

$$\omega_1 = k_m \cdot \frac{M_{cr} \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_{gt}} \quad (3.21)$$

$$\omega_2 = k_m \cdot \frac{M \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_{cr}} \quad (3.22)$$

Čia: I_{gt} ir I_{cr} – elemento skerspjūvio inercijos momentai iki plyšių susidarymo ir po to, kai atsiveria plyšiai, M_{cr} – plyšių atsivėrimo momentas, E_{cm} – kritinis betono tamprumo modulis, l – sijos tarpatramio ilgis. Koeficientas k_m vertina apkrovų išdėstymą ant elementų ir atrėmimo sąlygas. Koeficientas ζ_b randamas pagal formules:

$$\zeta_b = 0, \text{ kai } M < M_{cr}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \frac{M_{cr}}{M}, \text{ kai } M > M_{cr} \quad (3.23)$$

Čia: M – siją veikiantis lenkimo momentas. Koeficientų β_1 ir β_2 reikšmes siūloma priimti lygias 1, kai sijų armavimui naudojamos plieninė rumbuota armatūra ir kai apkrova yra trumpalaikė.

ACI 440.2R-08 metodika rekomenduoja gelžbetoninių lenkiamų elementų įlinkius apskaičiuoti pagal išraišką:

$$\omega = k_m \cdot \frac{M \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_e} \quad (3.24)$$

Inercijos momentas I_e randamas pagal formulę:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 \cdot I_{gt} + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right) \cdot I_{cr} \quad (3.25)$$

Čia: I_{gt} ir I_{cr} – elemento inercijos momentas iki plyšių susidarymo ir po to, kai atsiveria plyšiai.

3.3. Girhammaro metodas

Girhammaras (Girhammar 2009) pasiūlė metodiką sluoksniuotų konstrukcijų elgsenai vertinti. Šio metodo esmė ta, kad yra vertinamas prasislinkimas tarp sluoksnių. Šį metodą galima naudoti siekiant apskaičiuoti įlinkius, vidines jėgas ir įtempius. Šis metodas išsiskiria tuo, kad skaičiavimuose yra naudojamas efektyvusis elemento lenkiamasis standumas EI_{eff} . Šis standumas priklauso nuo dviejų bedimensių parametrų: bendro sluoksnių darbo parametro ir santykinio lenkiamojo standžio parametro. Šių parametrų nustatymui naudojamas jungties standumas – K. Bendras sluoksnių darbo parametras nustatomas naudojant formulę:

$$\alpha L = \sqrt{\frac{K \cdot r^2}{EI_0 \cdot \left(1 - \frac{EI_0}{EI_\infty}\right)}} \cdot L \quad (3.26)$$

Santykinis lenkiamasis standžio parametras surandamas iš formulės:

$$\frac{EI_0}{EI_\infty} = \left(1 + \frac{EA_p \cdot r^2}{EA_0 \cdot EI_0}\right)^{-1} \quad (3.27)$$

$$EI_0 = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad (3.28)$$

$$EI_\infty = EI_0 + \frac{EA_p \cdot r^2}{EA_0} \quad (3.29)$$

$$EA_0 = E_1 A_1 + E_2 A_2 \quad (3.30)$$

$$EA_p = E_1 A_1 + E_2 A_2 \quad (3.31)$$

Čia: $E_1 I_1$ ir $E_2 I_2$ – lenkiamieji kiekvieno kompozitinį elementą sudarančio sluoksnio standžiai, EI_0 – elemento lenkiamasis standumas, kai sluoksniai gali prasislinkti, EI_∞ – elemento lenkiamasis standumas, kai sluoksniai visiškai standūs, $E_1 A_1$ ir $E_2 A_2$ – ašiniai kiekvieno kompozitinį elementą sudarančio sluoksnio standžiai, EA_0 – visų sluoksnių ašinių standžių suma, EA_p – visų sluoksnių ašinių standžių sandauga, r – atstumas tarp sluoksnių svorio centrų.

Efektyvusis lenkiamasis elemento standumas apskaičiuojas iš formulės:

$$EI_{eff} = \left(1 + \frac{\frac{EI_{\infty} - 1}{EI_0}}{1 + \left(\frac{\mu}{\pi}\right)^2 \cdot (\alpha L)^2} \right)^{-1} \cdot EI_{\infty} \quad (3.32)$$

Čia: μ – parametras, priklausantis nuo sijos atrėmimo sąlygų.

Kai sluoksniai gali pasislinkti vienas kito atžvilgiu, tokiu atveju įlinkis apskaičiuojamas:

$$w_{eff} = \frac{EI_{\infty}}{EI_{eff}} \cdot w_{\infty} \quad (3.33)$$

Čia: w_{eff} – įlinkis sijos, kurios sluoksniai nėra standžiai sujungti, w_{∞} - sijos įlinkis, kai sluoksniai yra standūs.

Įrašos randamos pagal formules:

$$N_{i,eff} = \pm \left(1 - \frac{EI_{\infty}}{EI_{eff}} \right) \cdot \frac{M}{r} \quad (3.34)$$

$$M_{i,eff} = \frac{E_i I_i}{EI_{eff}} \cdot M \quad (3.35)$$

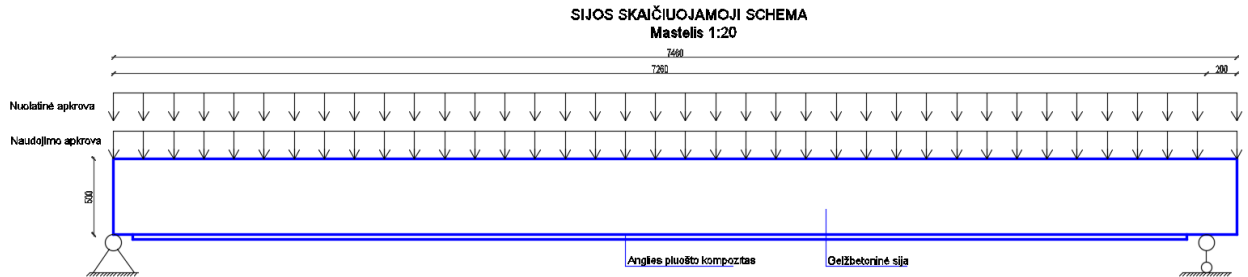
Čia: M – siją veikiantis lenkimo momentas.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Šiame skyriuje pateikiamos anglies pluošto juosta sustiprintų elementų skaičiavimo metodikos.
2. Sudėtinių strypų metodikoje vertinama, kad kompozitinio sluoksnio sukibtis su betonu yra standi ir poslinkio tarp sluoksnių nėra. Remiantis šia metodika elemento laikomajai galiai sudaroma vidinių ir išorinių jėgų pusiausvyros lygtis.
3. Girhammaro metodika skirta sluoksnuotų konstrukcijų elgsenai vertinti. Šio metodo esmė, kad yra vertinamas prasislinkimas tarp sluoksnių. Ši metodą galima naudoti siekiant apskaičiuoti įlinkius, vidines jėgas ir įtempius. Šis metodas išsiskiria tuo, kad skaičiavimuose yra naudojamas efektyvusis elemento lenkiamasis standumas EI_{eff} .
4. Vadovaujantis metodika paremta ACI 440.2R-08 ir FIB biulletin yra daromos prielaidos, kad betono tempiamasis stipris nėra vertinamas; galioja plokščių pjūvių hipotezė ir ryšys tarp skirtingų medžiagų sluoksnių yra standus.

4. Gelžbetoninės lenkiamos sijos elgsenos tyrimas

4.1. Skaičiuojama šalutinė sija, kuri bus padedama ant kolonų ir bus naudojama kaip perdanga, laikanti konstrukciją



4.1 pav. Sijos skaičiuojamoji schema

4.1 lentelė. Sijos apkrovų skaičiavimas

Apkrovų rūšis (storis, tankis)	Apkrovos, kN/m^2		Apkrovų dalinis Koefficientas γ_G
	Charakteristinės	Skaičiuojamosios	
1. Nuolatinė Betono sluoksnis $24 \cdot 0,08$ Garo izoliacija Politileninis putplastis $0,25 \cdot 0,05$ Kiaurymėta plokštė 250mm	1,92	2,59	1,35
Nuolatinė	$g_{k0} = 5,965$	$g_{d0} = 8,051$	1,35
Naudojimo	$q_{k0} = 2,5$	$q_{d0} = 3,25$	1,3
Suminė	$p_{k0} = 7,965$	$p_{d0} = 11,301$	

Čia: g_{k0} – skaičiuojamoji charakteristinė apkrova kN/m^2 , γ_G – nuolatinės apkrovos dalinis patikimumo koeficientas.

Sijos tarpatramio skaičiuotinis ilgis:

$$l_{eff} = l - a - c = 7,96 - 0,2 \cdot 0,5 = 7,26 \text{ m} \quad (4.1)$$

Skaičiuotinės apkrovų poveikių reikšmės saugos ribiniams būviams:

Sijos savojo svorio apkrovos reikšmė:

$$p_{d2} = a \cdot b \cdot \rho \cdot \gamma_G = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 25 \cdot 1,35 = 5,063 \text{ kN/m} \quad (4.2)$$

Sijos nuolatinės apkrovos reikšmė:

$$p_{d1} = 11,301 \cdot 3,25 = 36,728 \text{ kN/m} \quad (4.3)$$

Bendra veikianti apkrova:

$$p_d = p_{d1} + p_{d2} = 5,063 + 36,728 = 41,791 \text{ kN/m} \quad (4.4)$$

Skaičiuotiniai poveikių efektai saugos ribiniams būviams (nuolatinei situacijai):

Didžiausias lenkimo momentas:

$$M_{ED} = \frac{p_d \cdot l_{eff}^2}{8} = \frac{41,791 \cdot 7,26^2}{8} = 275,338 \text{ kNm} \quad (4.5)$$

Didžiausia skersinė jėga:

$$V_{ED} = \frac{p_d \cdot l_{eff}}{2} = \frac{41,791 \cdot 7,26}{2} = 151,701 \text{ kN} \quad (4.6)$$

Skerspjūvio matmenys $b \times h = 300 \times 500 \text{ mm}$, $a_1 = a_2 = 40 \text{ mm}$. Tempiamosios zonos armatūra $4\phi 28 \text{ S400}$ ($A_{s1} = 2462 \text{ mm}^2$, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1,1} = 365 \text{ MPa}$ ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)). Gniuždoma armatūra $2\phi 14 \text{ S400}$ ($A_{s2} = 308 \text{ mm}^2$, $f_{ycd} = 218 \text{ MPa}$ ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)). Betono klasė C30/37. Išorinių apkrovų sukeltas skaičiuojamasis momentas $M_{ED} = 275,338 \text{ kNm}$.

Čia: f_{yk} – plieno stipris pagal takumo ribą, γ_s – medžiagos patikimumo koeficientas.

Naudingas skerspjūvio aukštis $d = 500 - 40 = 460 \text{ mm}$. Betono skaičiuojamasis gniuždomasis stipris:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,9 \cdot 1 \cdot \frac{30}{1,5} = 18 \text{ N/mm}^2 \quad (4.7)$$

Čia: f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris, γ_c – betono dalinis patikimumo koeficientas.

Gniuždomos betono zonos apskaičiavimas:

$$\omega = \alpha - 0,008 \cdot f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 18 = 0,706 \quad (4.8)$$

Gniuždomos zonos santykinis ribinis aukštis:

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,lim}}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right) = \frac{0,706}{1 + \frac{365}{500}} \left(1 - \frac{0,706}{1,1}\right) = 0,560 \quad (4.9)$$

$$\xi_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{s1} - f_{scd} \cdot A_{s2}}{f_{cd} \cdot b \cdot d} = \frac{365 \cdot 2462 - 218 \cdot 308}{18 \cdot 300 \cdot 460} = 0,335 < 0,586 \quad (4.10)$$

Čia: α – koeficientas, įvertinantis betono rūšį, A_{s1} – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas, A_{s2} – gniuždomos armatūros skerspjūvio plotas.

Todėl elementas yra neperarmuotas ir gniuždomos zonos aukštis: $x = \xi \cdot d = 0,335 \cdot 460 = 154,1 > 2 \cdot a_2 = 80 \text{ mm}$.

Tikriname sąlygą

$$M_{Ed} = M_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot x(d - 0,5x) + f_{scd} \cdot A_{s2}(d - a_2) \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= 18 \cdot 300 \cdot 154,1(460 - 0,5 \cdot 154,1) + 218 \cdot 308(460 - 40) \\ &= 18 \cdot 0,3 \cdot 0,1541(0,46 - 0,1541) + 218 \cdot 0,308 \cdot 10^{-4}(0,46 - 0,04) \\ &= 321,488 \text{ kNm} > 275,338 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Patikrinę gelžbetoninės sijos laikomąją galią pagal esamą situaciją matome, kad sijos laikomosios galios pakanka.

Pagrindinėje pasatato dalyje yra įrengta antrasolė, kurioje yra buitinės patalpos. Antrasolei yra naudojamos surenkamos gelžbetoninės sijos ir kiaurymėtos perdangos plokštės. Visos konstrukcijos parinktos pagal pastato numatytą paskirtį. Kadangi numatoma antrasolės paskirtį pakeisti, buitines patalpas perkelti kitur, o antrasolėje padaryti sandėliavimo vietą, būtina patikrinti ar užteks esamų konstrukcijų.

4.2 lentelė. Sijos apkrovų skaičiavimas

Apkrovų rūšis (storis, tankis)	Apkrovos, kN/m ²		Apkrovų dalinis koeficientas
	Charakteristinės	Skaičiuojamosios	
1. Nuolatinė Betono sluoksnis 24 · 0,08 Garo izoliacija Politileninis putplastis 0,25 · 0,05 Kiaurymėta plokštė 250mm	1,92 0,002 0,013 4,03	2,59 0,003 0,018 5,44	1,35 1,35 1,35 1,35
Nuolatinė Naudojimo	$g_{k0} = 5,965$ $q_{k0} = 7,5$	$g_{d0} = 8,051$ $q_{d0} = 9,75$	1,35 1,3
Suminė	$p_{k0} 13,465$	$p_{d0} = 17,801$	

Sijos tarpatramio skaičiuotinis ilgis:

$$l_{eff} = l - a - c = 7,96 - 0,2 \cdot 0,5 = 7,26 \text{ m} \quad (4.12)$$

Skaičiuotinės apkrovų poveikių reikšmės saugos ribiniams būviams:

Sijos savojo svorio apkrovos reikšmė:

$$p_{d2} = a \cdot b \cdot \rho = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 25 = 3,75 \text{ kN/m} \quad (4.13)$$

Sijos nuolatinės apkrovos reikšmė:

$$p_{d1} = 17,801 \cdot 3,25 = 57,853 \text{ kN/m} \quad (4.14)$$

Bendra veikianti apkrova:

$$p_d = p_{d1} + p_{d2} = 3,75 + 57,853 = 61,603 \text{ kN/m} \quad (4.15)$$

Skaičiuotiniai poveikių efektai saugos ribiniams būviams (nuolatinei situacijai):

Didžiausias lenkimo momentas:

$$M_{ED} = \frac{p_d \cdot l_{eff}^2}{8} = \frac{61,603 \cdot 7,26^2}{8} = 405,868 \text{ kNm} \quad (4.16)$$

Didžiausia skersinė jėga:

$$V_{ED} = \frac{p_d \cdot l_{eff}}{2} = \frac{61,603 \cdot 7,26}{2} = 223,619 \text{ kN} \quad (4.17)$$

Statinyje esančioje antrasolėje yra naudojamos kiaurymėtos HCS250 perdangos plokštės, kurių laikomoji galia $21,5 \text{ kN/m}^2$. Pasikeitus antrasolės paskirčiai ir padidėjus apkrovai matome, kad perdangos plokštės laikomoji galia vistiek yra pakankama $21,5 \text{ kN/m}^2 > 17,801 \text{ kN/m}^2$, ir galime toliau naudoti tas pačias perdangos plokštes. Tinkrinant sijas, ant kurių sumontuotos perdangos plokštės, pasikeitus paskirčiai, matyti, kad sijos yra per silpnos $M_{Rd} = 321,488 \text{ kNm} < M_{Ed} = 405,868 \text{ kNm}$. Kadangi sijos stiprumas yra nepakankamas, nuspręsta ją stiprinti.

Sijos stiprinimui pasirenkamas anglies pluoštas.

4.3 lentelė. Sijos duomenys

Sijos ilgis l	7,26m
Sijos plotis b	300mm
Sijos naudingo skerspjūvio aukštis d	460mm
Sijos aukštis	500mm

Betono stipris	30 N/mm^2
Armatūros stipris	365 N/mm^2
Momentas	321,448 kNm
Armatūra	4ø28mm, 2ø14mm

MAPEI gamintojo pateikiamos charakteristikos kompozito medžiagoms

4.4 lentelė. Anglies pluošto techniniai duomenys

Techniniai duomenys (tipinės reikšmės)	
Produkto indentifikavimas	
Pluošto tipas:	Didelio stiprumo anglies pluoštas
Išvaizda:	Vienkryptis audinys
MAPEWRAP C UNI-AX	
Svoris (g/m^2)	600
Tankis (kg/m^3)	1800
Ekvivalentinis sauso audinio storis (mm)	0,666
Atsparumas apkrovai pločio vienetui (mm^2/m)	666,6
Tempiamasis stipris (N/mm^2)	4830
Maksimali apkrova pločio vienetui (kN/m)	>1600
Tamprumo modulis tempiant (N/mm^2)	230000
Galimas pailgėjimas (%)	2

4.2. Sudėtinių strypų teorijos skaičiavimo metodas

Remiantis sudėtinių strypų teorija, sijos laikomoji galia randama pagal formulę:

$$M_R = k(x) \cdot M_{R0} \quad (4.18)$$

$$M_R = 0,96 \cdot 429,091 = 411,927 \text{ kNm}$$

Čia: M_{R0} – sijos laikomoji galia, kai ryšys tarp sluoksnių yra visiškai standus. Šis dydis randamas pagal formulę:

$$M_{R0} = f_e \cdot A_e \cdot (h - 0,5 \cdot x_{eff} - 0,5 \cdot h_e) + f_y \cdot A_y \cdot (h - 0,5 \cdot x_{eff} - a_{s1}) \quad (4.19)$$

$$M_{R0} = 4830 \cdot 66,6 \cdot (500,333 - 0,5 \cdot 238,417 - 0,5 \cdot 0,333) + 365 \cdot 2462 \cdot (500,333 - 0,5 \cdot 238,417 - 40) = 429,091 \text{ kNm}$$

Čia: f_e – sustiprinimui naudojamos kompozitinės juostos stipris, A_e – šios juostos skerspjūvio plotas, h – visas sustiprintos sijos aukštis, x_{eff} – betono gniuždomosios zonos aukštis, h_e – kompozitinės juostos aukštis, f_y – tempiamasis strypinės armatūros stipris, A_y – tempiamosios strypinės armatūros plotas, a_{s1} – atstumas nuo sijos skerspjūvio apačios iki tempiamosios strypinės armatūros centro .

Koeficientas $k(x)$ įvertina jungties tarp anglies pluošto ir betono standumą ir yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k(x) = \left(1 - \frac{ch(\lambda \cdot (0,5 \cdot l - a))}{\lambda \cdot x \cdot ch(0,5 \cdot \lambda \cdot l)} \cdot sh(\lambda \cdot x) \right) \quad (4.20)$$

$$k(x) = \left(1 - \frac{ch(0,024 \cdot (0,5 \cdot 7260 - 3500))}{0,024 \cdot 130 \cdot ch(0,5 \cdot 0,024 \cdot 7260)} \cdot sh(0,024 \cdot 130) \right) = 0,96$$

Čia: l – sijos tarpatramio ilgis, a – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėjimo taško, x – atstumas nuo atramos iki nagrinėjamo sijos taško, λ – jungties standumą vertinantis koeficientas. Šis koeficientas randamas remiantis formule:

$$\lambda = \sqrt{\alpha \cdot \gamma} = \sqrt{42,212 \cdot 1,312 \cdot 10^{-5}} = 0,024 \quad (4.21)$$

$$\alpha = \frac{b \cdot G_{weff}}{z} = \frac{300 \cdot 35,2}{250,167} = 42,212 \quad (4.22)$$

$$\gamma = \frac{1}{E_{cm} \cdot A_{eff}} + \frac{1}{E_e \cdot A_e} + \frac{z^2}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \quad (4.23)$$

$$\gamma = \frac{1}{32 \cdot 10^3 \cdot 500} + \frac{1}{230 \cdot 10^3 \cdot 0,333} + \frac{(250,167)^2}{32 \cdot 10^3 \cdot 3125 \cdot 10^6} = 1,312 \cdot 10^{-5}$$

Čia: b – sijos skerspjūvio plotis, z – atstumas nuo sustiprintos sijos skerspjūvio centro iki kompozitinės juostos centro, E_{cm} – betono tamprumo modulis, E_e – kompozitinės juostos tamprumo modulis, A_{eff} – efektyvusis skerspjūvio plotas, I_{eff} – efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas, G_{weff} – jungties tarp sluoksnių standumas. Šis standumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_{weff} = 0,001 \cdot K \cdot E_{cm} = 0,001 \cdot 1,1 \cdot 32 \cdot 10^3 = 35,2 \quad (4.24)$$

Čia: K – koeficientas įvertinantis papildomą kompozitinės juostos tvirtinimą prie gelžbetoninės sijos.

Skaičiuojant betono gniuždomos zonos aukštį priimama, kad visų siją sudarančių komponentų įtempių reikšmės yra lygios medžiagų, iš kurių pagaminti tie komponentai, stipriams. Gniuždomos zonos aukštis randamas taikant formulę:

$$x_{eff} = \frac{f_e \cdot A_e + f_{y1} \cdot A_{s1} + f_{y2} \cdot A_{s2}}{f_c \cdot b} \quad (4.25)$$

$$x_{eff} = \frac{4830 \cdot 66,6 + 365 \cdot 2462 + 218 \cdot 308}{18 \cdot 300} = 238,417 \text{ mm}$$

Čia: f_{y1} – tempiamos armatūros stipris, f_{y2} – gniuždomosios armatūros stipris, f_c – betono stipris, A_{s1} – tempiamosios armatūros plotas, A_{s2} – gniuždomos armatūros plotas, b – skerspjūvio plotis.

4.3. Skaičiavimai atliekami vadovaujantis ACI 440.2R-08

Pirmas žingsnis – apskaičiuojame FRP sistemos medžiagos savybes.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = 0,95 \cdot 4830 = 4588,5 \text{ N/mm}^2 \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* = 0,95 \cdot 0,02 = 0,019 \text{ mm/mm} \quad (4.27)$$

Čia: C_E - aplinkosaugos mažinamas koeficientas 0,95

Antras žingsnis – preliminarūs skaičiavimai

Betono sąvybės: dydis β_1 – imamas iš ACI 318-05

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{f_c'}{6,9} = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{30}{6,9} = 0,833 \quad (4.28)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{30} = 25,743 \text{ kN/mm}^2 \quad (4.29)$$

Savybės esamos armatūros:

$$A_s = n(A) = 4 \cdot 615,44 + 2 \cdot 153,86 = 2770 \text{ mm}^2 \quad (4.30)$$

Savybės išoriškai sustiprinto FRP sluoksniu:

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f = 1 \cdot 0,333 \cdot 300 = 99,9 \text{ mm}^2 \quad (4.31)$$

Trečias žingsnis – nustatoma esama situacija

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DE}(d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c} = \frac{100,8(500 - 0,334 \cdot 460)}{3125 \cdot 10^6 \cdot 25,743} = 0,00043 \quad (4.32)$$

Ketvirtas žingsnis – nustatoma esama situacija

Nustatomas FRP sistemos konstrukcinis šampas

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.33)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{30}{1 \cdot 230000 \cdot 0,333}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,008 \leq 0,9 \cdot 0,019 = 0,0171$$

Penktas žingsnis – įvertinimas dydis c , neutralios ašies gylis

$$c = 0,2 \cdot d = 0,2 \cdot 460 = 92\text{mm} \quad (4.34)$$

Šeštas žingsnis – nustatomas efektyvusis sijos sustiprinimas FRP sistema

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (4.35)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{500 - 92}{92} \right) - 0,00043 \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,0129 > 0,008$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,008$$

Kadangi FRP kontroliuoja pažeistą vietą, tai betono konstrukcijos pažeidimas turi būti mažesnis nei 0,003 ir apskaičiuojamas pagal:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (4.36)$$

$$\varepsilon_c = (0,008 + 0,00043) \left(\frac{92}{500 - 92} \right)$$

$$\varepsilon_c = 0,0019$$

Perskaičiavimas:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{500 - 221}{221} \right) - 0,00043 \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,0034 < 0,008$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,0037$$

$$\varepsilon_c = (0,0034 + 0,00043) \left(\frac{221}{500 - 221} \right)$$

$$\varepsilon_c = 0,003$$

Septintas žingsnis – apskaičiuojamas esamos konstrukcijos armatūrinis plienas

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (4.37)$$

$$\varepsilon_s = (0,008 + 0,00043) \left(\frac{460 - 92}{500 - 92} \right) = 0,0076$$

Perskaičiavimas:

$$\varepsilon_s = (0,0037 + 0,00043) \left(\frac{460 - 221}{500 - 221} \right) = 0,0033$$

Aštuntas žingsnis – apskaičiuojamas spaudimo stipris armatūroje ir FRP sluoksnyje

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y \quad (4.38)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (4.39)$$

$$f_s = 200 \cdot 0,0076 \leq f_y$$

$$f_s = 1,52 \text{ kN/mm}^2 \leq 0,4 \text{ kN/mm}^2$$

Priimame $f_s = 0,4 \text{ kN/mm}^2$

$$f_{fe} = 230 \cdot 0,008 = 1,84 \text{ kN/mm}^2$$

Perskaičiavimas:

$$f_s = 200 \cdot 0,0033 \leq f_y$$

$$f_s = 0,66 \text{ kN/mm}^2 \leq 0,4 \text{ kN/mm}^2$$

Priimame $f_s = 0,4 \text{ kN/mm}^2$

$$f_{fe} = 230 \cdot 0,0034 = 0,792 \text{ kN/mm}^2$$

Devintas žingsnis – apskaičiuojama vidutinė jėga ir patikrinama pusiausvyra

Betono veiksniai apskaičiuojami:

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c} \frac{4 \cdot 0,002 - 0,0019}{6 \cdot 0,002 - 2 \cdot 0,0019} = 0,744 \quad (4.40)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} = \frac{3 \cdot 0,002 \cdot 0,0019 - 0,0019^2}{3 \cdot 0,744 \cdot 0,002^2} = 0,873 \quad (4.41)$$

Kur ε_c' – deformacija:

$$\varepsilon_c' = \frac{1,7f_c'}{E_c} = \frac{1,7 \cdot 30}{25743} = 0,002 \quad (4.42)$$

Jėgos pusiausvyros patikrinimas pagal c:

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (4.43)$$

$$c = \frac{2770 \cdot 400 + 99,9 \cdot 1840}{0,873 \cdot 30 \cdot 0,744 \cdot 300}$$

$$c = 221 \neq 92$$

Sąlyga nėra tenkinama.

Perskaičiavimas:

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot 0,002 - 0,003}{6 \cdot 0,002 - 2 \cdot 0,003^2} = 0,8333$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot 0,002 \cdot 0,003 - 0,003^2}{3 \cdot 0,8333 \cdot 0,002^2} = 0,9$$

Dešimtas žingsnis – koreguojamas dydis c, kol yra tenkinama pusiausvyra

6-9 etapai yra pakartojami su tinkama c reikšme ir galutiniai rezultatai yra:

$$c = \frac{2770 \cdot 400 + 99,9 \cdot 792}{0,9 \cdot 30 \cdot 0,8333 \cdot 300} = 175,88$$

Sąlyga tenkinama

Vienuoliktas žingsnis – skaičiuojame lenkimo jėgos komponentus

Skaičiuojama konstrukcinė lenkimo jėga. Papildomas sumažinimo koeficientas $\psi_f = 0,85$ taikomas FRP sistemai.

Plieno įtaka lenkimui:

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (4.44)$$

$$M_{ns} = 2770 \cdot 400 \left(460 - \frac{0,833 \cdot 175,88}{2} \right) = 430,02 kNm$$

FRP įtaka lenkimui:

$$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (4.45)$$

$$M_{nf} = 99,9 \cdot 792 \left(500 - \frac{0,833 \cdot 175,88}{2} \right) = 33,76 kNm$$

Dvyliktas žingsnis - apskaičiuojame skerspjūvio projektinę lenkimo jėgą

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi_f \cdot M_{nf}] \quad (4.46)$$

$$\phi M_n = 0,9[430,02 + 0,85 \cdot 33,76]$$

$$\phi M_n = 412,844 > 405,868$$

Sąlyga pagal lenkimo jėgą yra tenkinama.

Tryliktas žingsnis - patikriname įtempius armuojančiame pliene ir FRP

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right) \quad (4.47)$$

$$k = \sqrt{\left(0,0201 \frac{200}{25,743} + 0,0007 \frac{230}{25,743}\right)^2 + 2 \left(0,0201 \frac{200}{25,743} + 0,0007 \frac{230}{25,743} \left(\frac{500}{460}\right)\right)} - \left(0,0201 \frac{200}{25,743} + 0,0007 \frac{230}{25,743}\right) = 0,431$$

$$k = 0,432 \cdot 460 = 198mm$$

Apskaičiuojami plieno įtempiai ir patikrinami, ar jie yra mažesni nei rekomenduojama riba

$$f_{ss} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3}\right)\right] (d - k \cdot d) E_s}{A_s \cdot E_s \left(d - \frac{k \cdot d}{3}\right) (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3}\right) (d_f - k \cdot d)} \quad (4.48)$$

$$f_{ss} = \frac{\left[279,45 + 0,00043 \cdot 99,9 \cdot 230 \left(500 - \frac{198}{3}\right)\right] (460 - 198) 200}{2770 \cdot 200 \left(460 - \frac{198}{3}\right) (460 - 198) + 99,9 \cdot 230 \left(500 - \frac{198}{3}\right) (500 - 198)} = 247N/mm^2$$

$$f_{ss} \leq 0,8f_y \quad (4.49)$$

$$f_{ss} = 247 \leq 0,8 \cdot 400 = 320N/mm^2$$

Keturioliktas žingsnis - patikriname plyšimo ribą naudojant FRP

Apskaičiuojam FRP įtempius, ar jie mažesni nei leistina riba

$$f_{f,s} = f_{ss} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d}\right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \quad (4.50)$$

$$f_{f.s} = 0,247 \left(\frac{230}{200} \right) \left(\frac{500 - 198}{460 - 198} \right) - 0,00043 \cdot 230 = 228 N/mm^2$$

$$f_{f.s} \leq 0,55 f_{fu} \quad (4.51)$$

$$f_{f.s} = 229 \leq 0,55 \cdot 4588,5 = 2524 N/mm^2$$

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Pasikeitus pastato paskirčiai nustatyta, kad antrasolę laikančios sijos netenkina sąlygų ir yra per silpnos. Priimtas sprendimas, kad sijos bus stiprinamos anglies pluoštu.

2. Pasirinktos dvi stiprinimo skaičiavimo metodikos. Vadovaujantis kiekviena metodika atlikti skaičiavimai ir gauti rezultatai palyginami.

3. Vadovaujantis sudėtinių strypų teorijos metodu sudarome išorinių ir vidinių jėgų pusiausvyros lygtį, įvertindami tai, kad jungtis tarp betono ir anglies pluošto yra standi, ir taip gauname sustiprinto elemento laikomąją galią. Pagal šį skaičiavimo metodą gavome, kad šiuo atveju mums užtenka MapeWrap C UNI-AC 66,6mm² skersmens anglies pluošto kompozito juostos. Šiame metode nėra vertinami jokie pašaliniai veiksniai, o randama tik maksimali galia.

4. Skaičiavimo metodika vadovaujantis ACI 440.2R-08 taip pat priima, kad jungtis tarp betono ir anglies pluošto yra standi. Tačiau ši metodika skiriasi nuo praeitos ir yra kažkiek detalesnė. Taip pat ši metodika įvertina galimus elementų plyšimus, dėl to skaičiavimų gauti rezultatai skiriasi. Pagal šį metodą buvo paskaičiuota, kad užtenka MapeWrap C UNI-AC 99,9mm² skersmens anglies pluošto kompozito juostos.

5. Atlikus skaičiavimus dviem metodikom buvo gauti skirtingi rezultatai. Kadangi antrasis skaičiavimo metodas pasirodė kiek tikslesnis ir patikimesnis, priimame, kad stiprinimui reikalinga 99,9mm² skersmens anglies pluošto kompozito juosta.

5. Ekonominis palyginimas

Atlikus skaičiavimus bei pasirinkus, koks bus naudojamas anglies pluošto kompozitas, atliekamas ekonominis palyginimas.

Palyginimui naudojama kompiuterinė programa „Sistela“. Konstrukcijų gamybos ir montavimo kainos nustatomos sudarant lokalinę sąmatą. Lokalinė sąmata gali būti apibūdinama kaip reikiamų investicijų poreikis konstrukcijų gamybai ir montavimui pagal statybos darbus. Lokalinėje sąmatoje nurodomi visi atliekami darbai, reikalingos medžiagos, jų kiekiai, reikalingi mechanizmai, kainos ir suminės vertės.

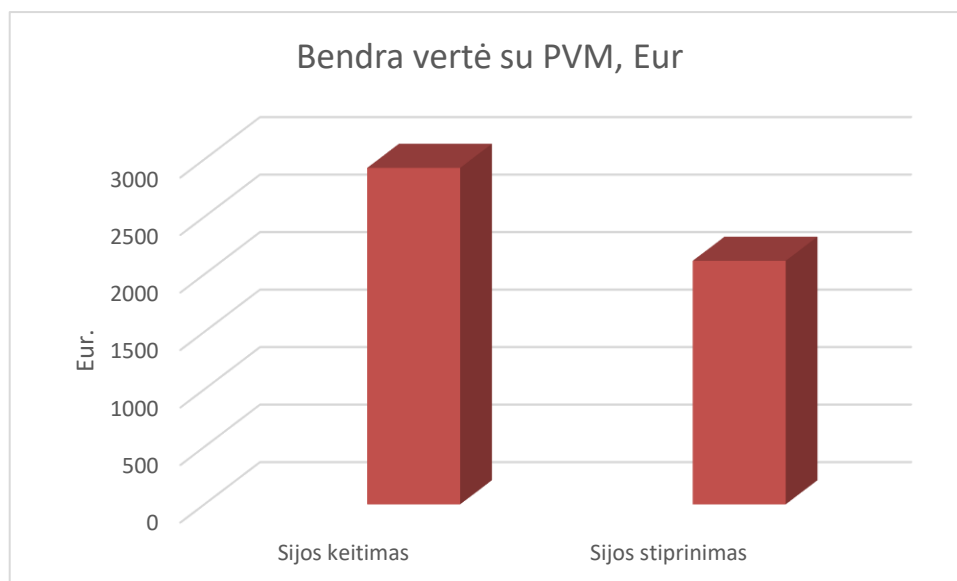
Konstrukcijų kainas sudaro tiesioginės ir netiesioginės išlaidos:

- +3% papildomų medžiagų vertės nuo bendros medžiagų vertės;
- +3% papildomų mechanizmų vertės nuo bendros mechanizmų vertės;
- Darbo užmokesčio darbuotojams padidinimas: 15% sezoniniams darbams, 17% specifiniams darbams ir 8% papildomų darbų užmokestis;
- 31% socialinis draudimas, skaičiuojamas nuo pagrindinio užmokesčio;
- 9% papildomos statyb vietės išlaidos nuo bendrų statinio išlaidų.

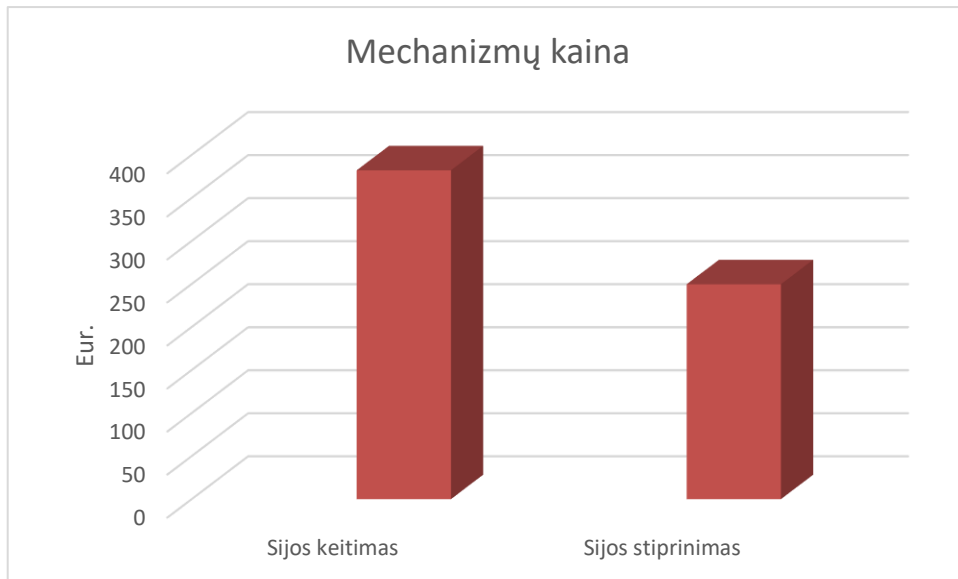
Netiesioginės išlaidos:

- 30% papildomos išlaidos, skaičiuojamos nuo darbininkų darbo užmokesčio;
- 5% pelnas, apskaičiuojamas nuo pridėtinių ir tiesioginių išlaidų bendros sumos.

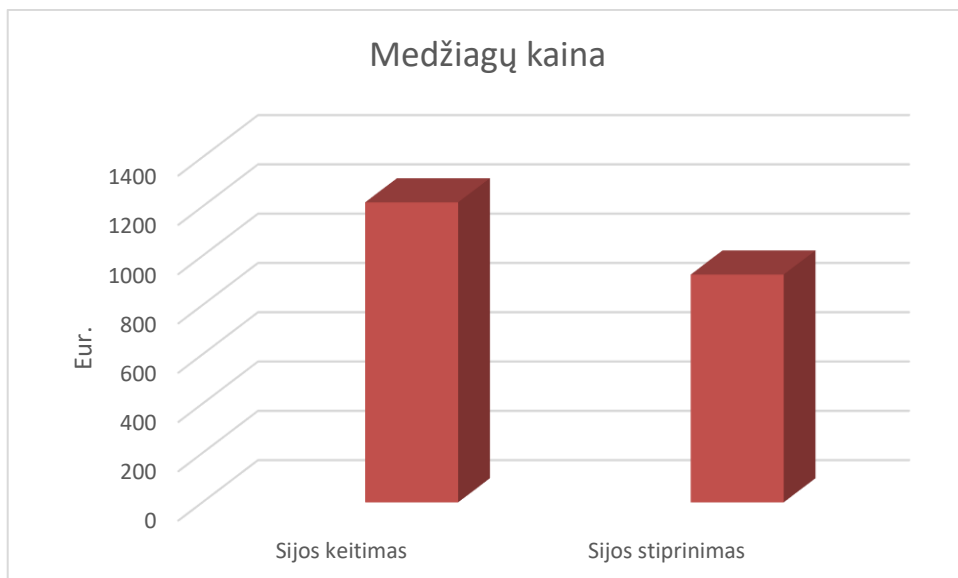
Lyginimui naudojamas pažeistos sijos pilnas keitimas ir pažeistos sijos stiprinimas, lyginamos gamybos ir montavimo kainos.



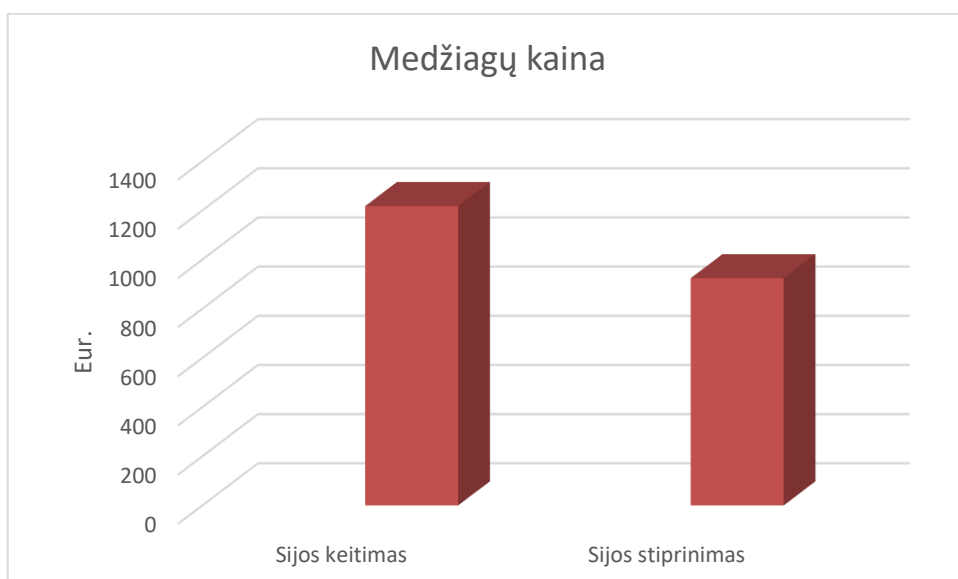
5.1 pav. Kainų palyginimas



5.2 pav. Mechanizmų kainų palyginimas



5.3 pav. Medžiagų kainų palyginimas



5.4 pav. Darbo užmokesčio palyginimas

**LOKALINĖ
SĄMATA**

Sudaryta pagal
2017.10 kainas

Statinių grupė **00 Magistro baigiamasis projektas**

Statinys **1 Efektyvūs gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo metodai**

Žiniaraštis **1 Sijos keitimas nauja sija**

Suma
žiniaraščiui
2925.25 EUR

2017.12.11

Sąm. eil.	Darbu ir išlaidų aprašymai	Mato vnt	Norma	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR
1	Sijos keitimo darbai					
1 N46-164		m3		1,5		
	Betono grind7 išardymas k8=1.17					
	Darbo sąn. kateg. 2.72	žm.val.	7,4	11,1	4,99	55,39
310235	Pneumoplaktukas, dirbant kilnojamu kompresoriumi	maš.val	5,3	7,95	7,31	58,11
N46-164	Darbo užm. 55.39 Medžiagos			Mechanizmai 58.11		Iš viso 113.50
2 N7P-0406		100m2		0,26		
	Gelžbetoninių kiaurymėtu perdangos plokščių demontavimas (aukštis 250 mm , plotas daugiau 5m2 iki 10m2) k1=1.05, k2=1.05, k8=1.03					
	Darbo sąn. kateg. 3.5	žm.val.	32,0	8,736	5,45	47,61
489131	Kranas	maš.val	8,0	2,184	45,01	98,3
489192	Vibratorius	maš.val	4,0	1,092	0,5	0,55
N7P-0406	Darbo užm. 47.61 Medžiagos			Mechanizmai 98.85		Iš viso 146.46
3 N7P-0302		vnt		1,0		
	Gelžbetoninių sijų (santvarų) demontavimas, kai sijos (santvaros) masė daugiau 3t iki 5t k1=1.05, k2=1.05					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	3,4	3,57	5,84	20,85
489131	Kranas	maš.val	1,12	1,176	45,01	52,93
N7P-0302	Darbo užm. 20.85 Medžiagos			Mechanizmai 52.93		Iš viso 73.78
4 N7P-0302		vnt		1,0		
	Gelžbetoninių sijų (santvarų) montavimas, tvirtinant varžtais, kai sijos (santvaros) masė daugiau 3t iki 5t k1=1.05, k2=1.05					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	3,4	3,57	5,84	20,85
261160	Gelžbetoninės sijos (santvaros)	m3	1,3	1,3	650,0	845,0
489131	Kranas	maš.val	1,12	1,176	45,01	52,93
N7P-0302	Darbo užm. 20.85 Medžiagos	845.00		Mechanizmai 52.93		Iš viso 918.78

5 N7P-0406		100m2		0,26		
	Gelžbetoninių kiaurymėtu perdangos plokščių montavimas (aukštis 250 mm , plotas daugiau 5m2 iki 10m2) k1=1.05, k2=1.05, k8=1.03					
	Darbo sąn. kateg. 3.5		žm.val.	32,0	8,736	5,45
600004	Cementinis skiedinys	m3		0,06		58,79
					0,0156	
600043	Betono mišiniai	m3		0,8	0,208	73,79
489131	Kranas	maš.val		8,0	2,184	45,01
489192	Vibratorius	maš.val		4,0	1,092	0,5
N7P-0406	Darbo užm. 47.61	Medžiagos 16.27		Mechanizmai 98.85		Iš viso 162.73
6 N11P-0302		100m2		0,26		
	Grindų šiltinamųjų (garso) izoliacijų įrengimas, naudojant izoliacines plokštes , kai putų polistireno plokštės storis 50 mm					
	Darbo sąn. kateg. 3.0		žm.val.	19,0	4,94	5,17
220098	Putų polistireno grindų izoliavimo plokštė	m3		10,3	2,678	51,91
489003	Keltuvai	maš.val		1,5	0,39	3,52
N11P-0302	Darbo užm. 25.54	Medžiagos 139.01		Mechanizmai 1.37		Iš viso 165.92
7 N11P-1508		T		0,1		
	Betoninių grindų armavimas tinklais k8=1.12					
	Darbo sąn. kateg. 3.0		žm.val.	12,0	1,2	5,17
93389	Armatūrinis tinklas	T		1,0	0,1	984,17
120341	Plieninė viela	kg		1,5	0,15	0,93
572318	Fiksatoriai armatūros tinklams	vnt		600,0	60,0	0,3
489131	Kranas	maš.val		0,4	0,04	45,01
N11P-1508	Darbo užm. 6.20	Medžiagos 116.56		Mechanizmai 1.80		Iš viso 124.56
8 N11P-1501		100m2		0,26		
	Armuotų betoninių grindų įrengimas šlifuojant - glaistant (be armavimo darbų), paduodant betoną siurbliu, kai sluoksnio storis 50 mm k4=0.5					
	Darbo sąn. kateg. 3.6		žm.val.	48,0	6,24	5,53
600048	Betono mišiniai C20/25	m3		10,2	1,326	75,79
489092	Betono siurblys	maš.val		1,5	0,195	41,53
489192	Vibratorius	maš.val		6,0	0,78	0,5
489220	Vibrosija	maš.val		6,0	0,78	2,9
489310	Vieno disko betono glaistytuvas	maš.val		10,6	1,378	4,69
N11P-1501	Darbo užm. 34.51	Medžiagos 100.50		Mechanizmai 17.21		Iš viso 152.22
Iš viso skyriuje	1 Darbo užm. 258.56	Medžiagos 1217.34		Mechanizmai 382.05		Iš viso 1857.95
Viso žiniaraštyje	1 Darbo užm. 258.56	Medžiagos 1217.34		Mechanizmai 382.05		Iš viso 1857.95
	Papildomų medžiagų vertė 3.00%				36,52	
	Papildomų mechanizmų vertė 3.00%					11,46
	Sezoniniai darbai 15.00% (0.00)					
	Specifiniai darbai 17.00%			13,02		
	Papildomas darbo užmokestis 8.00%(258.56+13.02)			21,73		
	Viso:			293,31		393,51
				1253,86		1940,68

Soc.draudimo išlaidos 31.00%(258.56+13.02+21.73)	90,93			
Statinio statybos išlaidos	Viso:	384,24	1253,86	393,51
Statybviētės išlaidos 9.00%				2031,61
Iš viso tiesioginės išlaidos				182,84
Pridėtinės išlaidos 30.00%(258.56+13.02+21.73)				2214,45
Pelnas 5.00%(2214.45+87.99)				87,99
Iš viso netiesioginės išlaidos				115,12
				203,11
			Bendra vertė be PVM	2417,56
Pridėtinės vertės mokesčiai 21.00%				507,69
			Bendra vertė su PVM	2925,25

LOKALINĖ SAMATA

Sudaryta pagal
2017.10 kainas

Statinių grupė **00 Magistro baigiamasis projektas**

Statiny **1 Efektyvūs gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimo metodai**

Žiniaraštis **2 Stiprinimas anglies pluoštu**

2017.12.11							Suma žiniaraščiui 2116.99 EUR
Sąm. eil.	Darbų ir išlaidų Aprašymai	Mato vnt	Norma	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR	
1	Stiprinimas anglies pluoštu						
1	HP11-3-12	m2		2,2			
	Gelžbetoninių atitvarų paviršiaus valymas k9=1.15						
	Darbo sąn. kateg. 3.0	žm.val.	5,57		5,17	63,35	
				12,254			
1570879	Kvarcinis smėlis	T	0,2	0,44	34,36	15,12	
1380003	Smėliasrovio aparatas	maš.val	0,083		2,9	0,53	
				0,1826			
1470235	Kompresorius su pneumoplaktukais	maš.val	0,083		7,81	1,43	
				0,1826			
HP11-3-12	Darbo užm. 63.35	Medžiagos 15.12		Mechanizmai 1.96		Iš viso 80.43	
2	H76T-42	m2		2,2			
	Remontuojamų betoninių paviršių padengimas apsauginėmis, epoksidinėmis dangomis, dažant du kartus rankiniu būdu k9=1.15						
	Darbo sąn. kateg. 3.44	žm.val.	3,82	8,404	5,45	45,8	
220023	Epoksidinių dervų kietiklis	kg		1,2	48,65	58,38	
			0,545455				
230034	Epoksidinis gruntas	kg		3,085	95,11	293,41	
			1,40227				

H76T-42	Darbo užm. 45.80	Medžiagos 351.79		Mechanizmai	Iš viso 397.59	
3 N13-135		m2		2,2		
	Betoninių paviršių apklijavimas anglies pluošto audinio vienu sluoksniu, naudojant epoksidinį užtepą					
	Darbo sąn. kateg. 3.63	žm.val.	4,97	10,934	5,6	61,23
230203	Silicio emalis (organinis) KO-88	kg	0,57	1,254	5,34	6,7
590070	Anglies pluošto audinys	m2	1,0	2,2	250,22	550,48
N13-135	Darbo užm. 61.23	Medžiagos 557.18		Mechanizmai	Iš viso 618.41	
4	349005 Montavimo bokštelis automobilio bazėje	maš.val	1,0	10,0	24,77	247,7
Iš viso skyriuje	1 Darbo užm. 170.38	Medžiagos 924.09		Mechanizmai 249.66	Iš viso 1344.13	
Viso žiniaraštyje	2 Darbo užm. 170.38	Medžiagos 924.09		Mechanizmai 249.66	Iš viso 1344.13	
	Papildomų medžiagų vertė 3.00%			27,72		
	Papildomų mechanizmų vertė 3.00%				7,49	
	Sezoniniai darbai 15.00% (109.15)		16,37			
	Specifiniai darbai 17.00%					
	Papildomas darbo užmokestis 8.00%(170.38+16.37)		14,94			
	Viso:		201,69	951,81	257,15	1410,65
	Soc.draudimo išlaidos 31.00%(170.38+16.37+14.94)		62,52			
	Statinio statybos išlaidos	Viso:	264,21	951,81	257,15	1473,17
	Statybvietės išlaidos 9.00%					132,59
	Iš viso tiesioginės išlaidos					1605,76
	Pridėtinės išlaidos 30.00%(170.38+16.37+14.94)					60,51
	Pelnas 5.00%(1605.76+60.51)					83,31
	Iš viso netiesioginės išlaidos					143,82
					Bendra vertė be PVM	1749,58
	Pridėtinės vertės mokestis 21.00%					367,41
					Bendra vertė su PVM	2116,99

5.1. Penktojo skyriaus išvados

1. Naudojantis sąmatos programa atliktas ekonominis palyginimas, kurio metu nustatyta, kurie darbai šiuo atveju yra pigesni kainos atžvilgiu. Pagal gautus lokalinės sąmatos rezultatus, matyti, kad gelžbetoninės sijos stiprinimas anglies pluošto juosta yra pigesnis nei sijos keitimas nauja. Sijos keitimas kainuotų 2925,25 eur, o sijos stiprinimas 2116,99eur, tai sijos keitimas yra 38% brangesnis. Detalizuojant darbų kainas, matyti, kad sijos keitimas nauja reikalauja didesnio darbo užmokesčio, taip pat ir medžiagų poreikio bei mechanizmų kaina yra didesnė. Visais atvejais matyti, kad šiam pastatui ekonomiškėnis variantas yra siją stiprinti anglies pluošto kompozitu.

Išvados

1. Analizės metu nustatyti pagrindiniai keliami reikalavimai, į kuriuos reikia atsižvelgti stiprinant konstrukcijas – kiek reikia padidinti laikomąją galią; stiprinamo elemento skaičiuojamosios schemos pakitimas; gabarito reikalavimai; numatoma darbų kaina bei koks yra darbų atlikimo terminas.

2. Atlikus stiprinimo metodų analizę padaryta prielaida, kad konstrukcijų stiprinimas anglies pluoštu yra vienas iš efektyviausių metodų, kadangi jis turi daug daugiau plusų negu kiti metodai. Taip pat analizėje nustatyta, kad dauguma tyrėjų siūlo rinktis būtent šią metodiką dėl jos pranašumų.

3. Atliktas dviejų metodikų tyrimas parodė, kad Sudėtinių strypų teorijos metodika vertina tik laikomąją galią, o ACI 440.2R-08 metodika dar atsižvelgia į galimus elementų plyšimus.

4. Abi metodikos vertina, kad jungtis tarp betono ir anglies pluošto yra standi.

5. Pagal Sudėtinių strypų ir ACI 440.2R-08 metodikas buvo atlikti skaičiavimai ir priimta, kad pagal pirmą metodiką yra reikalinga $66,6\text{mm}^2$ skersmens anglies pluošto juosta, o pagal antrąją – $99,9\text{mm}^2$. Gaunamas skirtumas atsiranda dėl metodikų nevienodumo.

6. Naudojantis „Sistela“ programos sudarytomis lokalinėmis sąmatomis nustatyta, kad šiam pastatui ekonomiškėnis variantas yra sijos stiprinimas anglies pluoštu nei keitimas nauja.

Literatūra ir šaltiniai

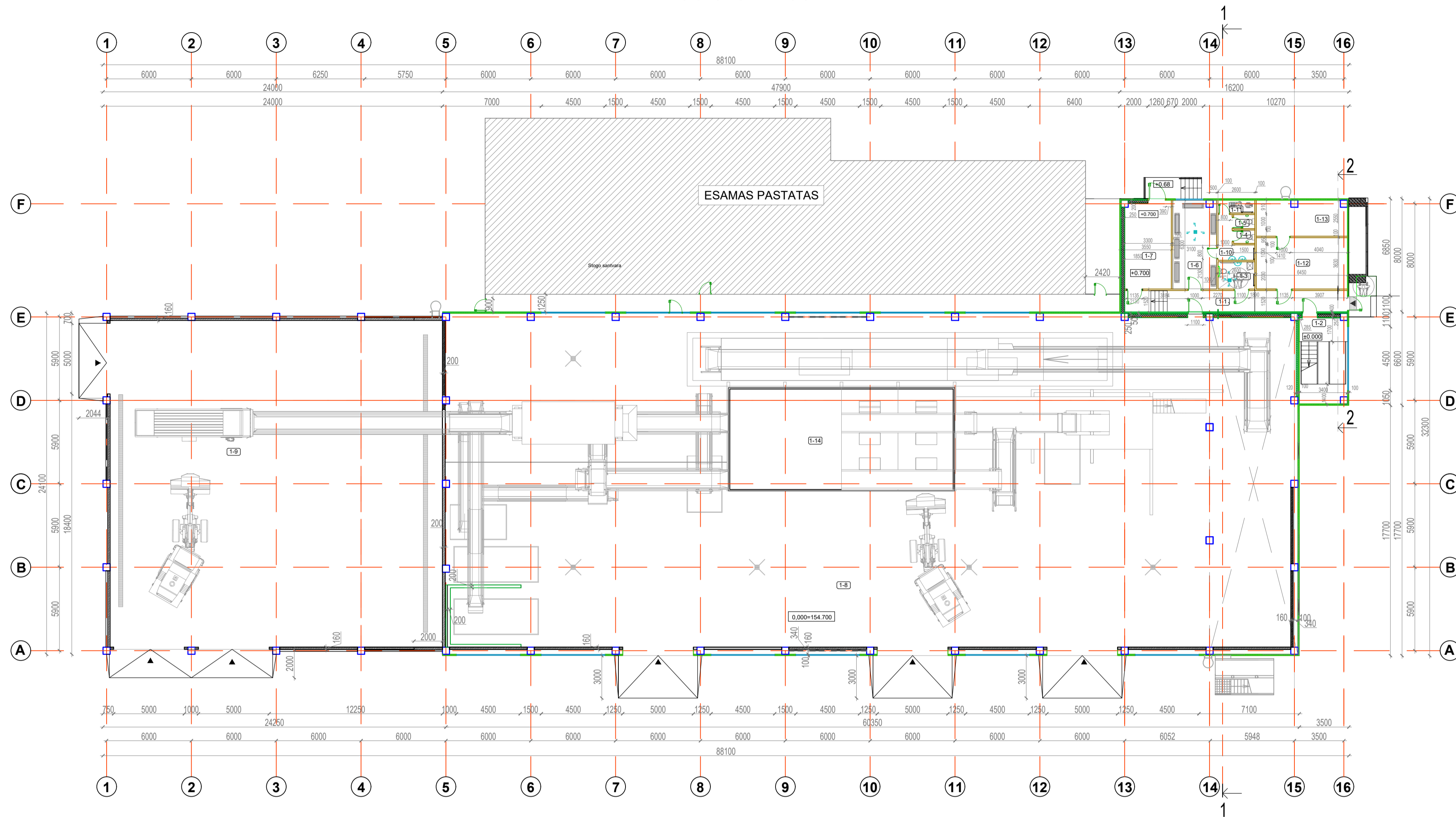
1. ACI Committee 440.2R. 2002. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI.
2. Barnes, R. A.; Baglin, P.S.; Mays, G.C.; Subedi, N.K. 2001. External steel plate systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams, *Eng. Struct.*, Vol. 23, pp.1162-1176.
3. Bartkevičius, J. 2014. *Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų mechaniškai tvirtinama armuoto polimero juosta, elgsenos tyrimas*: magistrinis darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 69 p.
4. Bonacci, J. F.; Maalej, M. 2001. Behavior Trends of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, No. 2, pp.102– 113.
5. Buyukozturk, O.; Karaca, E. 2002. Characterization and modeling of debonding in RC beams strengthened with FRP composites, *In: Proceedings 15.ASCE Engineering Mechanics Conference*, 2002.
6. Bulavs, F.; Radinsh, I.; Tirans, N. 2005. Improvement of capacity in bending by the use of FRP layers on RC beams, *Journal of Civil Engineering and Management XI(3)*: pp.169–174.
7. De Lorenzis. L.; Teng, J.G. 2007. Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures. *Composites Part B: Eng.*, Vol. 38(2), pp.119-143.
8. Demir, A.; Tekin, M. 2011. Strengthening of reinforced concrete (RC) beams with prefabricated reinforced concrete (RC) plates, *Scientific Research and Essays*, Vol. 6(21), 2011, pp. 4577-4586.
9. El-Mihilmy, M.T.; Tedesco, W.J. 2000. Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates. *J. Struct. Eng. ASCE.*, Vol. 126(6), pp.684-691. Eshwar, N.; Nanni, A.; Ibell, T.J. 2004. Effectiveness of CFRP Strengthening on Curved Soffit RC Beams, *Adv. Struct. Eng.*, Vol. 8(1) pp.55-68.
10. FIB (Fédération Internationale du Béton), 2007. Bulletin: FRP Reinforcement in RC Structures, Switzerland.
11. Girhammar, U. A. 2009. A simplified analysis method for composite beams with interlayer slip, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 51, 2009, pp.515– 530.
12. Jakubovskis, R.; Gudonis, E. 2011. Gelžbetoninių konstrukcijų tempiamojo sustandėjimo modeliavimas pagal Kinijos projektavimo normas, *14-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2011 metų teminės konferencijos straipsnių rinkinys: Statyba*, 2011.

13. Jumaat, M. Z. ; Alam, M. A. 2007. Plate bonded strengthened r.c. beams with end and intermediate anchors, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 2, 2007, pp.185–193.
14. Lamanna, A. J. 2002. Flexural strengthening of Reinforced Concrete Beams with Mechanically fastened Fiber-Reinforced Polymer Strips, *Ph.D Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering*, University of Wisconsin – Madison.
15. Pannirselvam, N.; Nagaradjane, V.; Chandramouli, K. 2009. Strength behaviour of fibre reinforced polymer strengthened beam, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 9, 2009, pp.34–39.
16. Pham, H.; Al-Mahaidi, R.; Sauma, V. 2006. Modeling of CFRP concrete bond using smeared and discrete cracks. *Comp. Struct.*, Vol. 75, pp.145-150.
17. Su, R.K.L.; Siu, W.H.; Smith, S.T. 2010. Effects of bolt plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams. *Eng. Struct.*, Vol. 32: pp.1769-1778.
18. Swamy, R. N.; Jones, R.; Charif, A. 1989. The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams, *The Structural Engineer*, Vol. 67, No. 3, pp.45-54.
19. Skuturna, T. 2009. *Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų anglies pluoštu, tyrimas: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 124 p.
20. Bank, L.C. 2004. Mechanically Fastened FRP (MF-FRP) Strips for Strengthening RC Structures – A Viable Alternative, *Proceedings of CICE 2004, 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2004.
21. Adhikary. B.B.; Mutsuyoshi, H. 2006. Shear strengthening of RC beams with webbonded continuous steel plates, *Const. Build. Mater.*, Vol. 20, pp.296-307.
22. Lu, X.Z.,; Teng, J.G.; Ye, L.P.; Jiang, J.J. 2005. Bond-Slip Models for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete, *Eng. Struct.*, Vol. 27(6) pp.920-937.
23. Swamy, R. N.; Jones, R.; Bloxam, J. W. 1987. Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates, *The Structural Engineer*, Vol. 65A, No. 2, pp.59-68.
24. FIB (Fédération Internationale du Béton), 2001. Bulletin 14: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Switzerland.
25. Arslan, G.; Sevuk, F.; Ekiz, I. 2008. Steel plate contribution to loadcarrying capacity of retrofitted RC beams, *Const. Build. Mater.*, Vol. 22, pp143-153.
26. Sevuk, F.; Arslan, G. 2005. Retrofit of damaged reinforced concrete beams by using steel plate. *In: Structures congress, ASCE*, 2005.
27. Ozcan, M.; Bayraktar, A.; Sahin, A.; Haktanır, T.; Turker, T. 2009. Experimental and finite element analysis on the steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Const. Build. Mater.*, Vol. 23 pp.1064–1077.
28. Daugevičius, M. 2010. *Ilgalaikės apkrovos įtaka anglies pluoštu sustiprintų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų elgsenai: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 150 p.

29. Kaklauskas, G.; Bačinskas, D.; Zamblauskaitė, R. 2006. *Gelžbetoninių elementų deformacijos*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 206 p.
30. Johnson, D. 2011. An Investigation for Strengthening Existing Reinforced Concrete Beams in Shear Using a MF-FRP Retrofit System, *M.Sc Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering*, University of Wisconsin – Madison.
31. Girdžius, R. 2011. *Betono tempiamojo sustandėjimo modelis atitinkantis Euronormų nuostatas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 128 p.
32. Lamanna, A. J.; Bank, L. C.; Scott, D. W. 2001. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips, *ACI Structural Journal*, Vol. 98, o. 3, pp.368-376.
33. Marciukaitis, G.; Balevicius, R. 2009. Sluoksniuotųjų konstrukcijų tempiu ir deformacijų buvimo bei valkšnumo analizė, veikiant ilgalaikiai apkrovai, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 1(3): 123–134.
34. Aniskevich, A. N.; Aniskevich, N. I. 1993. Effect of a uniaxial load on moisture absorption by an epoxy binder, *Mechanics of Composite Materials* 29(1): 85–89.

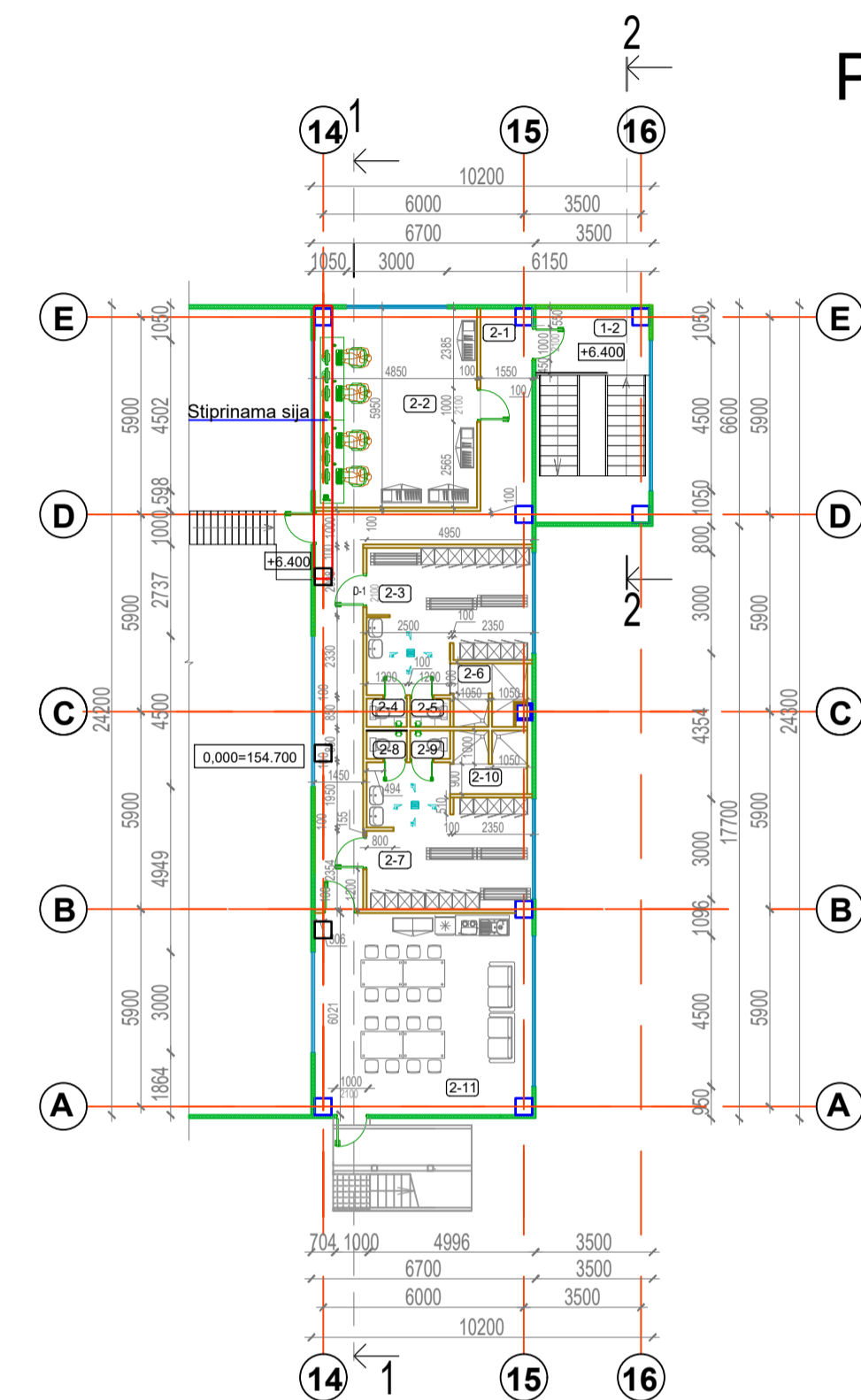
PIRMO AUKŠTO PLANAS

Mastelis 1:200



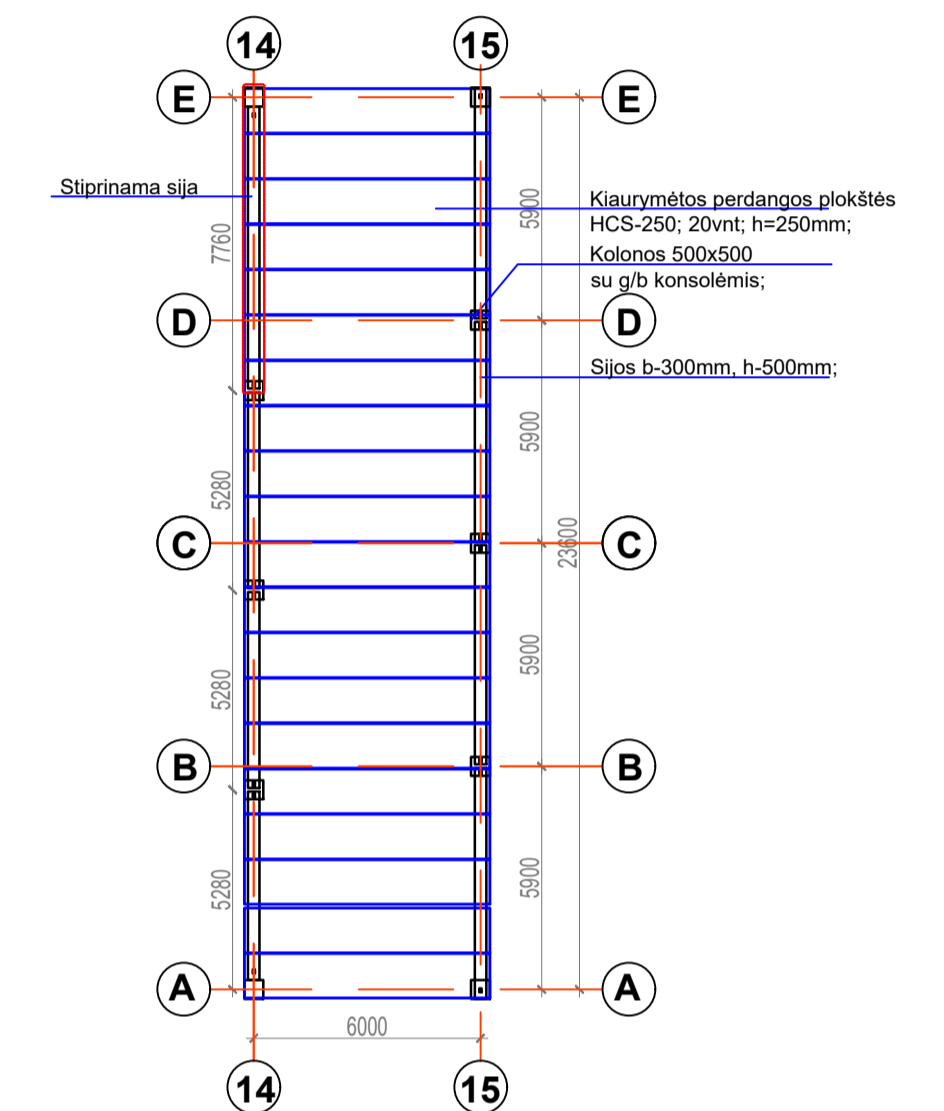
ANTRO AUKŠTO PLANAS

Mastelis 1:200



PERDANGŲ IR SIJŲ PLANAS

Mastelis 1:200

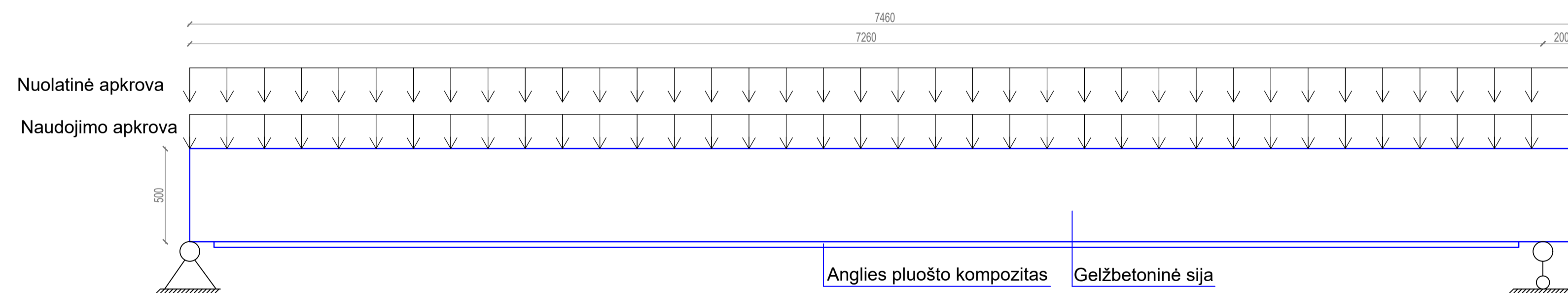


Pirmo aukšto eksplikacija

Patalpos Nr.	Patalpos pavadinimas	Patalpos plotas m²
1-1	Koridorius	23,94
1-2	Laiptinė	20,97
1-3	WC ŽN	4,88
1-4	WC	1,58
1-5	WC	1,64
1-6	Rūbinė	19,77
1-7	Elektros skydų patalpa	20,32
1-8	Mechan. apdorojimo patalpa	1387,52
1-9	Šiukšlių priėmimo patalpa	547,52
1-10	Sanitarinė patalpa	4,36
1-11	Valytojos reikmenų patalpa	2,28
1-12	Kompresorinė	23,91
1-13	Šilumos punktas	16,20
1-14	Rūšiavimo kabina	112,18
Viso:		2187,67

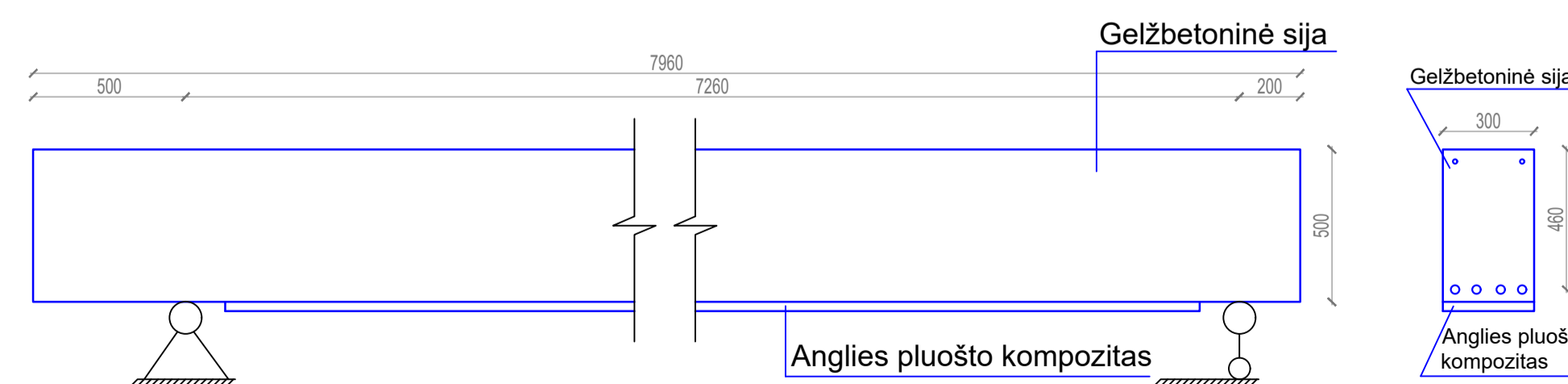
SIJOS SKAIČIUOJAMOJI SCHEMA

Mastelis 1:20



GELŽBETONINĖ SIJA

Mastelis 1:20



Antro aukšto eksplikacija

Patalpos Nr.	Patalpos pavadinimas	Patalpos plotas m²
2-1	Koridorius	31,21
2-2	Operatorinė	28,61
2-3	Moterų rūbinė	19,05
2-4	Moterų WC	1,02
2-5	Moterų WC	1,02
2-6	Moterų dušai	4,06
2-7	Vyrų rūbinė	18,90
2-8	Vyrų WC	0,94
2-9	Vyrų WC	0,94
2-10	Vyrų dušai	4,36
2-11	Poilsio patalpa	38,66
Viso:		148,77

Sutartiniai žymėjimai

	Daugiasluoksnės sieninės plokštės siena. Storis-100mm
	Gipso kartono ant metalinio karkaso pertvara, storis -100 mm
	Monolitinė gelžbetonio siena H= 3,00/4,5 m.
	Pateikimas į pastatą
	Mūro siena su šilumine izoliacija

Grupė	KTU Statybos ir Architektūros fakultetas	Magistro baigiamasis projektas
STM-6	Studentas E. Jurgelėvičius Vadovas N. Meslinas	Efektyvūs gelžbetoninių lenkiamųjų konstrukcijų stiprinimo metodai
Konsult.		Pirmo aukšto planas, antro aukšto planas, perdangų ir sijų planas, gelžbetoninė sija, sijos skaičiuojamoji schema
Pr. etapas TP	Statybos Konstrukcijų katedra LT - 51367 Studentų 48, Kaunas	2017-TP-SKK-SA
Lapas	1	Lapų 1