



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Romas Žvirzdas

**GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, ARMUOTŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPTA
NEPLIENINE ARMATŪRA, SKAIČIAVIMO METODŲ ANALIZĖ**

**CALCULATION METHODS ANALYSIS OF PRESTRESSED
ELEMENTS WITH FIBER REINFORCED POLYMER TENDONS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerija 02T

Vadovas prof. dr. Juozas Valivonis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Juozas Valivonis
(Vardas, pavardė)

(Data)

Romas Žvirzdinas

**GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, ARMUOTŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPTA
NEPLIENINE ARMATŪRA, SKAIČIAVIMO METODŲ ANALIZĖ**

**CALCULATION METHODS ANALYSIS OF PRESTRESSED ELEMENTS
WITH FIBER REINFORCED POLYMER TENDONS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerija 02T

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis darbas
Pavadinimas: **Gelžbetoninių elementų, armuotų iš anksto įtempta neplienine armatūra, skaičiavimo metodų analizė**
Autorius **Romas Žvirzdinas**
Vadovas **prof. dr. Juozas Valivonis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojamos iš anksto įtemptų gelžbetoninių konstrukcijų įtempimo nuostolių, statmenojo pjūvio laikomosios galios, įlinkio ir plyšių pločio skaičiavimo metodikos. Nagrinėjamos trys projektavimo normos: Amerikos betono instituto normos, kurios yra skirtos projektuoti kompozitine armatūra armuotus elementus, Eurokodas 2 ir Lietuvos Statybos techninis reglamentas. Atliekami užsienio šalių autorių eksperimentinių sijų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, teoriniai skaičiavimai, gauti rezultatai lyginami su eksperimentų metu gautais rezultatais. Siekiama nustatyti, kuri skaičiavimo metodika yra tinkama skaičiuoti kompozitine armatūra armuotus elementus. Darbą sudaro kompozitinės armatūros apžvalga, skaičiavimo metodų apžvalga, teoriniai skaičiavimai ir jų rezultatų palyginimas su eksperimentų metu gautais rezultatais, darbo išvados ir literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 93 p. teksto, 23 iliustr., 28 lent., 34 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai

anglies pluoštas, iš anksto įtemptas gelžbetonis, įlinkis, įtempimo nuostoliai, kompozitinė armatūra, lenkimo momentas, pleišėjimas, sija.

Vilnius Gediminas technical university
Faculty of Civil Engineering
Department of reinforced concrete and masonry structures

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master's Thesis

Title **Calculation methods analysis of prestressed elements with fiber reinforced polymer tendons**

Author **Romas Žvirzdinas**

Academic supervisor **prof. dr. Juozas Valivonis**

Thesis language:

Lithuanian

Annotacion

The analysis of prestressing losses, ultimate bending moment, deflection and crack width calculation methods, of prestressed concrete elements, were performed in this master's theses. Three building codes were analyzed: American concrete institute code, which is meant for the design of elements, reinforced with composite reinforcement, Eurocode 2 and Lithuanian Building regulations. Calculations of concrete beams, reinforced with prestressed carbon fiber reinforcement, were performed, results were compared with experimental data, obtained from other authors. The aim is to identify, which calculation methodology is suitable for the design of constructions, reinforced with composite reinforcement. The thesis consists of overview of composite reinforcement, overview of calculation methods, theoretical calculations, verification between these results and the ones from experimentants, thesis conclusions and list of references.

The scope of the thesis is as follows: 93 pages of text, 23 illustrations, 28 tables, 34 bibliographical sources.

Keywords

carbon fiber, prestressed concrete, deflection, prestressing losses, composite reinforcement, bending moment, cracking, beam.

TURINYS

TURINYS.....	5
Paveikslų sąrašas.....	7
Lentelių sąrašas	8
ĮVADAS.....	10
1. KOMPOZITINĖ NEPLIENINĖ ARMATŪRA.....	12
1.1. Kompozitinės armatūros savybės.....	12
1.2. Anglies pluošto gamyba ir armatūros paviršiaus paruošimas	15
1.3. Neplieninės kompozitinės armatūros savybės	18
1.3.1. Tempiamasis stipris	18
1.3.2. Anglies pluošto armatūros relaksacija.....	19
1.3.3. Kompozitinės armatūros atsparumas nuovargiui	20
1.3.4. Temperatūros poveikis kompozitinei armatūrai	20
1.3.5. Kompozitinės armatūros atsparumas atmosferiniams poveikiams	21
1.4. Anglies pluošto panaudojimas statyboje.....	23
1.5. Išvados	23
2. GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, ARMUOTŲ ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITINE ARMATŪRA, SKAIČIAVIMAS.....	25
2.1. Eksperimentinių sijų charakteristikos	25
2.2. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimas	26
2.2.1. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo metodai.....	27
2.2.2. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių teorinė analizė	34
2.2.3. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo sijos betono stiprumo klasės	38
2.2.4. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo armatūros tamprumo modulio	41

2.2.5. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio.....	44
2.2.6. Išvados	47
2.3. Statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas.....	47
2.3.1. Statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodai.....	48
2.3.2. Statmenojo pjūvio laikomosios galios teorinė analizė	55
2.3.3. Statmenojo pjūvio laikomosios galios priklausomybė nuo betono stiprumo klasės	59
2.3.4. Statmenojo pjūvio laikomosios galios priklausomybė nuo skerpjūvio armavimo procento	60
2.3.5. Išvados	62
2.4. Įlinkio skaičiavimas	63
2.4.1. Įlinkio skaičiavimo metodai	63
2.4.2. Įlinkio skaičiavimo metodų teorinė analizė.....	69
2.4.3. Įlinkio priklausomybė nuo betono stiprumo klasės.....	72
2.4.4. Įlinkio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio	74
2.4.5. Išvados	76
2.5. Plyšių pločio skaičiavimas	76
2.5.1. Plyšių pločio skaičiavimo metodai	77
2.5.2. Plyšių pločio teorinė analizė.....	80
2.5.3. Plyšių pločio priklausomybė nuo armatūros tamprumo modulio.....	83
2.5.4. Plyšių pločio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio	84
2.5.5. Išvados	86
3. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	87
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	89

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Pultruzijos procesas (ACI 440R-96)	16
1.2 pav. Japonijoje gaminami aramido („Arapree“, „Technora rod“, „Fibra“) ir anglies („Nacc strand“, „Leadline“, „CFCC“) pluošto kompozitiniai lynai (Bank 2006).....	17
1.3 pav. Neplieninės armatūros paviršius padengtas užpildu (Atutis ir Valivonis 2010)	17
1.4 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės diagramos veikiant trumpalaikiai apkrovai	18
1.5 pav. Pluoštų tempiamojo stiprio kitimas didėjant temperatūrai (Rostasy 1996)	21
2.1 pav. Eksperimentinių sijų R, T, S-R ir S-T skerspjūviai (a) ir apkrovimo schema (b).....	26
2.2 pav. Eksperimentinių sijų FRP ir S skerspjūviai (a) ir apkrovimo schema (b).....	26
2.3 pav. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimo rezultatų palyginimas (t = 50 metų).....	36
2.4 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiama betono stiprumo klasė, skaičiavimo rezultatų palyginimas.....	40
2.5 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis, skaičiavimo rezultatų palyginimas	43
2.6 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis, skaičiavimo rezultatų palyginimas.....	46
2.7 pav. Skerspjūvio skaičiuojamoji schema: a – skerspjūvis; b – deformacijų diagrama; c – įtempių diagrama; d – idealizuota įtempių diagrama (Burke ir Dolan 2001).....	48
2.8 pav. Supaparastinta gniuždymo įtempių diagrama	51
2.9 pav. Stačiakampio skerspjūvio lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiuotinė schema	53
2.10 pav. Lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais	56
2.11 pav. Lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė	59
2.12 pav. Lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiamas armavimo procentas.....	61
2.13 pav. Grafinis lenkiamųjų elementų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais	70

2.14 pav. Sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio skaičiavimo, kai keičiama betono stiprumo klasė, grafinis rezultatų palyginimas	73
2.15 pav. Elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio skaičiavimo, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydis, grafinis rezultatų palyginimas	75
2.16 pav. Lenkiamų elementų plyšių pločio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais	81
2.17 pav. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis	84
2.18 pav. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydis.....	85

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Tipinės FRP armatūrai naudojamų pluoštų savybės (Fib bulletin 40 2007)	14
1.2 lentelė. Armatūros paviršiaus paruošimo galimybės (Borosnyoi 2002)	17
1.3 lentelė. Plieninės ir neplieninės kompozitės armatūros savybių palyginimas (išilgine kryptimi) (ACI 440R-96)	19
1.4 lentelė. Anglies pluošto kompozitinių lynų „CFCC“ ir plieninių lynų relaksacijos palyginimas (Tokyo Rope 1993)	19
2.1 lentelė. Sijų skerspjuvio ir medžiagų charakteristikos	25
2.2 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas ($t = 50$ metų)	35
2.3 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas ($t = 50$ metų)	35
2.4 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas ($t = 50$ metų)	36
2.5 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas, kai keičiama betono stiprumo klasė	39
2.6 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas, kai keičiama betono stiprumo klasė	39
2.7 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiama betono stiprumo klasė	40
2.8 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis	41

2.9 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis.....	42
2.10 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis.....	42
2.11 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis.....	44
2.12 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis.....	45
2.13 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis.....	45
2.14 lentelė. Stiprio redukavimo koeficientas ϕ (ACI 440.4R-04).....	49
2.15 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais.....	55
2.16 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas, kai naudojamos charakteristinės ir skaičiuotinės medžiagų savybių reikšmės.....	58
2.17 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė	59
2.18 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiamas armavimo procentas.....	61
2.19 lentelė. Lenkiamų elementų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais.....	70
2.20 lentelė. Sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė.....	72
2.21 lentelė. Ilgalaikio įlinkio skaičiavimas, kai keičiamas iš anksto įtemptos armatūros pradinio įtempimo dydis.....	75
2.22 lentelė. Lenkiamų elementų plyšių pločio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais.....	81
2.23 lentelė. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis	83
2.24 lentelė. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydžiui.....	85

IVADAS

Konstrukcijų ilgaamžiškumas visuomet buvo, yra ir toliau išliks vienu svarbiausių projektavimo klausimų. Medžiagų senėjimas, aplinkos, įvairių cheminių medžiagų poveikiai ir nuolatinis apkrovų poveikis labai trumpina konstrukcijų eksploatavimo laiką. Dėl šių priežasčių siekiama sukurti naujas, stiprias ir ekonomiškai medžiagas, kurios leistų padidinti konstrukcijų ilgaamžiškumą. Tikimasi, kad panaudojant inovatyvias medžiagas, bus galima pagerinti konstrukcijų kokybę, prailginti jų tinkamumo eksploatuoti laiką ir pagaminti stipresnes ir standesnes konstrukcijas.

Įprastai gelžbetoninės konstrukcijos armuojamos plienine paprasta arba iš anksto įtempta armatūra. Konstrukcijos nuolatos veikiamos ne tik apkrovų, bet ir klimato bei kitų išorinių poveikių. Nuolatinis drėgmės poveikis, kintančios temperatūros, įvairios rūgštys ir šarmai gali būti labai pavojingi gelžbetoninėms konstrukcijoms. Atsiradus betono apsauginio sluoksnio pažeidimams arba plyšiams konstrukcijose, armatūra nebeapsaugoma nuo išorinių poveikių ir gali prasidėti jos korozija, dėl ko konstrukcija gali net suirti. Ši problema pasidarė itin aktuali, kai žiemą keliuose buvo pradėtos naudoti druskos. Ypač didelė žala daroma tiltams, kurie yra nuolat veikiami didelių apkrovų, chloridų poveikio ir temperatūros kitimo. Čia armatūros korozija gali turėti katastrofiškų padarinių. Pažeistas konstrukcijas reikia stiprinti ar rekonstruoti, o tai sukelia labai dideles išlaidas, kurios laikui bėgant vis auga. Tai paskatino ieškoti naujų medžiagų, galinčių apsaugoti ar net pakeisti plieninę armatūrą.

Kompozitinės medžiagos naudojamos jau nuo senovės laikų. Jau tada pastebėta, kad sujungus kelis skirtingas savybes turinčius elementus, galima gauti daug stipresnes ir standesnes konstrukcijas. Prieš kelis dešimtmečius kompozitinėse konstrukcijose pradėtos naudoti anglies, stiklo ar kitų medžiagų pagrindu pagamintas pluoštas, kuris atvėrė naujas galimybes kuriant kompozitus. Pradžioje, dėl savo mažo svorio ir didelio stiprumo, šie kompozitai pagrindinai buvo naudojami tik aeronautikos ir karo srityse, tačiau laikui bėgant panaudojimo sričių randama vis daugiau. Viena galimų naudojimo krypčių yra statyba ir remontas. Taip atsirado vadinamoji kompozitinė armatūra, sudaryta iš pluoštų, įterptų į polimerinę dervą (*angl.* Fiber Reinforced Polymer – FRP). Iš visų kompozitinių armatūrų populiariausi yra anglies, stiklo ir aramido pluoštų pagrindu pagaminti gaminiai, kurie turi gerų mechaninių ir antimagnetinių savybių, yra atsparūs korozijai, nuovargiui, jų mažas šilumos laidumas, didesnis nei plieno stiprio ir masės santykis bei mažesni išankstinio įtempimo nuostoliai dėl armatūros relaksacijos. Šios savybės paskatino pirmųjų tiltų, kurių iš

anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijos armuotos neplienine FRP armatūra, statybą Europoje, Japonijoje, Kanadoje (Abdelrahman ir Rizkalla 1995).

Kompozitinės ne plieninės armatūros kaina gerokai didesnė nei plieninės. Net ir įvertinant tokias jų savybes, kaip didesnis stipris ir maža masė, lyginant su plienine armatūra, šios armatūros panaudojimas įpratoje statyboje lieka per brangus. Šių medžiagų pagrindinis privalumas yra jų atsparumas natrio ir kalcio chloridams, bei jų elektromagnetinės savybės. Todėl kompozitinė neplieninė armatūra labiausiai tinkama armuoti tiltų konstrukcijas, konstrukcijas statomas jūrose ir automobilių stovėjimo aikštes. Įvertinus tokių konstrukcijų ilgaamžiškumo padidėjimą arba palyginus su katodinėmis plieninės armatūros apsaugos sistemomis, šio tipo armatūros kaina nebeatrodo per didelė.

Šiame darbe atliekami gelžbetoninių sijų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, išankstinio įtempimo nuostolių, statmenojo pjūvio stiprumo, įlinkio ir plyšių pločio teoriniai skaičiavimai. Skaičiavimai atliekami naudojant kitų autorių atliktų eksperimentų metu bandytų sijų duomenis, o gauti rezultatai palyginami su eksperimentų metu gautais rezultatais. Analizės metu siekiama nustatyti, kurie iš pateiktų skaičiavimo metodų yra tinkami skaičiuoti gelžbetoninius elementus, armuotus iš anksto įtempta kompozitine armatūra.

1. KOMPOZITINĖ NEPLIENINĖ ARMATŪRA

1.1. Kompozitinės armatūros savybės

Pluoštai yra kompozitinių medžiagų apkrovas laikančioji sudėtinė dalis, kuri užima didžiąją jos tūrio dalį. Pluoštai gaminami įvairios skerspjūvio formos, o jų skersmuo gali kisti nuo 4 iki 10 μm . Jie gali būti gaminami iš įvairiausių medžiagų, tokių kaip stiklas, anglis, aramidas, bazaltas. Dažniausiai naudojami vienakrypčiai gijų pavidalo pluoštai, kurie pasižymi didžiausiu stiprumu tempiant. Pluoštų stipris didžiausias jų išilgine, o mažiausias šonine ir radialine kryptimis, jie gali būti gaminami ištisiniai arba suskirstyti atkarpomis. Kompozitinių medžiagų, pagamintų naudojant ištisinius pluoštus, stipris ir tamprumo modulis geresnis nei pagamintų iš atskirų nutrauktų pluoštų (ACI 440R-96). Pluoštų fizinių ir mechaninių savybių galimybės gaminant didelės. Galima pagaminti skirtingo stiprumo, tamprumo modulio, skerspjūvio formos pluoštus. Priešingai nei plieno, pluoštų, iš kurių gaminama kompozitinė armatūra, suirimas trapus, o plastinės deformacijos nepasireiškia.

Vienas ilgas pluoštas dar vadinamas gija. Atskirų gijų praktinis panaudojimas neįmanomas dėl jų labai mažo skerspjūvio, todėl didelis gijų skaičius sujungiamas į ryšulį, kuris naudojamas armavimui. Atliekant bandymus buvo pastebėta, kad pavienių gijų (pluoštų) vidutinis tempiamasis stipris didesnis nei supintų lynų (ar strypų), todėl FRP armatūros stipris labai priklauso nuo jų skerspjūvio ploto ir pluoštų skaičiaus joje (GangaRao *et al.* 2007).

Pagrindiniai faktoriai, lemiantys kompozitinės neplieninės armatūros (FRP) fizines savybes, yra pačių pluoštų mechaninės savybės, pluoštų orientacija, ilgis, forma ir pasklidimas tūryje, mechaninės rišamosios medžiagos (matricos) savybės ir sukibties savybės tarp pluoštų ir rišamosios medžiagos (ACI 440R-96). Rišamoji medžiaga (matrica) paskirsto įtempius tarp armuojančių pluoštų ir aplinkinės medžiagos bei apsaugo pluoštus nuo aplinkos poveikių ir mechaninių pažeidimų.

Stiklo pluoštas. Statybos industrijoje naudojama trijų tipų stiklo pluošto armatūra: E-stiklas (*angl.* „E-glass“), S-stiklas (*angl.* „S-glass“) ir šarmui atsparus stiklo pluoštas. E-stiklas yra pats pigiausias iš visų stiklo pluoštų, todėl ir pats populiariausias. S-stiklas pasižymi didesniu stipriu ir tamprumo moduliui nei E-stiklas, tačiau jis yra žymiai brangesnis. Šarmui atsparus stiklo pluoštas pagaminamas įdėjus cirkonio, kuris sumažina korozijos galimybę cemento matricoje. Dėl sudėtingo gamybos proceso šio tipo stiklo pluoštas yra pats brangiausias. Didžioji dalis šiuo metu rinkoje esančios stiklo pluošto armatūros skirta naudoti

kaip neįtempta armatūra. Taip yra todėl, kad ši armatūra pasižymi labai mažu kerpamuoju stipriu, todėl sudėtinga įrengti inkarus. 1.1 lentelėje pateiktos stiklo pluoštų mechaninės savybės.

Stiklo pluošto privalumai yra šie: žema kaina, didelis tempiamasis stipris, puikios izoliacinės savybės. Trūkumai yra tokie: mažas tamprumo modulis, palyginti didelis lyginamasis svoris, jautrus pažeidimams naudojant, didelis kietumas, palyginti mažas atsparumas nuovargiui (Bareišis ir Tričys 2003).

Aramido pluoštas. Aramido pluoštu vadinamas aromatinis poliamido pluoštas. Aramido pluoštai pirmą kartą buvo pristatyti 1971 metais komerciniu pavadinimu „Kevlar“. Aramido pluoštas pasižymi dideliu stiprumu tempiant, dideliu stabilumu, geromis atsparumo nuovargiui savybėmis, mažu valkšnumu. Aramidinis pluoštas labai tinka audimui. Mechaninės aramido pluoštų savybės pateiktos 1.1 lentelėje. Atliekant tyrimus su aramido pluoštais buvo pastebėta, kad jų tamprumo modulis šiek tiek padidėja esant didesniems įtempiams.

Keli aramido pluoštų privalumai yra tokie: labai mažas šiluminis laidumas, labai didelis slopinimo koeficientas, didelis takumo esant spaudimui laipsnis (tai suteikia didelį atsparumą pažeidimams esant smūginei ar dinaminei apkrovai). Aramido pluošto armatūros pagrindinis privalumas yra didesnė ribinė deformacija, lyginant su anglies pluošto armatūra (Fib bulletin 40 2007).

Tačiau aramido pluoštai turi nemažai trūkumų: šie pluoštai sugeria drėgmę, turi mažą gniuždomąjį stiprį, esant aukštoms temperatūros praranda stiprumą ir sumažėja jų tamprumo modulis, juos sudėtinga pjaustyti ir apdoroti, jie jautrūs ultravioletiniams spinduliams, kurie sukelia savybių pablogėjimą bėgant laikui (Fib bulletin 40 2007).

Bazalto pluoštas. Bazalto pluoštas yra vienalytė medžiaga, gaunama lydant suslėgtos vulkaninės lavos nuosėdas. Šis pluoštas pasižymi geresnėmis fizinėmis ir mechaninėmis savybėmis nei stiklo pluoštas ir yra žymiai pigesnis nei anglies pluoštas. Pagrindiniai bazalto pluošto privalumai yra šie: atsparumas ugniai, labai mažas garso ir vibracijos laidumas, atsparumas cheminei aplinkai. Bazalto pluoštas tinkamas naudoti iki 982 °C temperatūros, jo lydymosi temperatūra 1450 °C. Tai daro jį tinkamą naudoti konstrukcijose, kurioms reikalingas didelis atsparumas ugniai (Fib bulletin 40 2007). Pagrindinis bazalto pluošto trūkumas yra tai, kad dar nėra pakankamai ištirtos šio pluošto panaudojimo gelžbetoninių konstrukcijų armavimui galimybės.

Anglies pluoštas. Anglies pluoštai pasižymi dideliu atsparumu temperatūrai, atmosferos ir cheminiams poveikiams, mažu trinties koeficientu. Anglies pluoštai skirstomi į karbidinius (turinčius 80 – 90 % anglies) ir grafitinius (anglies daugiau nei 99 %). Sėkminga anglies pluoštų komercinė gamyba prasidėjo XX amžiaus šeštajame dešimtmetyje, nes aeronautikos ir ypač karinių lėktuvų pramonei reikėjo stiprios lengvasvorės medžiagos. Anglies pluošto kompozitinės medžiagos idealiai tinka panaudojimui ten, kur reikalingas didelis stipris, standumas, mažesnis svoris ir labai geros nuovargio charakteristikos. Anglies pluoštų mechaninės savybės pateiktos 1.1 lentelėje.

Anglies pluoštai pasižymi tokiais privalumais: didelis stipris tempiant, didelis tamprumo modulis, labai mažas temperatūrinio plėtimosi koeficientas, didelis atsparumas nuovargiui. Kaip anglies pluošto trūkumus galima įvardyti didelę kainą (10-30 kartų brangesnis nei E-stiklo pluoštas) ir didelį trapumą. Didelę šio pluošto kainą lemia aukšta gamybos žaliavų kaina ir sudėtinga gamybos technologija.

1.1 lentelė. Tipinės FRP armatūrai naudojamų pluoštų savybės (Fib bulletin 40 2007)

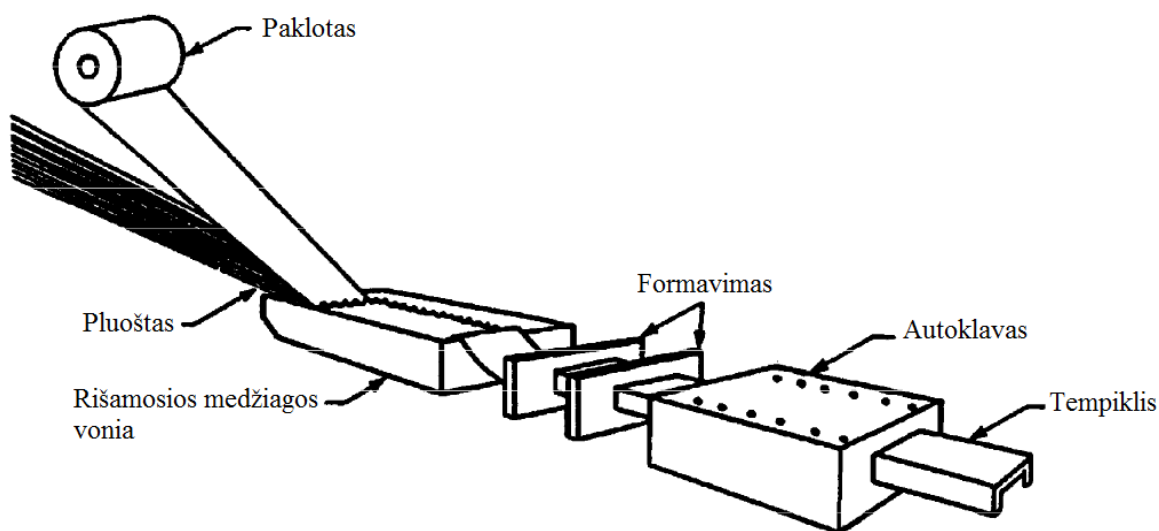
Pluošto tipas	Tankis	Tempia- masis stipris	Tampru- mo modulis	Ribinė tempimo deformacija	Temperatū- rinio plėtimosi koef.	Puasono koefi- cientas
	(kg/m ³)	(MPa)	(GPa)	(%)	(10 ⁻⁶ /°C)	
E-stiklas (E-glass)	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
S-stiklas (S-glass)	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Šarmui atsparus stiklas	2270	1800- 3500	70-76	2,0-3,0	-	-
ECR	2620	3500	80,5	4,6	6	0,22
Anglis (didelio tamprumo modulio)	1950	2500- 4000	350-650	0,5	-1,1...-0,1	0,20
Anglis (didelio stiprio)	1750	3500	240	1,1	-0,6...-0,2	0,20
Aramidas (Kevlar 29)	1440	2760	62	4,4	-2,0 išilgine, 59 skersine kryptimi	0,35
Aramidas (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	-2,0 išilgine, 59 skersine kryptimi	0,35
Aramidas (Kevlar 149)	1440	3450	175	1,4	-2,0 išilgine, 59 skersine kryptimi	0,35
Aramidas (Technora H)	1390	3000	70	4,4	-6,0 išilgine, 59 skersine kryptimi	0,35
Aramidas (SVM)	1430	3800- 4200	130	3,5	-	-
Bazaltas (Albarrie)	2800	4840	89	3,1	8	-

1.2. Anglies pluošto gamyba ir armatūros paviršiaus paruošimas

Anglies pluoštas gali būti gaminamas iš kelių medžiagų: poliakrilnitrilo (PAN), pikio (šalutinis naftos distiliacijos produktas) arba viskozės, vadinamojo dirbtinio šilko. Šio pluošto gamybai reikalinga aukštesnė nei 1000 °C temperatūra. Yra dvi anglies pluošto rūšys: didelio tamprumo modulio (*I tipo*) ir didelio stiprumo (*II tipo*). Skirtumai tarp šių dviejų tipų pluoštų atsiranda dėl mikrostruktūros skirtumų. Iš dirbtinio šilko ir izotropinio pikio prekursorių gaminamas mažo tamprumo modulio pluoštas (apie 50 GPa), o aukštesnio tamprumo modulio anglies pluoštas gaminamas iš poliakrilnitrilo arba skysto kristalinio pikio prekursoriaus karbonizuojant aukštesnėje nei 800 °C temperatūroje. Grafitizacijos proceso metu, pluoštai ištempiami iki 50 – 100 % pailgėjimo ir kaitinami 1100 – 3000 °C temperatūroje. Pagamintų pluoštų paviršius specialiai apdorojamas, kad padidinti pluoštų ir rišamosios medžiagos (matricos) sukibimą kompozite (ACI 440R-96). Dėl savo itin didelio stiprio ir palyginti didelio tamprumo modulio statybos srityje labiausiai dominuoja poliakrilnitrilo pagrindu pagamintas anglies pluoštas.

Anglies pluošto armatūra dažniausiai gaminama pultruzijos būdu (*angl. Pultrusion*) (žiūr. 1.1 paveikslą). Pultruzija tai procesas, kurio metu išlydyta derva (rišamoji medžiaga) ir ištisiniai pluoštai traukiami per norimos skerspjūvio formos šampą, taip suformuojant strypą ar lyną (ACI 440R-96). Šio gamybos proceso metu atliekami tokie žingsniai (Borosnyoi 2002):

- 1) gamybai naudojamo pluošto ritinių paruošimas;
- 2) pluoštų panardinimas į dervos (rišamosios medžiagos) vonią;
- 3) dervos kietinimas autoklave esant reikiamai temperatūrai ir atmosferos slėgiui;
- 4) paviršiaus apdorojimas;
- 5) gaminio pjaustymas.



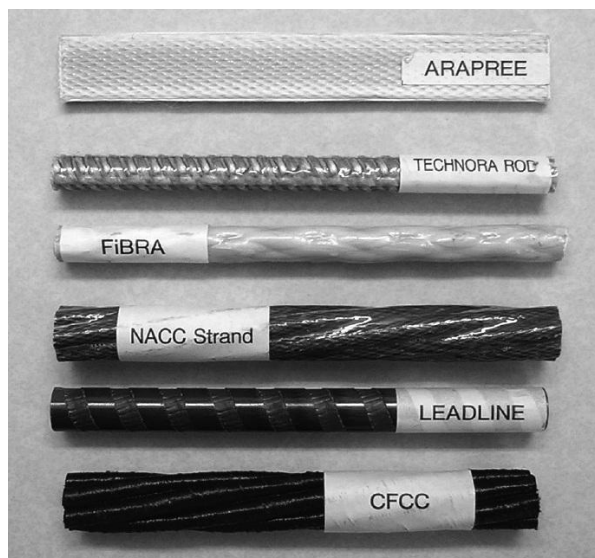
1.1 pav. Pultruzijos procesas (ACI 440R-96)

Kompozitinė armatūra gali būti apskritojo skerspjūvio, lakštinė arba kaip viela, lynai. Tam, kad būtų pasiektas pakankamas šios armatūros sukibimas su betonu, būtina specialiai paruošti paviršių. Lengviausias būdas – padengti armatūros paviršių smėlio dalelių danga, kuri gali būti sudaryta iš geros rūšies smėlio arba aliuminio oksido dalelių įterptų į didelio stiprumo dervą (žiūrėti 1.3 paveikslą). Kitas būdas pasiekti geras sukibimo savybes – sudaryti įraižas arba rumbelius ant armatūros paviršiaus (žiūrėti 1.2 paveikslą). Šie gali būti padaromi įrengiant spiralines apvijas iš paties pluošto paketų, išspaudžiant juos su slėgiu į rišamąją medžiagą, arba specialūs keraminiai, panašūs į tuos kurie būna ant įprastos plieninės armatūros. Lynai gali būti apdirbami panašiai kaip plieniniai, t.y. suvežant juos iš kelių vielų arba gali būti apipinti. Plieninės ir kompozitinės armatūros paviršiaus paruošimo galimybės pateiktos 1.2 lentelėje.

Gamintojai stengiasi pagerinti kompozitinės armatūros sukibimą su betonu įvairiausiais būdais, tačiau tai sukelia kitą problemą. Kadangi paviršiaus apdirbimo galimybių tiek daug, vadinasi kiekvieno gaminio sukibimo su betonu savybės yra skirtingos, todėl sunku numatyti būsimą bendrą armatūros ir konstrukcijos elgseną. Yra sukurta nemažai neplieninės kompozitinės armatūros sukibties su betonu stiprumo skaičiavimo išraiškų, tačiau lieka aišku, kad kiekvieno kompozitinės armatūros strypo medžiagų savybės, geometrinė konfigūracija ir paviršiaus profilis turės didelę reikšmę bendro darbo su betonu savybėms.

1.2 lentelė. Armatūros paviršiaus paruošimo galimybės (Borosnyoi 2002)

<i>Plieninė armatūra</i>	<i>Neplieninė kompozitinė armatūra</i>
Neįtempta – lygi – rumbuota Tinklelis Įtempta – lygi viela – viela su įraižomis – lynas iš kelių gijų – rumbuptas strypas – srieginis strypas	Įtempta ir neįtempta (su smėlio danga arba be jos) – lygi – deformuota – su įraižomis – su rumbeliais – su spiraliniu raštu (iš pluošto vijų) – su یدubomis rišamojoje medžiagoje – lynas iš kelių gijų – apipintas lynas Tinklelis (2D ir 3D) Lynas be rišamosios medžiagos (tik pluošto vijos) Tekstilės tipo armatūra



1.2 pav. Japonijoje gaminami aramido („Arapree“, „Technora rod“, „Fibra“) ir anglies („Nacc strand“, „Leadline“, „CFCC“) pluošto kompozitiniai lynai (Bank 2006)



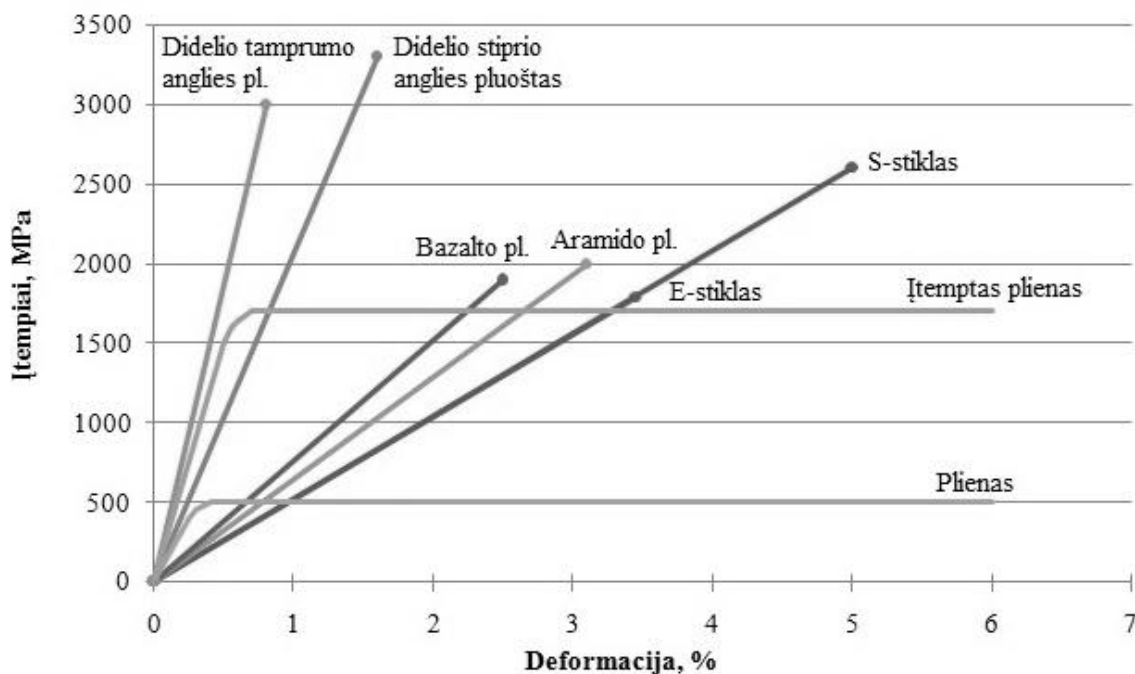
1.3 pav. Neplieninės armatūros paviršius padengtas užpildu (Atutis ir Valivonis 2010)

1.3. Neplieninės kompozitinės armatūros savybės

1.3.1. Tempiamasis stipris

Mechaninės anglies pluošto armatūros strypų ir lynų savybės priklauso nuo pluoštų tūrinio kiekio joje (dažniausiai daugiau nei 60 %), kampo tarp apkrovą laikančių pluoštų ir armatūros išilginės ašies, strypo skerspjūvio ploto formos, pluoštų ir rišamosios medžiagos kokybės ir pasirinkto gamybos proceso. Tempiamasis stipris taip pat priklauso ir nuo armatūros skerspjūvio ploto (plieninės armatūros atveju šis efektas nepasireiškia). Dėl šlyties atsilikimo, pluoštai esantys arčiau armatūros skerspjūvio centro yra apkraunami mažiau nei pluoštai esantys arčiau skerspjūvio paviršiaus. Dėl šio reiškinio didesnio skerspjūvio strypų stiprumas ir efektyvumas yra palyginti mažesnis nei mažo skerspjūvio strypų (ACI 440R-96). Buvo nustatyta, kad vieno JAV gamintojo pagamintų stiklo pluošto armatūros strypų tempiamasis stipris kinta nuo beveik 480 MPa 28,7 mm skersmens strypui iki 890 MPa 9,5 mm skersmens strypui (Ehsani *et al.* 1993).

Pagrindinė ne plieninės armatūros savybė yra ta, kad jai dirbant tamprioje stadijoje iki pat suirimo nepasireiškia plastinės deformacijos (žiūrėti 1.4 paveikslą). 1.3 lentelėje pateiktos tipinės kompozitinės ir plieninės armatūros savybių palyginimas.



1.4 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės diagramos veikiant trumpalaikiai apkrovai

1.3 lentelė. Plieninės ir neplieninės kompozitės armatūros savybių palyginimas (išilgine kryptimi) (ACI 440R-96)

<i>Charakteristika</i>	<i>Plieninis armatūros strypas</i>	<i>Plieninis lynas</i>	<i>Stiklo pluošto (GFRP) strypas</i>	<i>Stiklo pluošto (GFRP) lynas</i>	<i>Anglies pluošto (CFRP) lynas</i>	<i>Aramido pluošto (AFRP) lynas</i>
Tempiamasis stipris, MPa	483-690	1379-1862	517-1207	1379-1724	165-2410	1200-2068
Takumo riba, MPa	276-414	1034-1396	-			
Tamprumo modulis, GPa	200	186-200	41-55	48-62	152-165	50-74
Ribinis pailgėjimas, mm/mm	>0,10	>0,04	0,035-0,05	0,03-0,045	0,01-0,015	0,02-0,026
Gniuždomasis stipris, MPa	276-414	-	310-482	-	-	-
Temperatūrinio plėtimosi koeficientas ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11,7	11,7	9,9	9,9	0,0	-1,0
Lyginamasis svoris	7,9	7,9	1,5-2,0	2,4	1,5-1,6	1,25

1.3.2. Anglies pluošto armatūros relaksacija

Buvo atlikti bandymai su anglies pluošto „CFCC“ ir plieniniais lynais, esant toms pačioms sąlygoms. Abiejų rūšių lynai (abu 12,5 mm skersmens) buvo įtempti iki 80 % savo laikomojo stiprio, matuojant sąlyginį apkrovos sumažėjimą bėgant laikui. Rezultatai parodė, kad po 100 valandų įtempis „CFCC“ lynuose sumažėjo 2 %, o plieno lynuose įtempis sumažėjo 8 % (Zoch *et al.* 1991). Anglies pluošto vijų lynų „CFCC“ (7xØ12,5 mm) penkiasdešimties ir šimto valandų relaksacijos bandymų rezultatai pateikti 1.4 lentelėje. Palyginimui pateikti ir plieninio septynių vielų lino relaksacijos duomenys. Kaip matyti, anglies pluošto armatūros relaksacija yra žymiai mažesnė nei plieno armatūros.

1.4 lentelė. Anglies pluošto kompozitinių lynų „CFCC“ ir plieninių lynų relaksacijos palyginimas (Tokyo Rope 1993)

	<i>Lyno tipas</i>	<i>Įtempių lygis</i>		
		$0,50 \cdot f_{fu}$	$0,65 \cdot f_{fu}$	$0,80 \cdot f_{fu}$
100 valandų relaksacija laboratorijos sąlygomis (22°C)	„CFCC“	0,48 %	0,84 %	1,04 %
	Plienai	1,11 %	2,40 %	7,47 %
50 valandų relaksacija 80°C temperatūroje	„CFCC“	2,76 %	3,50 %	3,59 %
	Plienai	4,41 %	8,84 %	15,08 %

1.3.3. Kompozitinės armatūros atsparumas nuovargiui

Kompozitinė armatūra turi geras atsparumo nuovargiui savybes. Atlikus testus, kurių metu buvo atliekama 10 milijonų tempimo ciklų, buvo nustatyta, kad anglies pluošto kompozitai turi geresnes atsparumo nuovargiui savybes nei plienas, o stiklo pluošto kompozitų atsparumas nuovargiui mažesnis nei plieno (Schwarz 1992). Kitaip nei vienalytės medžiagos, kompozitai akumuliuoja pažeidimus didėjant apkrovimo ciklų skaičiui net ir žemo apkrovimo ribose (maždaug nuo 15 iki 20 % ribinio stiprio), užuot koncentravę pažeidimą vienetinio mikroskopinio plyšio forma, kuris didėtų ir privestų prie trūkio (Mandell ir Meier 1983). Pažeidimų akumuliacija pluoštais sustiprintuose kompozituose yra mikroskopinė, įskaitant pluoštų–matricos sankibos praradimą, matricoje atsirandančius mikroplyšius, išsisluoksniavimą ir pluoštų nutrūkimą (Talreja 1987). Kompozitinių medžiagų atsparumas nuovargiui priklauso nuo gaminimo proceso, veikiančios temperatūros, drėgmės kiekio ir mažiausių bei didžiausių įtempių ar deformacijų santykio.

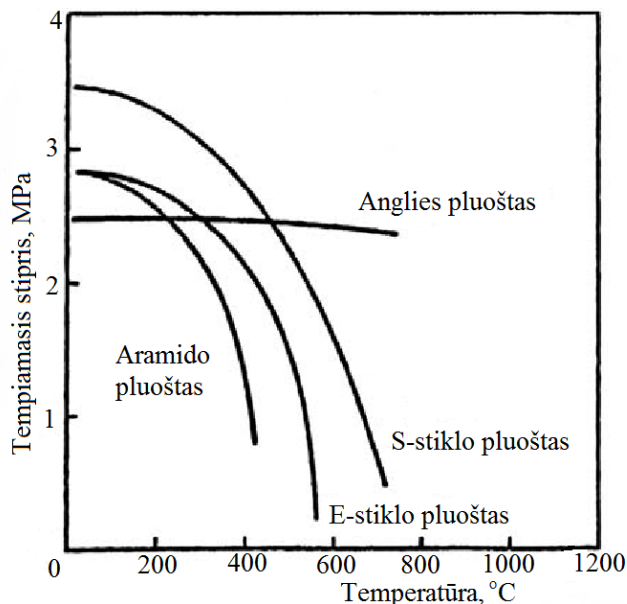
Kaip parodė testas, atlikus 2 milijonus tempimo ciklų, anglies pluošto lynai taip pat pasižymi geromis atsparumo nuovargiui savybėmis. Vidutiniai įtempiai buvo ties 60 % ribinio stiprio riba. Atlikus testą, jokie tamprumo modulio pokyčiai nebuvo pastebėti (Gorty 1994).

1.3.4. Temperatūros poveikis kompozitinei armatūrai

Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad temperatūros poveikis turi įtakos kompozitinei armatūrai iš anksto įtemptų gelžbetoninių konstrukcijų elgsenai. Yra žinoma, kad polimerų mechaninės savybės (ypač stipris ir standumas) ima ženkliai mažėti, kai temperatūra didinama ir polimeras artėja prie savo stiklėjimo temperatūros. Anglies, aramido ir stiklo pluoštai išlaiko palyginti geras mechanines savybes iki 250 °C temperatūros, todėl manoma, kad tokių pluoštų pagrindu pagaminti strypai pirmiausia neteks stiprumo suirus rišamajai medžiagai (matricai), kuri suminkštėja, tirpsta arba užsidega pasiekusi didesnę nei 150 – 200 °C temperatūrą (Ammon *et al.* 1999). Atlikus testus buvo nustatyta, kad stiklo pluošto lynai (GFRP) pasiekus 100 °C temperatūrą neteko 30 % tempiamojo stiprio kuris buvo išmatuotas 20 °C temperatūroje, o aramido pluošto lynai pradeda netekti stiprio kai viršijama 150 °C temperatūra. Kita vertus, anglies pluošto lynų stipris nesumažėjimo net pasiekus 800 °C temperatūrą (Leung *et al.* 2003) (žiūrėti 1.5 pav.).

Temperatūrinio plėtimosi koeficientai pateikti 1.3 lentelėje. Kaip matyti, išilgine kryptimi ne plieninės kompozitinės armatūros plėtimosi koeficientas panašus į betono. Tačiau

skersine kryptimi jis gali būti žymiai didesnis. Dėl temperatūrinių plėtimosi koeficientų skirtumo gali susidaryti didelis radialinis spaudimas armatūros paviršiuje, kuris apsauginiame betono paviršiuje sudarytų plyšius. Atlikus tyrimus su sijomis, armuotomis aramido pluošto armatūros strypais, kurios buvo veikiamos aukštos temperatūros, buvo nustatyta, kad tam, jog neatsirastų plyšių betono apsauginiame sluoksnyje dėl temperatūrinio armatūros plėtimosi poveikio, reikia didinti apsauginio sluoksnio storį (Lees 2001).



1.5 pav. Pluoštų tempiamojo stiprio kitimas didėjant temperatūrai (Rostasy 1996)

1.3.5. Kompozitinės armatūros atsparumas atmosferiniams poveikiams

Drėgmės efektas

Drėgmė gali turėti įtakos kompozitinės armatūros savybėms. Vanduo į kompozitus gali įsiskverbti dviem būdais: difuzijos būdu per rišamąją medžiagą (matricą) ir patekti per įtrūkius ar kitokius medžiagos defektus. Difuzijos būdu patekęs vanduo būna molekulinės struktūros ir vandelinėmis jungtimis prisijungia prie polimerų, o vandens patekimas per defektus ir plyšius yra kapiliarinės kilmės (Parkyn 1985). Dėl hidrolizės matrica gali suminkštėti, o tai gali privesti prie tokių kompozitinės medžiagos savybių kaip kerpamasis stipris, stiklėjimo temperatūra, kompozito stiprumas ir standumas, sumažėjimo. Hidrolizės sukeltas mechaninių savybių pablogėjimas itin akcentuojamas esant didesniems įtempiams ir temperatūrai.

Medžiagų savybių pokyčiai dėl vandens poveikio dažniausiai asocijuojami su rišamosios medžiagos (matricos) pokyčiais. Kas liečia pluoštus, anglies ir stiklo pluoštai

neabsorbuoja vandens. Aramido pluoštai absorbuoja vandenį, o tai gali sukelti grįžtamą tempiamojo stiprio sumažėjimą ir relaksacijos savybių pokyčius, ir negrįžtamą atsparumo nuovargiui sumažėjimą. Aramido pluošto armatūros savybių pablogėjimas dėl vandens absorbcijos gali siekti nuo 15 iki 25 % (Gerritse 1993).

Atsparumas šarminei aplinkai ir ultravioletinių spindulių poveikiui

Kompozitinėje medžiagoje rišamoji medžiaga atlieka apsauginę pluoštų funkciją, todėl kompozitinė medžiaga yra patvaresnė nei vieni pluoštai. Atlikus bandymus buvo nustatyta, kad panardinus anglies, aramido ir stiklo pluoštus į 40 °C temperatūros natrio hidroksidą, praėjus 120 dienų pluoštų stipris sumažėjo atitinkamai 5, 8 ir 85%. Atlikus tą patį bandymą su 6 mm skersmens anglies, aramido ir stiklo pluoštų armatūros strypais, jų stipris atitinkamai sumažėjo 0, 2 ir 71% (Uomoto ir Nishimura 1990).

Dėl savo didelio stiprumo, mažo tankio ir atsparumo išoriniams poveikiams, anglies pluošto armatūra laikoma tinkamiausia naudoti statybos srityje. Tačiau kitų dviejų rūšių pluoštinė armatūra nėra tokia atspari klimato poveikiams. Stiklo pluošto lynai (GFRP) pasižymi blogu atsparumu šarminei aplinkai, todėl jų įrengimas betono aplinkoje gali pakenkti pluoštų savybėms ir sumažinti laikomąją galią. Aramido pluošto lynai (AFRP) yra atsparūs šarminės aplinkos poveikiui, tačiau labai jautrūs ultravioletinių spindulių poveikiui. Atlikti bandymai parodė, kad aramido pluošto kompozitiniai armatūros strypai po 2500 valandų poveikio ultravioletiniais spinduliais praranda apie 13 % tempiamojo stiprio, stiklo pluošto – 8 % po 500 valandų (po to nebemažėjo), o anglies pluošto strypai stiprumo neprarado (Ceroni *et al.* 2006). Tai reiškia, kad aramido (AFRP) pluošto lynus galima naudoti gelžbetoniniuose elementuose, kai betonas yra sukibęs su armatūra, o stiklo (GFRP) pluošto lynus galima naudoti konstrukcijose, kai lynai naudojami kaip išorinė armatūra (arba kaip nesukibusi armatūra betono viduje) (Pisani 1997).

Žemos temperatūros ir užšalimo – atšilimo ciklo poveikis

Žemos temperatūros ir užšalimo – atšilimo ciklai nekenkia patiems pluoštams, tačiau gali kenkti kompozito rišamajai medžiagai (matricai) ir pluoštų – matricos tarpusavio sąveikai. Yra žinoma, kad polimerinių dervų sistemos prie neigiamų temperatūrų linkusios kietėti, padidėja jų stiprumas ir standumas, tačiau jos pasidaro trapesnės. Taip pat užšalimo – atšilimo ciklai gali būti labiau pavojingi esant drėgmei, nes gali sukelti mikroplyšius, kurie jungdamiesi tarpusavyje sukelia pavojingus plyšius betono apsauginiame sluoksnyje. Prie

drėgmės ir žemų temperatūrų poveikio taip pat gali prisidėti druskų, kuriomis žiemą barstomi keliai, neigiamas poveikis (Ceroni et al. 2006).

1.4. Anglies pluošto panaudojimas statyboje

Per pastaruosius du dešimtmečius anglies pluoštas pradėtas naudoti daugelyje statybos sričių. Buvo atlikti įvairiausi tyrimai siekiant nustatyti anglies pluošto kompozitinių medžiagų savybes ir panaudojimo galimybes. Jų metu buvo nustatyta, kad anglies pluoštas labai tinkamas betoninėms, mūrinėms, plieninėms ir medinėms konstrukcijoms stiprinti.

Anglies pluošto kompozitinė armatūra pasižymi dideliu stiprumu, yra lengva, atspari įvairiausiems aplinkos poveikiams, nerūdijanti, todėl tai yra gera alternatyva plieninei armatūrai konstrukcijose, kurias veikia didelės apkrovos, temperatūrų skirtumai ir cheminis poveikis (tiltai, automobilių stovėjimo aikštelės, jūriniai pastatai ir kt.).

Rekonstrukcija tapo viena svarbiausių anglies pluošto panaudojimo sričių. Šio pluošto pagrindu pagaminta kompozitinė armatūra naudojama stiprinti senoms konstrukcijoms, pvz., tiltams, kurie buvo suprojektuoti atlaikyti žymiai mažesnes apkrovas, nei tos, kurias tenka atlaikyti šiais laikais, ir remontuoti pažeistas konstrukcijas. Stiprinimas ypač išpopuliarėjo, nes dažnai panaudoti anglies pluošto kompozitines medžiagas būna žymiai pigiau nei pakeisti nebetinkamas eksploatuoti konstrukcijas.

Anglies pluošto kompozitinės medžiagos dažnai naudojamos siekiant padidinti gelžbetoninių konstrukcijų kerpamąjį stiprį. Tai pasiekama apvyniojant norimą sustiprinti konstrukciją (pvz., tiltų ar pastatų kolonas) anglies pluošto pagrindu pagamintos tekstilės audiniu. Taip konstrukcija ne tik sustiprinama, bet ir padidinamas jos atsparumas žemės drebėjimų poveikiui. Dėl šios priežasties šis stiprinimo būdas labai dažnai naudojamas regionuose, kuriuose žemės drebėjimai yra neretas įvykis.

1.5. Išvados

Naudojant kompozitinę armatūrą galima žymiai prailginti gelžbetoninių konstrukcijų eksploatavimo trukmę, kadangi ši armatūra yra atspari korozijai. Šiuo metu dažniausiai naudojama stiklo, aramido ar anglies pluošto pagrindu pagaminta kompozitinė armatūra. Tačiau kiekviena skirtingo tipo armatūra pasižymi skirtingomis fizinėmis, mechaninėmis ir atsparumo savybėmis, į kurias būtina atsižvelgti projektuojant konstrukcijas. Iš visų anksčiau paminėtų, geriausiomis savybėmis pasižymi anglies pluošto kompozitinė armatūra. Ji

pasižymi dideliu stiprumu, labai geru atsparumu aplinkos poveikiams, ji yra lengva ir nekoroduoja. Šios savybės ir lėmė anglies pluošto armatūros išpopuliarėjimą statybos ir kitose srityse. Tačiau susiduriama ir su keliomis problemomis, kurių pagrindinės yra palyginti didelė kaina ir tai, kad nėra žinomos ilgalaikės anglies pluošto kompozitinės armatūros ir betono bendro darbo savybės ir ilgalaikis patvarumas.

Daug mokslinių tyrimų su kompozitine armatūra dar turi būti atlikta tiek siekiant išsiaiškinti jos panaudojimo galimybes stiprinant konstrukcijas, tiek galimybes panaudoti kaip alternatyvą plieninei armatūrai armuojant gelžbetonines konstrukcijas. Taip pat daugeliui specialistų susirūpinimą kelia trapus kompozitinės armatūros suirimo pobūdis. Nors ir tokios institucijos, kaip Amerikos betono institutas sukūrė projektavimo nurodymus, inžinerijos bendruomenėje dar kyla abejonių dėl šios alternatyvios armatūros naudojimo. Iš dalies taip yra dėl to, kad vis dar trūksta šių medžiagų projektavimo standartizavimo dokumentų, o rinkoje pateikiama daug gaminių variantų, kurių visų savybės skiriasi.

2. GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, ARMUOTŲ ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITINE ARMATŪRA, SKAIČIAVIMAS

2.1. Eksperimentinių sijų charakteristikos

Siekiant palyginti teoriniais skaičiavimais gautus rezultatus, buvo atlikti kelių užsienio šalių autorių gelžbetoninių eksperimentinių sijų, armuotų anglies pluošto kompozitine armatūra, teoriniai skaičiavimai. Sijos trijų skerspjūvių: su 200 mm pločio lentyna (žymuo *R*) (Abdelrahman ir Rizkalla 1997), su 600 mm pločio lentyna (žymuo *T*) (Abdelrahman ir Rizkalla 1997) ir I sijos (žymuo *FRP*) (Borosnyoi 2002). Taip pat atlikti sijų, armuotų plienine iš anksto įtempta armatūra, skaičiavimai. Sijos dviejų skerspjūvio tipų: tėjinio (žymuo *S-R* ir *S-T*) (Abdelrahman ir Rizkalla 1997) ir I tipo (žymuo *S*) (Borosnyoi 2002). Duomenys sijų skaičiavimui pateikti 2.1 lentelėje.

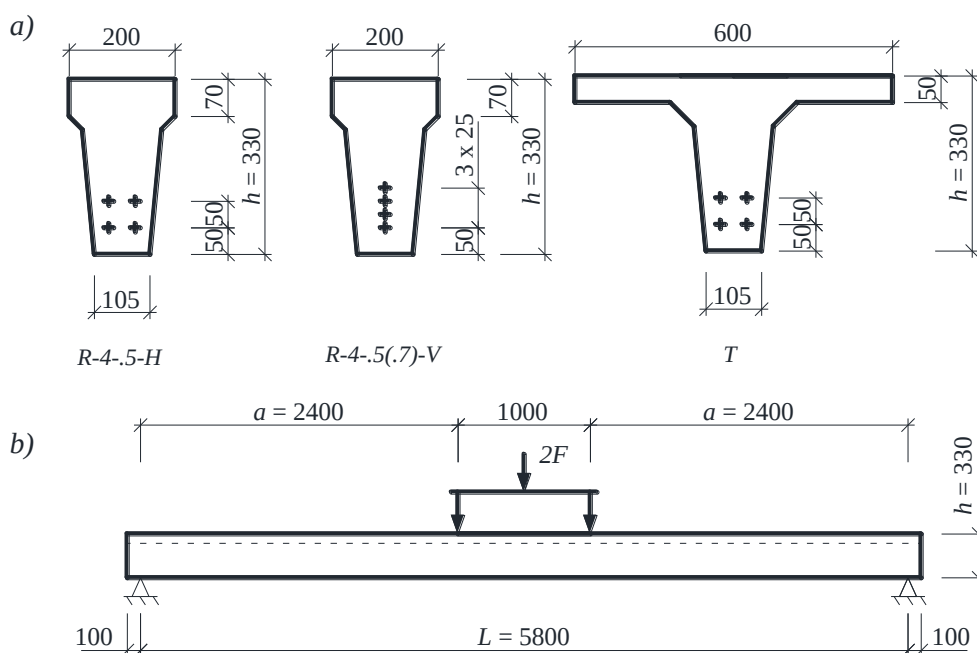
2.1 lentelė. Sijų skerspjūvio ir medžiagų charakteristikos

<i>Iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra armuotos sijos</i>										
<i>Sijos pavadinimas</i>	σ_0 , MPa	<i>Ilgis</i> , mm	<i>b</i> , mm	<i>h</i> , mm	<i>d</i> , mm	A_p , mm ²	f_c , MPa	E_c , GPa	f_p , MPa	E_p , GPa
<i>R-4-.5-H*</i>	980	5800	200	330	255	189,2	47,0	29,0	1970	147,0
<i>R-4-.5-V*</i>	980	5800	200	330	242,5	189,2	61,0	33,8	1970	147,0
<i>R-4-.7-V*</i>	1380	5800	200	330	242,5	189,2	64,0	36,9	1970	147,0
<i>R-2-.5-V*</i>	980	5800	200	330	267,5	94,6	70,0	38,5	1970	147,0
<i>T-4-.5-H*</i>	980	5800	600	330	255	189,2	47,0	29,0	1970	147,0
<i>T-4-.5-V*</i>	980	5800	600	330	242,5	189,2	61,0	33,8	1970	147,0
<i>T-4-.7-V*</i>	1380	5800	600	330	242,5	189,2	64,0	36,9	1970	147,0
<i>T-2-.5-V*</i>	980	5800	600	330	267,5	94,6	70,0	38,5	1970	147,0
<i>FRP-P1**</i>	1340	3000	80	190	158	19,63	57,4	38,6	2700	158,8
<i>FRP-P2**</i>	1340	3000	80	190	175	39,25	57,4	38,6	2700	158,8
<i>Iš anksto įtempta plienine armatūra armuotos sijos</i>										
<i>Sijos pavadinimas</i>	σ_0 , MPa	<i>Ilgis</i> , mm	<i>b</i> , mm	<i>h</i> , mm	<i>d</i> , mm	A_p , mm ²	f_c , MPa	E_c , GPa	f_p , MPa	E_p , GPa
<i>S-R-2-.5*</i>	950	5800	200	330	255	200	67,0	38,0	1900	180,0
<i>S-T-2-.5*</i>	950	5800	600	330	255	200	67,0	38,0	1900	180,0
<i>S-P1**</i>	1174	3000	80	190	158	22,4	57,4	38,6	1450	195,0
<i>S-P2**</i>	1174	3000	80	190	175	44,8	57,4	38,6	1450	195,0

Pastabos: * Pirmasis skaičius rodo įtemptų armatūros strypų skaičių, antrasis – pradinį įtempimo dydį atsižvelgiant į armatūros stiprį (50 % arba 70 %), raidė H reiškia horizontalų armatūros išdėstymą, V – vertikalų (žiūrėti 2.1 pav.). S – armuota iš anksto įtempta plienine armatūra;

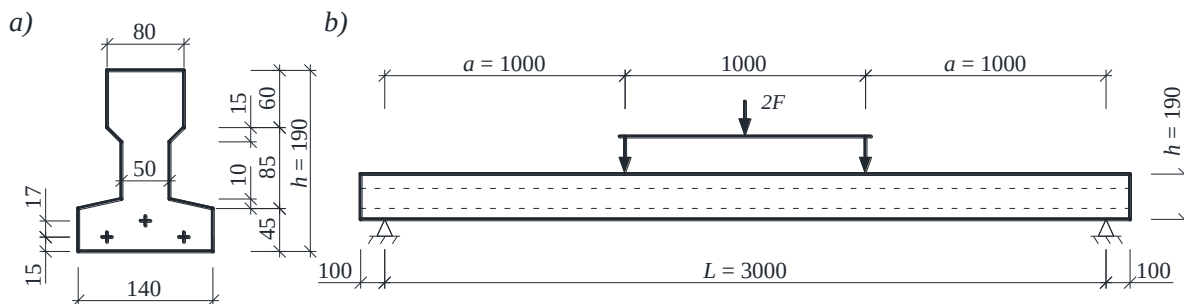
** FRP – armuota iš anksto įtempta FRP armatūra, S – armuota iš anksto įtempta plienine armatūra. Skaičiai 1 ir 2 žymi kiek armatūros lynų yra skerspjūvyje.

Sijų R ir T, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, bei sijų S-R ir S-T, armuotų plienine iš anksto įtempta armatūra, skerspjūviai ir apkrovimo schema pateikti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Eksperimentinių sijų R, T, S-R ir S-T skerspjūviai (a) ir apkrovimo schema (b)

Sijų FRP, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, ir sijų S, armuotų plienine iš anksto įtempta armatūra, skerspjūviai ir apkrovimo schema pateikti 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Eksperimentinių sijų FRP ir S skerspjūviai (a) ir apkrovimo schema (b)

2.2. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimas

Nagrinėjamos Amerikos betono instituto (angl. American Concrete Institute, toliau tekste – ACI) rekomendacijose, Eurokode 2 (toliau tekste – EC) ir Lietuvos Statybos techniniame reglamente (toliau tekste – STR) pateikiamos išankstinio įtempimo nuostolių

skaičiavimo metodikos. Tik ACI normose pateikiama nuostolių skaičiavimo metodika yra pritaikyta skaičiuoti gelžbetoninius elementus, armuotus iš anksto įtempta kompozitine armatūra, o kitose dviejose normose pateiktos skaičiavimo metodikos skirtos projektuoti plienine armatūra armuotus elementus. Skaičiavimais siekiama išsiaiškinti, ar išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo metodikos, pateiktos EC ir STR normose yra tinkamos projektuoti gelžbetoninius elementus, armuotus iš anksto įtempta neplienine kompozitine armatūra.

2.2.1. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo metodai

Skaičiavimas pagal ACI normas (American Concrete Institute). Amerikos betono instituto paruoštos projektavimo normos skirtos skaičiuoti gelžbetoninius elementus, armuotus kompozitine armatūra. Skaičiuojant pagal šių normų rekomendacijas turėtų būti išnagrinėti šie įtempiant į atsparas atsirandantys nuostoliai:

- nuostoliai dėl inkarinių įtaisų įtraukimo ir deformacijos;
- nuostoliai dėl į atsparas įtempiamos armatūros relaksacijos;
- nuostoliai dėl betono tampriosios deformacijos, atsirandantys dėl elemento apspaudimo atleidus įtemptą armatūrą;
- nuostoliai dėl betono traukimosi;
- nuostoliai dėl betono valkšnumo.

Nuostoliai dėl relaksacijos. Pagal ACI rekomendacijas bendri anglies pluošto armatūros relaksacijos nuostoliai skirstomi į tokias atskiras dalis (ACI 440.4R-04):

- a) nuostoliai dėl rišamosios medžiagos (polimerų) relaksacijos $\Delta\sigma_{r,p}$;
- b) nuostoliai dėl anglies pluoštų išsitiesinimo įtempiant $\Delta\sigma_{r,s}$;
- c) nuostoliai dėl pačių pluoštų relaksacijos $\Delta\sigma_{r,f}$.

Bendri relaksacijos nuostoliai apskaičiuojami susumuojant šiuos atskirus nuostolius (ACI 440.4R-04):

$$\Delta\sigma_{p,r} = \Delta\sigma_{r,p} + \Delta\sigma_{r,s} + \Delta\sigma_{r,f} . \quad (2.1)$$

Polimerų relaksacija. Įtempiant armatūrą dalį įtempimo perima rišamoji šios kompozitinės armatūros medžiaga (polimerai). Bėgant laikui šioje rišamojoje medžiagoje įvyksta relaksacija ir ji nebeperima pradinio įtempimo. Ši matricos relaksacija įvyksta per pirmąsias 24 – 96 valandas ir gali būti pagreitinta kaitinant gelžbetoninį elementą (Dolan *et*

al. 2001). Šio tipo relaksaciją salygoja dvi pluoštinės armatūros charakteristikos: rišamosios medžiagos ir pluoštų tamprumo modulių santykis $n_r = E_r / E_f$ ir pluoštų tūrio dalis kompozitinėje armatūroje v_f . Relaksacija apskaičiuojama pagal tokią lygtį (ACI 440.4R-04):

$$\Delta\sigma_{r,p} = n_r \cdot v_r, \quad (2.2)$$

čia $v_r = 1 - v_f$ - rišamosios medžiagos tūrio dalis kompozitinėje armatūroje.

Rišamosioms medžiagoms, naudojamoms pultruzijos procese, modulių santykis paprastai yra 1,5 % anglies pluošto armatūrai ir apie 3 % aramido pluošto armatūrai. Rišamosios medžiagos tūrio dalis dažniausiai būna nuo 35 iki 40 % armatūros skerspjūvio ploto, todėl visa polimerų relaksacija dažniausiai yra tarp 0,6 ir 1,2 % pradinio įtempimo dydžio (Dolan *et al.* 2001)..

Pluoštų išsitiesinimas. Pluoštai kompozitinėje armatūroje yra išdėstyti maždaug lygiagrečiai vienas kitam, tačiau išdėstyti visiškai tvarkingai neįmanoma. Įtempti pluoštai pasislenka matricoje ir išsitiesina, todėl įvyksta įtempių relaksacija. Šis relaksacijos nuostolis priklauso nuo pultruzijos proceso kokybiškumo. Nuostolius, dėl pluoštų išsitiesinimo, siūloma priimti 1 – 2 % ribose (Dolan *et al.* 2001).

Pluoštų relaksacija. Ši relaksacija priklauso nuo pluoštų medžiagos tipo. Tyrimais nustatyta, kad anglies pluošte relaksacija neįvyksta, todėl nuostolius R_f galima priimti lygus nuliui.

Nuostoliai dėl akimirkinės betono deformacijos apskaičiuojami pagal tokią lygtį (Edward 2009):

$$\Delta\sigma_{el} = \frac{E_f f_{cs}}{E_c} = n \cdot f_{cs}, \quad (2.3)$$

$$\text{čia } n = \frac{E_f}{E_c}; \quad (2.4)$$

E_c - betono tamprumo modulis;

f_{cs} - įtempiai nuo išankstinio apspaudimo betone įtemptosios armatūros svorio centre:

$$f_{cs} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e_p^2}{I_c}, \quad (2.5)$$

čia e_p - atstumas nuo skerspjūvio sunkio centro iki įtemptosios armatūros lynų centro tarpatriamio viduryje;

M_{Egd} - sijos savojo svorio sukeltas lenkimo momentas;

I_c - skerspjūvio inercijos momentas.

Nuostoliai dėl betono valkšnumo apskaičiuojami pagal tokią lygtį (ACI 435-R95):

$$\Delta\sigma_{p,cr} = \frac{t^{0,6}}{10 + t^{0,6}} \cdot K_{CR} \frac{E_f}{E_c} (f_{cs} - f_{csd}), \quad (2.6)$$

čia t - laikas (dienomis) nuo apkrovos pridėjimo;

$K_{CR} = 2,0$ - koeficientas, taikomas į atsparas įtempiamiems elementams;

f_{cs} - įtempiai betone įtemptosios armatūros svorio centre po įtempimo perdavimo;

f_{csd} - įtempiai įtemptosios armatūros svorio centre nuo nuolatinių apkrovų.

Nuostoliai dėl betono traukimosi apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{p,sh} = \varepsilon_{SH}(t) \cdot E_f, \quad (2.7)$$

čia $\varepsilon_{SH}(t)$ - betono traukumo deformacija laiko momentu t . Kai betonas kietėja normaliomis sąlygomis $\varepsilon_{SH}(t)$ apskaičiuojamas pagal tokią lygtį (ACI 435-R95):

$$\varepsilon_{SH}(t) = \frac{t}{35 + t} \cdot (\varepsilon_{sh})_u, \quad (2.8)$$

čia t - laikas (dienomis), kurio metu skaičiuojamas susitraukimas;

$(\varepsilon_{sh})_u$ - ribinė betono susitraukimo deformacija.

Skaičiavimas pagal Europos standartą Eurokodą 2 (LST EN 1992-1-1:2005). Šios projektavimo normos skirtos skaičiuoti plienine armatūra armuotus elementus. Skaičiuojant pagal Eurokodą (LST EN 1992-1-1:2005) turėtų būti išnagrinėti šie įtempiant į atsparas atsirandantys nuostoliai:

- nuostoliai dėl inkarinių įtaisų įtraukimo ir deformacijų;
- nuostoliai dėl į atsparas įtempiamos armatūros relaksacijos per laikotarpį, kuris praeina nuo įtemptosios armatūros įtempimo ir betono išankstinio apspaudimo;
- nuostoliai dėl betono tampriosios deformacijos, atsirandantys dėl elemento apspaudimo atleidus įtemptą armatūrą;
- nuo laiko priklausantys nuostoliai:
 - a) nuostoliai dėl betono traukumo ir valkšnumo;
 - b) nuostoliai dėl ilgalaikės iš anksto įtemptos armatūros relaksacijos.

Nuostoliai dėl armatūros relaksacijos. Eurokode pateikiamos relaksacijos skaičiavimo taisyklės skirtos plieninei armatūrai. Pagal EC rekomendacijas skiriamos trys relaksacijos klasės:

- 1 klasė: įprastinė relaksacija (viela arba lynas). Pirmos klasės armatūros relaksacijos nuostolius galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{pr} = 5,39 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{6,7 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot \sigma_{pi} \cdot 10^{-5}; \quad (2.9)$$

- 2 klasė: maža relaksacija (viela arba lynas). Antros klasės armatūros relaksacijos nuostolius galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot \sigma_{pi} \cdot 10^{-5}; \quad (2.10)$$

- 3 klasė: karštai valcuoti ir apdoroti strypai. Trečios klasės armatūros relaksacijos nuostolius galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{pr} = 1,98 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{8 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot \sigma_{pi} \cdot 10^{-5}, \quad (2.11)$$

čia $\Delta\sigma_{pr}$ - išankstinių įtempių relaksacijos nuostolių absoliučioji reikšmė;

t - po tempimo praėjęs laikas valandomis;

σ_{pi} - didžiausi tempiamieji įtempiai, kuriais veikiama įtemptoji armatūra, atėmus nuostolius, atsirandančius per tempimo procesą;

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}; \quad (2.12)$$

ρ_{1000} - relaksacijos nuostolio reikšmė (%), praėjus 1000 valandų po įtempimo vidutinėje 20 °C temperatūroje.

Nuostoliai dėl akimirkinės betono deformacijos apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{p,el} = E_f \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}, \quad (2.13)$$

čia $E_{cm}(t)$ - t dienų amžių atitinkantis betono tamprumo modulis;

$\Delta\sigma_c(t)$ - įtempių pokytis įtemptosios armatūros sunkio centre laiko momentu t .

Nuo laiko priklausantys išankstinių įtempių nuostoliai apskaičiuojami atsižvelgiant į dvejopą įtempių sumažėjimą:

- a) dėl deformacijos sumažėjimo, kurį sukelia betono deformacija dėl valkšnumo ir traukumo veikiant nuolatinėms apkrovoms;
- b) plieno įtempių sumažėjimą dėl relaksacijos tempiant.

EC normų išankstinių įtempimo nuostolių nustatymo modelis pagrįstas senėjančios medžiagos modeliu (medžiagos senėjimo koeficientas priimamas lygus 0,8). Nuostoliai dėl betono valkšnumo apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{p,cr} = \frac{\frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}, \quad (2.14)$$

čia $\varphi(\infty, t_0)$ - valkšnumo koeficientas laiko momentu t , pridėjus apkrovą laiko momentu t_0 ;

$\sigma_{c,QP}$ - greta įtemptosios armatūros esančio betono įtempiai, susidarantys dėl sąvojo svorio ir pradinių išankstinių įtempių, bei kitų taikytinų tariamai nuolatinių poveikių;

I_c - betono skerspjūvio ploto inercijos momentas;

z_{cp} - atstumas nuo betono skerspjūvio sunkio centro iki įtemptosios armatūros lynų;

A_c - betono skerspjūvio plotas;

A_p - įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas.

Nuostoliai dėl betono traukimosi apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{p,s} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}, \quad (2.15)$$

čia ε_{cs} - įvertintosios traukumo deformacijos reikšmė.

Nuostoliai dėl armatūros relaksacijos apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta\sigma_{p,r} = \frac{0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}, \quad (2.16)$$

čia $\sigma_{c,QP}$ - greta įtemptosios armatūros esančio betono įtempiai, susidarantys dėl sąvojo svorio ir pradinių išankstinių įtempių, bei kitų taikytinų tariamai nuolatinių poveikių.

Skaičiavimas pagal Statybos techninį reglamentą (STR 2.05.05:2005). Šios projektavimo normos skirtos skaičiuoti plienine armatūra armuotus elementus. Skaičiuojant pagal Statybos techninį reglamentą (STR 2.05.05:2005), nuostoliai skirstomi į pirminius, atsirandančius iki betono apspaudimo, ir antrinius, atsirandančius eksploatacijos metu. Pirminius nuostolius sudaro nuostoliai dėl:

- tempimo įrenginių inkarų deformacijos;
- armatūros įtempių relaksacijos;
- greitai pasireiškiančio betono valkšnumo.

Nuostoliai dėl armatūros įtempių relaksacijos įtempiant armatūrą mechaniniu būdu apskaičiuojami pagal tokias lygtis:

$$a) \text{ kai armatūra vielinė: } \left(0,22 \frac{\sigma_p}{f_{pk}} - 0,1 \right) \sigma_p ; \quad (2.17)$$

$$b) \text{ kai armatūra strypinė: } 0,1\sigma_p - 20 , \quad (2.18)$$

čia σ_p – išankstiniai įtemptosios armatūros įtempiai.

Nuostoliai dėl greitai pasireiškiančio betono valkšnumo apskaičiuojami pagal tokias lygtis:

$$\chi \cdot \left(40 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \leq \alpha ; \quad (2.19)$$

$$\chi \cdot \left(40 \cdot \alpha + 85 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} - \alpha \right) \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} > \alpha , \quad (2.20)$$

$$\text{čia } \alpha = 0,25 + 0,025 \cdot f_{cp} \leq 0,8 ; \quad (2.21)$$

$$\beta = 5,25 - 0,185 \cdot f_{cp} \begin{cases} \leq 2,5, \\ \geq 1,1; \end{cases} \quad (2.22)$$

σ_{cp} - įtempiai, nustatomi išilginės armatūros masės centrų lygyje, įvertinus nuostolius pagal anksčiau pateiktus punktus;

f_{cp} – charakteristinis kubinis betono stipris apspaudimo armatūra metu;

χ – koeficientas:

a) natūraliai kietėjusio betono – $\chi = 1,0$;

b) šildyto betono – $\chi = 0,85$.

Antrinius nuostolius sudaro nuostoliai dėl:

- betono traukimosi (nustatomi pagal STR 2.05.05:2005 9 lentelę);

- betono valkšnumo.

Nuostoliai dėl betono traukimosi, esant normaliam aplinkos drėgnumui, atsižvelgiant į betono sudėtį ir kietėjimo sąlygas kinta 35 – 70 MPa ribose.

Nuostoliai dėl betono valkšnumo nustatomi pagal tokias lygtis:

$$150 \cdot \chi \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}}, \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \leq 0,75; \quad (2.23)$$

$$300 \cdot \chi \cdot \left(\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} - 0,375 \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} > 0,75, \quad (2.24)$$

čia σ_{cp} - įtempiai, nustatomi išilginės armatūros masės centro lygyje, įvertinus nuostolius pagal anksčiau pateiktus punktus;

χ – koeficientas:

a) natūraliai kietėjusio betono – $\chi = 1,0$;

b) betono, šildyto esant atmosferos slėgiui – $\chi = 0,85$.

Pagal STR rekomendacijas, esant iš anksto žinomam konstrukcijos apkrovimo laikui, nuostolius dėl ilgalaikio betono valkšnumo ir traukumo reikia dauginti iš $\mu(t)$ koeficiento, nustatomo pagal formulę:

$$\mu(t) = \frac{4t}{100 + 3t}, \quad (2.25)$$

čia t – laikas paromis, nustatant nuostolius: 1) dėl valkšnumo apskaičiuojamas nuo betono gniuždymo dienos; 2) dėl betono susitraukimo – nuo betonavimo dienos.

Atlikus išankstinio įtempimo nuostolių analizę, matyti, kad skaičiuojant pagal visas tris metodikas įvertinami nuostoliai, atsirandantys dėl inkarų deformacijos, armatūros relaksacijos, betono valkšnumo ir betono traukumo.

EC ir STR normose pateikiamos armatūros relaksacijos skaičiavimo metodikos, skirtos plieninei iš anksto įtemptai armatūrai, o ACI normos pateikia rekomendacijas, skirtas skaičiuoti FRP armatūros relaksaciją. EC pateikiamos relaksacijos skaičiavimo lygtys įvertina armatūros įtempimo lygį, armatūros relaksacijos klasę ir laiką, praėjusį nuo įtempimo. STR pateikiamose lygtyse atsižvelgiama tik į įtempimo lygį ir armatūros tipą. ACI normos skirtos skaičiuoti FRP armatūros

nuostolius, tačiau tiksli skaičiavimo metodika dar nėra sukurta, kadangi FRP armatūra naudojama dar palyginti neilgai. Remiantis atliktų bandymų su FRP armatūra duomenimis, pateikiamos rekomendacijos, skirtos nustatyti ribinę armatūros relaksacijos reikšmę. Pagal ACI normas relaksacijos nuostoliai apskaičiuojami atsižvelgiant į pluoštų savybes ir jų kiekį FRP armatūroje bei armatūros išankstinio įtempimo dydį.

Nuostoliai dėl betono defomacijos atleidus inkarus pagal visas tris nagrinėtas normas apskaičiuojami remiantis tokia pat išraiška, tik EC ir STR rekomenduoja naudoti apspaudimo metu esantį betono tamprumo modulį, o ne pilnąjį.

ACI ir EC normose nuostoliams dėl betono valkšnumo skaičiuoti pateikiamos labai panašios išraiškos, kuriose naudojamas valkšnumo koeficientas. Skirtumas tik toks, kad ACI normose, siekiant supaprastinti skaičiavimus, šis koeficientas priimamas nekintantis ir į atsparas įtempiamiems elementams yra lygus 2. EC normos rekomenduoja šį koeficientą apskaičiuoti pagal pateiktas lygtis arba imti apytikslį iš pateikto grafiko, o pats koeficientas kinta priklausomai nuo betono stiprumo klasės. STR normose nuostoliai dėl valkšnumo padalinti į nuostolius dėl greitai pasireiškiančio valkšnumo ir pilno valkšnumo ir skaičiuojami pagal supaprastintą išraišką, kurioje įvertinamas betono įtempio dydis atsižvelgiant į betono kubinį stiprį apspaudimo metu.

Skaičiuojant nuostolius dėl betono susitraukimo pagal ACI ir EC normas atsižvelgiama į betono traukumo deformaciją. STR normos šiuo atžvilgiu yra konservatyvesnės, jose siūloma šiuos nuostolius imti iš lentelės, atsižvelgiant į betono klasę, betono sudėtį ir kietėjimo sąlygas.

Apžvelgus visas tris nuostolių skaičiavimo metodikas matyti, kad STR ir ACI normose pateiktos įtempimo nuostolių skaičiavimo metodikos yra konservatyvesnės lyginant su metodika, pateikta EC normose.

2.2.2. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių teorinė analizė

Panaudojant aptartas metodikas buvo atlikti kelių autorių (Abdelrahman ir Rizkalla 1997; Borosnyoi 2002) gelžbetoninių eksperimentinių sijų, armuotų anglies pluošto kompozitine armatūra, išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimai (sijų duomenys pateikti 2.1 poskyryje).

Sijų įtempimo nuostolių skaičiavimai atliekami pagal tris projektavimo normas: EC, ACI ir STR. ACI normose pateikta metodika skirta skaičiuoti elementus, armuotus kompozitine armatūra, o metodikos, pateiktos EC ir STR normose, skirtos skaičiuoti plienine armatūra armuotus elementus. Skaičiavimai atliekami laiko tarpui, atitinkančiam rekomenduojamą projektinį eksploatavimo laiką, t.y. apie 50 metų. Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.2 – 2.4 lentelėse, grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.3 paveiksle.

2.2 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas ($t = 50$ metų)

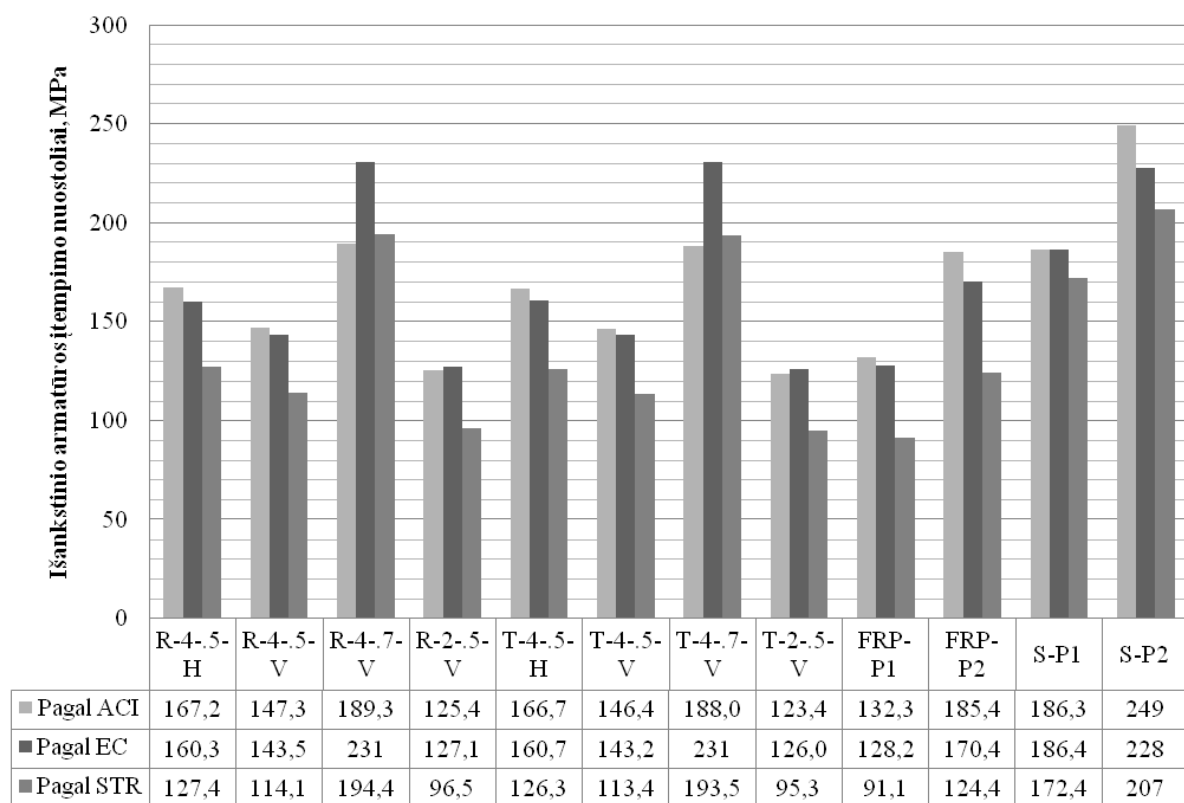
Sijos pavadinimas	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Viso [MPa]
<i>R-4-.5-H</i>	3,60	25,5	44,8	76,0	17,29	167,2
<i>R-4-.5-V</i>	3,60	25,5	33,8	71,0	13,37	147,3
<i>R-4-.7-V</i>	3,60	35,9	43,7	70,3	35,9	189,3
<i>R-2-.5-V</i>	3,60	25,5	19,22	69,0	8,10	125,4
<i>T-4-.5-H</i>	3,60	25,5	43,8	76,0	17,88	166,7
<i>T-4-.5-V</i>	3,60	25,5	33,4	71,0	12,92	146,4
<i>T-4-.7-V</i>	3,60	35,9	43,1	70,3	35,1	188,0
<i>T-2-.5-V</i>	3,60	25,5	18,56	69,0	6,82	123,4
<i>FRP-P1</i>	3,18	34,8	12,88	78,0	3,40	132,3
<i>FRP-P2</i>	3,18	34,8	34,0	78,0	35,4	185,4
<i>S-P1</i>	4,00	67,7	15,89	95,8	3,04	186,3
<i>S-P2</i>	4,00	67,7	42,0	95,8	39,9	249

2.3 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas ($t = 50$ metų)

Sijos pavadinimas	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,s}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl ilgalaikės relaksacijos, $\Delta\sigma_{p,r}$ [MPa]	Viso [MPa]
<i>R-4-.5-H</i>	3,60	2,70	44,4	68,0	16,71	24,9	160,3
<i>R-4-.5-V</i>	3,60	2,70	33,9	65,9	10,67	26,7	143,5
<i>R-4-.7-V</i>	3,60	22,8	43,2	65,8	25,43	69,9	231
<i>R-2-.5-V</i>	3,60	2,70	19,5	66,3	5,96	29,0	127,1
<i>T-4-.5-H</i>	3,60	2,70	43,4	68,0	17,93	24,9	160,7
<i>T-4-.5-V</i>	3,60	2,70	33,5	65,9	10,74	26,8	143,2
<i>T-4-.7-V</i>	3,60	22,8	42,7	65,8	25,9	70,0	231
<i>T-2-.5-V</i>	3,60	2,70	18,90	66,3	5,30	29,1	126,0
<i>FRP-P1</i>	3,18	2,02	12,87	76,3	3,45	30,3	128,2
<i>FRP-P2</i>	3,18	2,02	33,5	73,7	30,3	27,7	170,4
<i>S-P1</i>	4,00	23,0	15,44	92,9	3,59	47,5	186,4
<i>S-P2</i>	4,00	23,0	40,0	88,6	34,2	38,1	228

2.4 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas ($t = 50$ metų)

Sijos pavadinimas	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Dėl greitai pasireišk. bet. valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Viso [MPa]
<i>R-4-.5-H</i>	3,60	9,25	5,31	44,1	5,17	60,0	127,4
<i>R-4-.5-V</i>	3,60	9,25	3,83	33,6	3,79	60,0	114,1
<i>R-4-.7-V</i>	3,60	74,7	5,20	41,6	9,30	60,0	194,4
<i>R-2-.5-V</i>	3,60	9,25	1,907	19,39	2,36	60,0	96,5
<i>T-4-.5-H</i>	3,60	9,25	4,95	43,2	5,37	60,0	126,3
<i>T-4-.5-V</i>	3,60	9,25	3,59	33,2	3,68	60,0	113,4
<i>T-4-.7-V</i>	3,60	74,7	4,95	41,1	9,14	60,0	193,5
<i>T-2-.5-V</i>	3,60	9,25	1,654	18,77	2,02	60,0	95,3
<i>FRP-P1</i>	3,18	12,31	1,733	12,77	1,155	60,0	91,1
<i>FRP-P2</i>	3,18	12,31	4,79	33,3	10,89	60,0	124,4
<i>S-P1</i>	4,00	91,7	1,578	14,52	0,592	60,0	172,4
<i>S-P2</i>	4,00	91,7	4,33	37,6	9,24	60,0	207



2.3 pav. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimo rezultatų palyginimas ($t = 50$ metų)

Kaip matyti 2.2 – 2.4 lentelėse ir 2.3 paveiksle, skaičiuojant pagal EC ir ACI normas, nežiūrint į tai, kad jos skirtos skirtingo tipo armatūroms, gaunami panašūs rezultatai, o skirtumas siekia nuo 1 iki 9 %. Skirtumas padidėja iki 22 % sijose, kuriose pradinis įtempimas siekia $0,7 \cdot f_{pk}$ (sijos R-4-7-V ir T-4-7-V), kadangi tuomet skaičiuojant pagal EC normas gaunami žymiai didesni nuostoliai dėl armatūros relaksacijos. Skaičiuojant pagal STR normas gaunamas didesnis skirtumas, lyginant su kitomis dviem normomis. Čia suminiai nuostoliai gaunami 3-33 % mažesni, lyginant su nuostoliais, gautais skaičiuojant pagal ACI normas.

Pagal STR normas apskaičiuoti suminiai nuostoliai gaunami mažesni, lyginant su rezultatais, gautais skaičiuojant pagal kitas dvi normas. Iš dalies taip yra dėl skaičiavimo metodikos supaprastinimų. Pagal STR normų rekomendaciją nuostoliai dėl susitraukimo imami iš lentelės ir visoms betono klasėms, aukštesnėms už C30/37, yra vienodi (60 MPa), o skaičiuojant pagal kitas dvi metodikas šie nuostoliai apskaičiuojami atsižvelgiant į betono klasę ir gaunami žymiai didesni. Didžiausi nuostoliai dėl betono susitraukimo gaunami skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą metodiką. Skaičiuojant pagal EC normas šie nuostoliai gaunami vidutiniškai 6 % mažesni nei skaičiuojant pagal ACI normas, o skaičiuojant pagal STR vidutinis skirtumas siekia 18 %.

Pagal STR normas apskaičiuoti nuostoliai dėl betono valkšnumo taip pat gaunami mažesni, nei skaičiuojant pagal ACI ir EC. Taip yra todėl, kad STR normose šie nuostoliai apskaičiuojami įvertinant įtempius betone ir betono klasę, o skaičiuojant pagal EC ir ACI normas įvertinami įtempiai betone, armatūros ir betono tamprumo modulių santykis ir valkšnumo koeficientas, kuris skirtingoms betono klasėms skiriasi. Didžiausi nuostoliai dėl valkšnumo gaunami skaičiuojant pagal ACI normas ir gaunami vidutiniškai 13 % didesni nei skaičiuojant pagal EC normas, ir 46 % didesni nei skaičiuojant pagal STR normas.

Nuostoliai dėl armatūros relaksacijos gaunami labai skirtingi. Skaičiuojant pagal ACI normas relaksacijos nuostoliai gaunami vidutiniškai 22 % mažesni nei skaičiuojant pagal EC normas, o kai pradinis įtempimas siekia $0,7f_{pk}$ (sijos R-4-7-V ir T-4-7-V), skirtumas padidėja iki 2,2 karto. Taip yra todėl, kad EC ir STR normos skirtos skaičiuoti elementus, armuotus plienine armatūra, o ACI normos – armuotus kompozitine armatūra. Dėl šios priežasties skaičiuojant armatūros relaksaciją ir gaunami tokie skirtingi rezultatai. Taip pat galima pastebėti, kad skaičiuojant pagal STR normas, relaksacijos nuostoliai gaunami vidutiniškai 50 % mažesni nei skaičiuojant pagal EC normas. Taip yra todėl, kad STR normos nėra pritaikytos skaičiuoti nuostolius elementų, kurių pradinis įtempimas siekia tik $0,5f_{pk}$. Šios

normos skirtos skaičiuoti elementams, armuotiems plienine iš anksto įtempta armatūra, kuriuose pradinio įtempimo dydis įprastai yra didesnis. STR normose pateikta relaksacijos nuostolių skaičiavimo metodika įvertina tik pradinio įtempimo dydį ir jo santykį su įtempiamos armatūros laikomąja galia, todėl labai priklauso nuo pradinio įtempimo dydžio.

2.2 lentelėje galima matyti, kad pagal ACI normas apskaičiuoti relaksacijos nuostoliai svyruoja nedaug priklausomai nuo įtempimo lygio, t.y. padidėjus pradiniam įtempimo dydžiui nuo 50 % (sijos R-4-.5-V ir T-4-.5-V) iki 70 % (sijos R-4-.7-V ir T-4-.7-V), relaksacijos nuostoliai padidėjo apie 40 %. Skaičiuojant pagal EC ir STR normas šie nuostoliai labai kinta didėjant armatūros įtempimo dydžiui: skaičiuojant pagal EC padidėjus pradiniam įtempimui nuo 50 % iki 70 %, relaksacijos nuostoliai padidėja daugiau nei 3,6 karto, o pagal STR – apie 8 kartus. Taip yra todėl, kad skaičiuojant pagal EC ir STR normas, relaksacijos nuostoliai tiesiogiai priklauso nuo pradinio įtempimo dydžio santykio su armatūros laikomąja galia, o pagal ACI rekomendacijas šie nuostoliai apskaičiuojami imant nustatytą procentinę pradinio įtempimo dalį.

2.2.3. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo sijos betono stiprumo klasės

Siekiant nustatyti kurie faktoriai turi didžiausią įtaką armatūros išankstinių įtempių nuostolių dydžiui, atliekama analizė. 2.5 – 2.7 lentelėse pateikti nuostolių skaičiavimai kintant gelžbetoninio elemento betono stiprumo klasei ir atitinkamai betono tamprumo moduliui. Skaičiavimai atlikti elementui, kurio pradinio įtempimo dydis siekia $0,6 f_{fu}$. Grafinis išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.4 paveiksle.

2.5 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal
ACI normas, kai keičiama betono stiprumo klasė

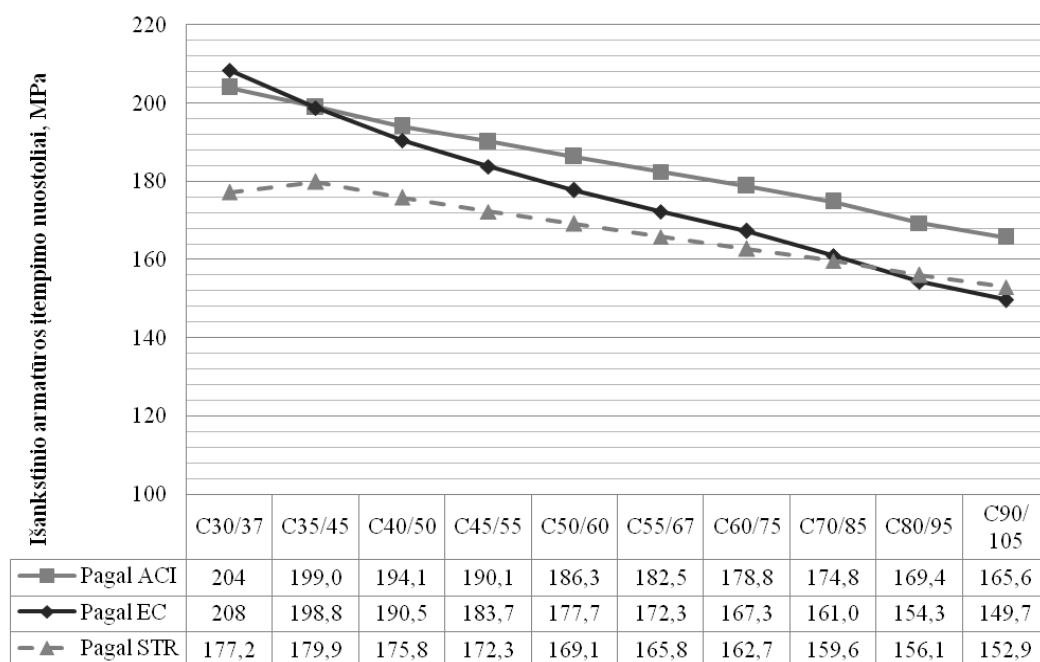
Betono stiprumo klasė	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Viso [MPa]
<i>C30/37</i>	3,60	30,7	50,5	83,6	35,6	204
<i>C35/45</i>	3,60	30,7	49,0	81,1	34,6	199,0
<i>C40/50</i>	3,60	30,7	47,6	78,5	33,8	194,1
<i>C45/55</i>	3,60	30,7	46,3	76,7	32,9	190,1
<i>C50/60</i>	3,60	30,7	45,0	74,8	32,1	186,3
<i>C55/67</i>	3,60	30,7	43,8	73,0	31,4	182,5
<i>C60/75</i>	3,60	30,7	42,7	71,2	30,6	178,8
<i>C70/85</i>	3,60	30,7	41,6	69,0	30,0	174,8
<i>C80/95</i>	3,60	30,7	39,7	66,8	28,7	169,4
<i>C90/105</i>	3,60	30,7	37,9	66,0	27,5	165,6

2.6 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal
EC normas, kai keičiama betono stiprumo klasė

Betono stiprumo klasė	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono susitraukimo , $\Delta\sigma_{p,s}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl ilgalaikės relaksacijos, $\Delta\sigma_{p,r}$ [MPa]	Viso [MPa]
<i>C30/37</i>	3,60	3,23	54,6	72,3	55,1	19,62	208
<i>C35/45</i>	3,60	3,23	53,0	71,2	47,8	20,1	198,8
<i>C40/50</i>	3,60	3,23	51,5	69,8	42,0	20,4	190,5
<i>C45/55</i>	3,60	3,23	50,0	68,9	37,3	20,7	183,7
<i>C50/60</i>	3,60	3,23	48,7	67,8	33,4	21,0	177,7
<i>C55/67</i>	3,60	3,23	47,4	66,6	30,2	21,3	172,3
<i>C60/75</i>	3,60	3,23	46,2	65,4	27,4	21,5	167,3
<i>C70/85</i>	3,60	3,23	45,0	63,9	23,6	21,7	161,0
<i>C80/95</i>	3,60	3,23	42,9	62,3	20,2	22,1	154,3
<i>C90/105</i>	3,60	3,23	40,9	62,1	17,5	22,4	149,7

2.7 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiama betono stiprumo klasė

Betono stiprumo klasė	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Dėl greitai pasireišk. bet. valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl betono susitraukimo, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Viso [MPa]
C30/37	3,60	37,5	12,86	53,0	20,2	50,0	177,2
C35/45	3,60	37,5	10,59	51,4	16,80	60,0	179,9
C40/50	3,60	37,5	9,55	50,0	15,21	60,0	175,8
C45/55	3,60	37,5	8,69	48,6	13,91	60,0	172,3
C50/60	3,60	37,5	7,98	47,3	12,81	60,0	169,1
C55/67	3,60	37,5	7,16	46,0	11,53	60,0	165,8
C60/75	3,60	37,5	6,40	44,8	10,35	60,0	162,7
C70/85	3,60	37,5	5,65	43,7	9,17	60,0	159,6
C80/95	3,60	37,5	5,07	41,6	8,26	60,0	156,1
C90/105	3,60	37,5	4,60	39,7	7,51	60,0	152,9



2.4 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiama betono stiprumo klasė, skaičiavimo rezultatų palyginimas

Kaip matyti 2.4 paveiksle ir 2.5 – 2.7 lentelėse, skaičiuojant pagal visas tris normas, nuostoliai didėjant betono klasei mažėja. Skaičiuojant pagal ACI normas, padidinus betono stiprumo klasę nuo C30/37 iki C90/105 (atitinkamai betono tamprumo moduliui padidėjus nuo 33 GPa iki 44 GPa), nuostoliai sumažėjo 19 %, skaičiuojant pagal EC normas – 28 %, pagal STR – beveik 14 %.

Skaiciuojant pagal STR normas gaunamas mažiausias sumažėjimas, kadangi nuostoliai dėl betono susitraukimo nekinta didėjant betono klasei, tuo tarpu skaičiuojant pagal EC ir ACI normas didėjant betono stiprumo klasei šie nuostoliai mažėja.

Skirtumas tarp nuostolių skaičiavimo pagal EC ir ACI normas didėja, didėjant betono stiprumo klasei, pagrinde dėl šiek tiek skirtingos nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimo metodikos. Abiejų normų skaičiavimai remiasi valkšnumo koeficiento naudojimu, tačiau pagal ACI šis koeficientas dėl skaičiavimo supaprastinimo priimamas nekintantis ir iš anksto įtemptoms konstrukcijoms lygus 2,0. Tuo tarpu skaičiuojant pagal EC normas šis koeficientas keičiantis betono klasei kinta. Kai betono klasė C30/37, valkšnumo koeficientas lygus 3,30, o kai C90/105 – 1,25, t.y. didėjant betono klasei valkšnumo koeficientas mažėja. Kadangi skaičiuojant pagal (2.14) lygtį šis valkšnumo koeficientas tiesiogiai proporcingas nuostolių dydžiui, tai ir nuostoliai dėl betono valkšnumo taip pat mažėja (sumažėja daugiau nei 3,1 karto).

2.2.4. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo armatūros tamprumo modulio

2.8 – 2.10 lentelėse pateikti skaičiavimai kintant FRP armatūros tamprumo moduliui. Skaičiavimai atlikti elementui, kurio pradinio įtempimo dydis siekia $0,6 f_{fu}$. Grafinis išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis, rezultatų palyginimas pateiktas 2.5 paveiksle.

2.8 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis

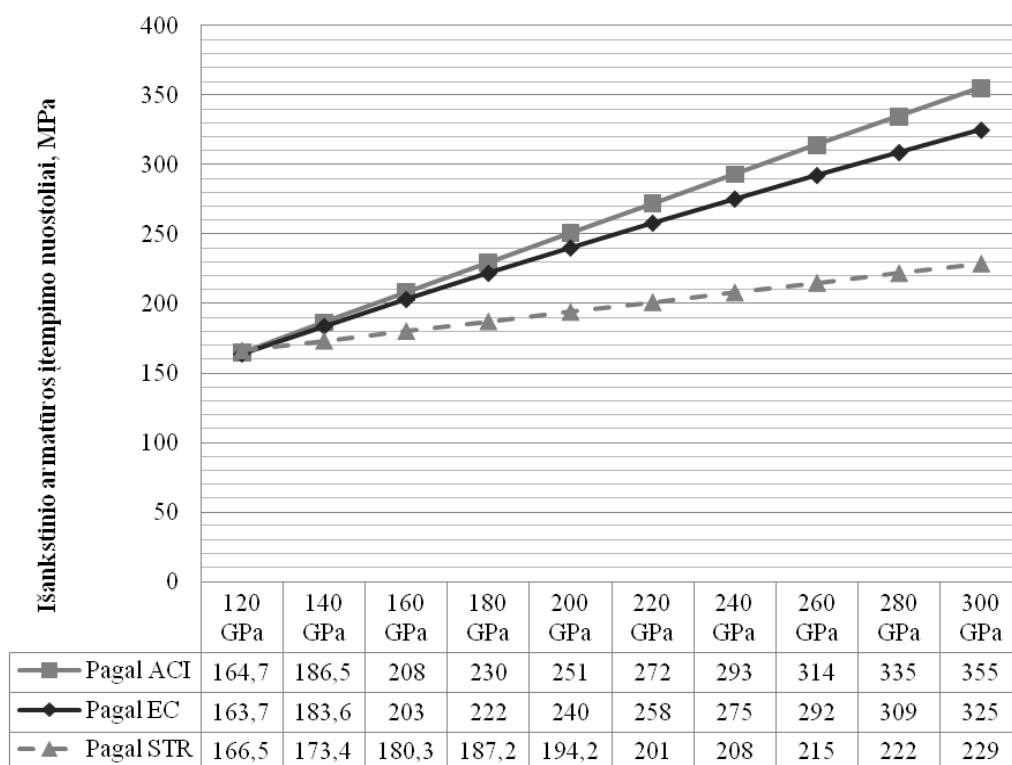
E_f	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,ei}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Viso [MPa]
120 GPa	2,94	30,7	38,9	64,1	28,2	164,7
140 GPa	3,43	30,7	45,3	74,8	32,3	186,5
160 GPa	3,92	30,7	51,8	85,4	36,4	208
180 GPa	4,41	30,7	58,2	96,1	40,2	230
200 GPa	4,90	30,7	64,7	106,8	44,0	251
220 GPa	5,39	30,7	71,1	117,5	47,5	272
240 GPa	5,88	30,7	77,5	128,2	51,0	293
260 GPa	6,37	30,7	84,0	138,8	54,2	314
280 GPa	6,86	30,7	90,4	149,5	57,4	335
300 GPa	7,35	30,7	96,8	160,2	60,3	355

2.9 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis

E_f	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta l}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betonoitraukimosi, $\Delta\sigma_{p,s}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl ilgalaikės relaksacijos, $\Delta\sigma_{p,r}$ [MPa]	Viso [MPa]
120 GPa	2,94	3,24	42,0	58,2	35,7	21,6	163,7
140 GPa	3,43	3,23	49,0	66,8	40,4	20,7	183,6
160 GPa	3,92	3,22	56,0	75,2	44,7	19,89	203
180 GPa	4,41	3,21	63,0	83,4	48,8	19,10	222
200 GPa	4,90	3,20	69,9	91,3	52,5	18,36	240
220 GPa	5,39	3,20	76,9	99,0	55,9	17,65	258
240 GPa	5,88	3,19	83,9	106,5	59,1	16,97	275
260 GPa	6,37	3,18	90,8	113,8	62,0	16,32	292
280 GPa	6,86	3,17	97,8	120,8	64,6	15,71	309
300 GPa	7,35	3,16	104,7	127,7	67,1	15,12	325

2.10 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis

E_f	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta l}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Dėl greitai pasireišk. bet. valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Viso [MPa]
120 GPa	2,94	37,5	9,65	40,8	15,58	60,0	166,5
140 GPa	3,43	37,5	9,57	47,6	15,31	60,0	173,4
160 GPa	3,92	37,5	9,50	54,4	15,04	60,0	180,3
180 GPa	4,41	37,5	9,43	61,1	14,77	60,0	187,2
200 GPa	4,90	37,5	9,36	67,9	14,50	60,0	194,2
220 GPa	5,39	37,5	9,29	74,7	14,24	60,0	201
240 GPa	5,88	37,5	9,21	81,4	13,97	60,0	208
260 GPa	6,37	37,5	9,14	88,1	13,70	60,0	215
280 GPa	6,86	37,5	9,07	94,9	13,43	60,0	222
300 GPa	7,35	37,5	9,00	101,6	13,17	60,0	229



2.5 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis, skaičiavimo rezultatų palyginimas

Kaip matyti 2.5 paveiksle ir 2.8 – 2.10 lentelėse, skaičiuojant pagal ACI ir EC normas, nuostoliai didėjant FRP armatūros tamprumo moduliui labai didėja, o skaičiuojant pagal STR normas nuostoliai padidėja nedaug. FRP armatūros tamprumo moduliui padidėjus nuo 120 GPa iki 300 GPa, nuostoliai apskaičiuoti pagal ACI normas padidėjo beveik 116 %, pagal EC – padidėjo beveik 100 %, o skaičiuojant pagal STR normas tik 38 %. Matyti, kad didžiausia problema yra nuostolių dėl betono traukimosi skaičiavime, kadangi jie skaičiuojant pagal STR normas nekinta ir nepriklauso nuo armatūros tamprumo modulio. Tuo tarpu pagal ACI ir EC normas šie nuostoliai skaičiuojami įvertinant armatūros tamprumo modulį, tad nuostoliai dėl betono traukimosi padidėja daugiau nei 2 kartus.

Skaiciuojant pagal STR normas, nuostoliai dėl betono valkšnumo priklauso tik nuo įtempių betone ir betono klasės, todėl rezultatas nepriklauso nuo armatūros tamprumo modulio. ACI ir EC normose pateiktose šių nuostolių skaičiavimo išraiškose yra armatūros ir betono tamprumo modulių santykis, todėl nuostolių dydis priklauso nuo armatūros savybių. Padidinus kompozitinės armatūros tamprumo modulį 2,5 karto (nuo 120 GPa iki 300 GPa), pagal ACI ir EC normas apskaičiuoti nuostoliai dėl betono valkšnumo padidėja atitinkamai 2,1 ir 1,9 karto, o pagal STR normas – sumažėja 12 %.

2.2.5. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dydžio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio

Gelžbetoninėse iš anksto įtemptose konstrukcijose plieniniai lynai dažniausiai įtempiami iki 85 % savo stiprio, t.y. apie 0,005 santykinės deformacijos. Naudojant FRP lynus, leidžiami įtempiai paprastai ribojami iki 40 – 65 procentų jų stiprio. Toks mažesnis įtempių intervalas atitinka deformacijas siekiančias 0,008 – 0,012, t.y. 1,5 – 2,5 karto didesnes nei įprasta plienui. Anglies pluošto armatūros ribiniai įtempiai atsižvelgiant į ACI rekomendacijas turi neviršyti $0,65 f_{fu}$ (ACI 440.4R-2004). Nuostolių skaičiavimo, kai keičiamas kompozitinės armatūros pradinio įtempimo dydis, rezultatai pateikti 2.11 – 2.13 lentelėse, grafinis rezultatų palyginimas pateiktas 2.6 paveiksle.

2.11 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal ACI normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis

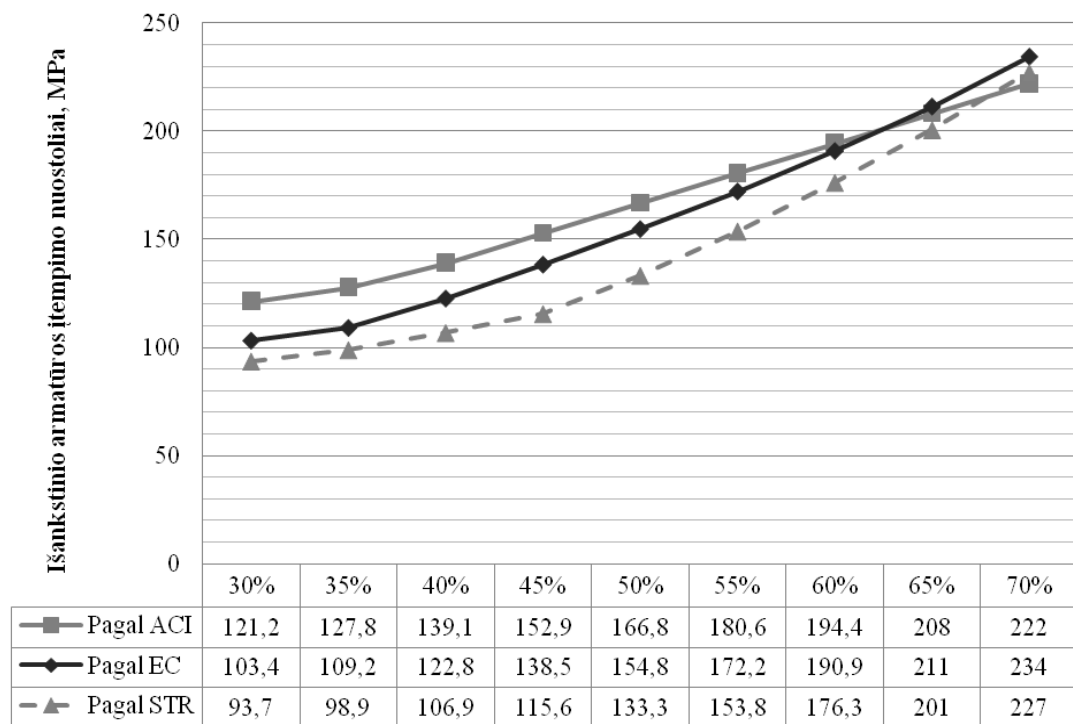
Pradinis įtempimo dydis	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Viso [MPa]
$0,3 f_{fu}$	3,60	15,37	23,8	78,5	0	121,2
$0,35 f_{fu}$	3,60	17,93	27,7	78,5	0	127,8
$0,4 f_{fu}$	3,60	20,5	31,7	78,5	4,78	139,1
$0,45 f_{fu}$	3,60	23,0	35,7	78,5	12,07	152,9
$0,5 f_{fu}$	3,60	25,6	39,7	78,5	19,35	166,8
$0,55 f_{fu}$	3,60	28,2	43,7	78,5	26,6	180,6
$0,6 f_{fu}$	3,60	30,7	47,7	78,5	33,9	194,4
$0,65 f_{fu}$	3,60	33,3	51,7	78,5	41,2	208
$0,7 f_{fu}$	3,60	35,9	55,6	78,5	48,5	222

2.12 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal EC normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis

Pradinis įtempimo dydis	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,s}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl ilgalaikės relaksacijos, $\Delta\sigma_{p,r}$ [MPa]	Viso [MPa]
$0,3 f_{fu}$	3,60	0,099	25,8	69,8	0	4,10	103,4
$0,35 f_{fu}$	3,60	0,184	30,1	69,8	0	5,56	109,2
$0,4 f_{fu}$	3,60	0,336	34,4	69,8	7,26	7,41	122,8
$0,45 f_{fu}$	3,60	0,603	38,7	69,8	16,02	9,72	138,5
$0,5 f_{fu}$	3,60	1,069	43,0	69,8	24,8	12,59	154,8
$0,55 f_{fu}$	3,60	1,875	47,3	69,8	33,5	16,15	172,2
$0,6 f_{fu}$	3,60	3,26	51,5	69,8	42,1	20,5	190,9
$0,65 f_{fu}$	3,60	5,64	55,8	69,8	50,7	25,8	211
$0,7 f_{fu}$	3,60	9,69	59,9	69,8	59,1	32,2	234

2.13 lentelė. Išankstinio armatūros įtempimo nuostolių skaičiavimas pagal STR normas, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis

Pradinis įtempimo dydis	Dėl inkarų deformacijų, $\Delta\sigma_{p,\Delta}$ [MPa]	Relaksacijos, $\Delta\sigma_{pr}$ [MPa]	Dėl greitai pasireišk. bet. valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Nuo apspaudimo, $\Delta\sigma_{p,el}$ [MPa]	Dėl betono valkšnumo, $\Delta\sigma_{p,cr}$ [MPa]	Dėl betono traukimosi, $\Delta\sigma_{p,sh}$ [MPa]	Viso [MPa]
$0,3 f_{fu}$	3,60	0	4,30	25,8	0	60,0	93,7
$0,35 f_{fu}$	3,60	0	5,24	30,1	0	60,0	98,9
$0,4 f_{fu}$	3,60	0	6,18	34,4	2,69	60,0	106,9
$0,45 f_{fu}$	3,60	0	7,11	38,7	6,17	60,0	115,6
$0,5 f_{fu}$	3,60	9,8	7,96	42,6	9,30	60,0	133,3
$0,55 f_{fu}$	3,60	22,8	8,77	46,4	12,33	60,0	153,8
$0,6 f_{fu}$	3,60	37,8	9,56	50,0	15,27	60,0	176,3
$0,65 f_{fu}$	3,60	55,1	10,34	53,6	18,14	60,0	201
$0,7 f_{fu}$	3,60	74,5	11,09	57,1	20,9	60,0	227



2.6 pav. Išankstinio įtempimo nuostolių, kai keičiamas FRP armatūros pradinio įtempimo dydis, skaičiavimo rezultatų palyginimas

Kaip matyti 2.6 paveiksle ir 2.11 – 2.13 lentelėse, didėjant armatūros pradinio įtempimo dydžiui didėja ir patiriamų nuostolių dydis. Padidinus įtempimą du kartus, skaičiuojant pagal ACI normas nuostolių dydis padidėjo 83 %, pagal EC – 114 %, o pagal STR – 142 %.

Kadangi betono ir armatūros tamprumo modulis nekinta, nekinta ir nuostoliai dėl betono susitraukimo, todėl šiuo atveju rezultatai, gauti skaičiuojant pagal visas tris normas, taip žymiai nesiskiria. Šiuo atveju didžiausią įtaką daro nuostoliai dėl armatūros relaksacijos. Pagal ACI skaičiavimus relaksacijos nuostoliai, padidinus pradinį armatūros įtempimą 2 kartus, padidėja maždaug 2,3 karto, pagal EC – 5,8 karto, o pagal STR šie nuostoliai atsiranda tik pasiekus 50 % pradinio įtempimo ribą ir toliau jį keliant padidėja 7,6 karto. Taip yra todėl, kad EC ir STR normose pateiktos relaksacijos nuostolių skaičiavimo metodikos skirtos skaičiuoti nuostolius elementų, armuotų iš anksto įtempta plienine armatūra, ir labai priklauso nuo armatūros įtempimo dydžio ir jos stiprio santykio. Todėl šie nuostoliai labai padidėja didinant pradinio įtempimo dydį.

2.2.6. Išvados

Atsižvelgiant į atliktus skaičiavimus matyti, kad didžiausią įtaką išankstinio įtempimo nuostoliams turi kompozitinės armatūros tamprumo modulis (kitais tariant, armatūros ir betono tamprumo modulių santykis) ir šios armatūros pradinio įtempimo dydis. Dėl šios priežasties galima daryti išvadą, kad EC normose pateikiama išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimo metodika dalinai tinka skaičiuoti elementų, armuotų įtempta FRP armatūra, įtempių nuostolius, kadangi skaičiavimo išraiškose įvertinamos armatūros savybės, t.y. naudojamas armatūros tamprumo modulis. Išimtis yra nuostolių dėl armatūros relaksacijos skaičiavimas. Kadangi EC projektavimo normos skirtos skaičiuoti elementus, armuotus plienine armatūra, jose pateiktos nuostolių dėl armatūros relaksacijos skaičiavimo išraiškos nėra tinkamos skaičiuoti kompozitine armatūra armuotus elementus. Kompozitinės armatūros relaksacija yra mažesnė nei plieninės armatūros, todėl pagal EC normas apskaičiuoti relaksacijos nuostoliai gaunami per dideli.

Atlikus analizę nustatyta, kad STR normose pateikta skaičiavimo metodika nėra tinkama skaičiuoti nuostoliams elementuose su iš anksto įtempta FRP armatūra, kadangi nė vienoje normose pateikiamoje skaičiavimo išraiškoje neįvertinamas armatūros tamprumo modulis. Skaičiuojant elementus, įtemptus naudojant plieninę armatūrą, šis dydis beveik neturi įtakos, kadangi plieninės armatūros tamprumo modulis visuomet yra apie 200 GPa. Tačiau FRP armatūros tamprumo modulis gali būti labai įvairus. Jis priklauso nuo naudojamų pluoštų ir medžiagų, iš kurių gaminama kompozitinė armatūra, savybių, gaminimo technologijos ir kitų faktorių. Tamprumo modulis gali kisti nuo 100 GPa net iki 580 GPa, todėl turi labai didelę reikšmę išankstinio įtempimo nuostolių dydžiui.

2.3. Statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas

Šiame poskyryje nagrinėjamos statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodikos. Amerikos betono instituto rekomenduojama skaičiavimo metodika skirta skaičiuoti elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, statmenojo pjūvio laikomąją galią. Europoje tokių elementų projektavimui pritaikyta skaičiavimo metodika dar nėra sukurta, tačiau Europos šalių mokslininkai sudarė bendras rekomendacijas Fib (Fib bulletin 40 2007), kuriomis siūloma naudotis projektuojant gelbetoninius elementus, armuotus kompozitine armatūra. Fib rekomendacijose pateikta statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodika išvesta iš Eurokode 2 pateiktos metodikos. Taip pat pateikiama

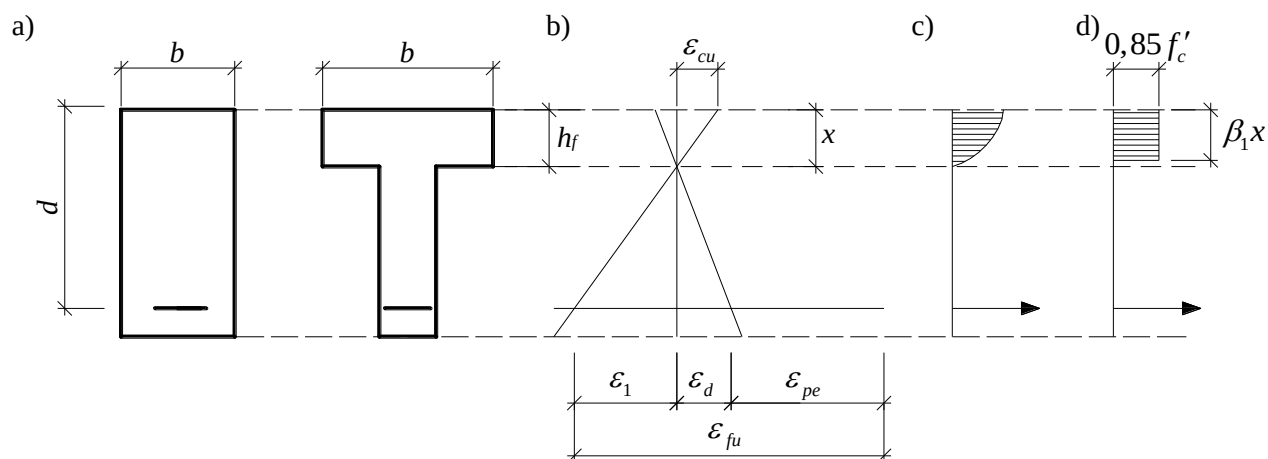
Lietuvos Statybos techniniame reglamente esanti statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodika, kuri naudojama projektuoti plienine armatūra armuotus elementus. Atliekant analizę siekiama nustatyti, kuri skaičiavimo metodika yra tinkamiausia FRP armatūra armuotų gelžbetoninių elementų projektavimui.

2.3.1. Statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodai

Skaičiavimas pagal ACI normas (American Concrete Institute) (ACI 440.4R-04; Burke ir Dolan 2001). ACI normose pateikta statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodika pritaikyta skaičiuoti kompozitine armatūra iš anksto įtemptus gelžbetoninius elementus. Skaičiavimuose daromos šios prielaidos:

- gniuždomo betono įtempių diagrama stačiakampė;
- betono ir FRP armatūros deformacijų dydis proporcingas atstumui iki neutralios ašies (po deformacijos pjūvis išlieka statmenas elemento ašiai, t.y. galioja plokščių pjūvių hipotezė);
- gniuždomo betono ribinė deformacija priimama lygi 0,003;
- tempiamosios zonos betono darbas neįvertinamas;
- FRP armatūra iki suirimo dirba tiesiškai tamprioje stadijoje;
- sukibimas tarp betono ir FRP armatūros laikomas idealiu.

Remiantis šiuo metodu skaičiavimai atliekami pagal 2.7 paveiksle pateiktą schemą. Skaičiavimuose naudojama idealizuota įtempių diagrama.



2.7 pav. Skerspjūvio skaičiuojamoji schema: a – skerspjūvis; b – deformacijų diagrama; c – įtempių diagrama; d – idealizuota įtempių diagrama (Burke ir Dolan 2001)

Skerspjūvio ribinė laikomoji galia pagal ACI normas apskaičiuojama naudojant stiprio redukavimo koeficientą:

$$M_u = \phi M_n,$$

čia M_n - skerspjūvio vardinis atlaikomas lenkimo momentas;

ϕ - stiprio redukavimo koeficientas (žiūr. 2.14 lentelę).

2.14 lentelė. Stiprio redukavimo koeficientas ϕ (ACI 440.4R-04)

<i>Iš anksto įtemptos armatūros tipas</i>	<i>Stiprio redukavimo koeficientas ϕ</i>	<i>Sąlyga</i>
Aramidas	0,7	Tempimo sąlygojamas suirimas
Anglis	0,85	
Aramidas ir anglis	0,65	Gniuždymo sąlygojamas suirimas

Skerspjūvio laikomosios galios skaičiavimas skirstomas į du atvejus: kai skerspjūvis armuotas normaliai ir ribinis būvis pasiekiamas nutrūkus FRP armatūrai ir kai skerspjūvis perarmuotas, o ribinis būvis pasiekiamas suirus gniuždomos zonos betonui. Esamas atvejis nustatomas pagal armavimo koeficientą. Koeficientas ρ_{fb} – tai toks armavimo koeficientas, kuriam esant betonas suyra ir armatūra nutrūksta tuo pačiu metu. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_{ck}}{f_{fk}} \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu} - \varepsilon_{fe}}, \quad (2.26)$$

čia β_1 - gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficientas. Kai betono stipris 27,5 MPa ir mažiau $\beta_1 = 0,85$. Viršijus šį stiprį, kas 6,9 MPa koeficientas sumažėja 0,05. Minimali β_1 reikšmė yra 0,65;

ε_{fe} - FRP armatūroje veikianti deformacija po visų įtempimo nuostolių.

Normaliai armuotos sijos $\rho_f \leq \rho_{fb}$. Kai $\rho_f \leq \rho_{fb}$, sijos laikomoji galia priklauso nuo armatūros stiprumo. Esant tokiam atvejui sija suyra nutrūkus tempiamai armatūrai, betonui dar nepasiekus savo ribinės deformacijos. Sijos laikomoji galia apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$M_n = \rho_f \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{fk} \cdot \left(1 - \frac{\rho_f}{1,7} \cdot \frac{f_{fk}}{f_{ck}} \right). \quad (2.27)$$

Perarmuotos sijos $\rho_f > \rho_{fb}$. Kai $\rho_f > \rho_{fb}$, sijos laikomoji galia priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio. Tokiu atveju sija netenka laikomosios galios suirus gniuždomos zonos betonui, lynams dar nepasiekus savo stiprumo ribos. Esant tokiam armavimo koeficientui, sijos laikomoji galia apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$M_n = 0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot \beta_1 \cdot k_u \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot k_u}{2}\right), \quad (2.28)$$

čia k_u - perarmuotos sijos koeficientas, apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$k_u = \sqrt{\rho_f \cdot \lambda + \left[\frac{\rho_f \cdot \lambda}{2} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{cu}}\right) \right]^2} - \frac{\rho_f \cdot \lambda}{2} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{cu}}\right); \quad (2.29)$$

λ - medžiagos konstanta:

$$\lambda = \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{0,85 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1}; \quad (2.30)$$

E_f - FRP armatūros medžiagos tamprumo modulis.

Skaičiavimas pagal Fib rekomendacijas (Fib bulletin 40 2007). Skaičiavimuose daromos šios prielaidos:

- gniuždomo betono įtempių diagrama stačiakampė;
- plokšti pjūviai išlieka plokšti;
- tempimo arba gniuždymo veikiamos sukibusiosios armatūros arba sukibusiosios įtemptosios armatūros deformacijos yra tokios pačios kaip ir ją supančio betono;
- gniuždomo betono ribinė deformacija priimama lygi 0,0035;
- betono tempiamojo stiprio nepaisoma;
- armatūra iki suirimo dirba tiesiškai tamprioje stadijoje.

Esamos FRP armatūros projektavimo normos numato dviejų tipų lenkiamosios galios netekimą: kai suyra gniuždomos zonos betonas ir kai nutraukiama FRP armatūra. Tipas nustatomas panaudojant skerspjūvio armavimo koeficientą ρ_{fb} . Tai toks armavimo koeficientas, kuriam esant betono suirimas ir armatūros nutrūkimas vyksta tuo pačiu metu. Jis apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

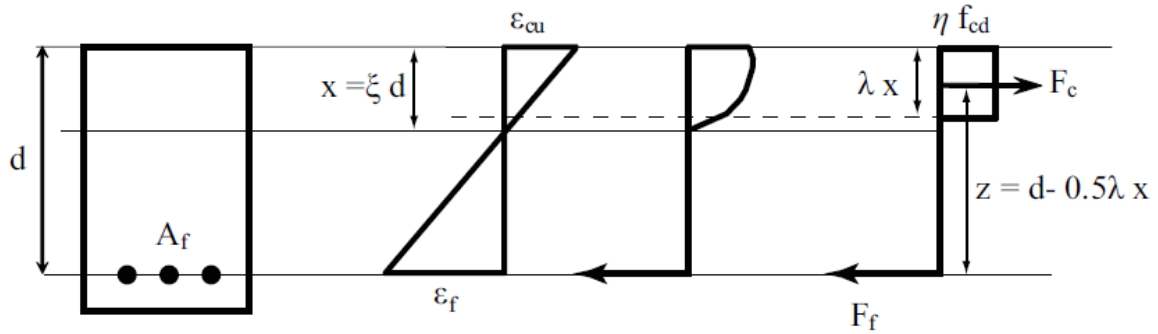
$$\rho_{fb} = \frac{0,81(f_{ck} + 8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left(\frac{f_{fk}}{E_f} + \varepsilon_{cu} \right)}, \quad (2.31)$$

čia f_{ck} - betono charakteristinis gniuždomasis stipris;

f_{fk} - FRP armatūros charakteristinis tempiamasis stipris;

ε_{cu} - ribinė gniuždomoji betono defomacija.

Skerspūvio laikomoji galia pagal Fib rekomendacijas apskaičiuojama remiantis 2.8 paveiksle pateikta supaprastinta gniuždymo įtempių diagrama. Įtempių diagramos supaprastinimui naudojami tokie koeficientai: gniuždymo įtempių redukavimo koeficientas η ir gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficientas λ . Dėl FRP armatūros anizotropiškumo ir jos mažos įtakos laikomajai galiai, galima neatsižvelgti į gniuždomos FRP armatūros stiprumą.



2.8 pav. Supaprastinta gniuždymo įtempių diagrama

Perarmuotos sijos $\rho_f > \rho_{fb}$. Kai išilginės FRP armatūros kiekis ρ_f didesnis nei ρ_{fb} , elementas laikomosios galios netenka suirus gniuždomos zonos betonui, o laikomoji galia apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \cdot \left(1 - \frac{\lambda \xi}{2}\right), \quad (2.32)$$

čia η - gniuždymo įtempių redukavimo koeficientas;

d - naudingas skerspūvio aukštis;

λ - gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficientas;

b - elemento skerspūvio plotis;

ξ - santykinis gniuždomos zonos aukštis:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}}; \quad (2.33)$$

x - gniuždomos zonos aukštis;

f_{cd} - betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \quad (2.34)$$

ε_f - išilginės FRP armatūros tempimo defomacija:

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu}}{\gamma_c\rho_f E_f}}}{2}; \quad (2.35)$$

f_{ck} - betono charakteristinis gniuždomasis stipris:

α_{cc} - koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į gniuždomojo stiprio ilgalaikius efektus ir nepalankius efektus, atsirandančius dėl apkrovos veikimo būdo;

γ_c - betono dalinis saugos koeficientas, $\gamma_c = 1,5$;

γ_f - FRP armatūros dalinis saugos koeficientas, $\gamma_f = 1,25$ (Fib bulletin 40 2007).

Normaliai armuotos sijos $\rho_f \leq \rho_{fb}$. Kai išilginės FRP armatūros kiekis ρ_f mažesnis nei ρ_{fb} , elementas laikomosios galios netenka nutrūkus FRP armatūrai, o laikomoji galia apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$M_u = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\xi}{2}\right), \quad (2.36)$$

čia ξ - gniuždomos zonos aukštį apibūdinantis dydis:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c}; \quad (2.37)$$

ε_{fu} - ribinė FRP armatūros deformacija;

ε_c - betono deformacija labiausiai gniuždomame skerspjūvio krašte tuo metu, kai nutrūksta FRP armatūra.

Šiuo atveju tam, kad būtų galima apskaičiuoti elemento normaliojo pjūvio laikomąją galią, reikia žinoti betono gniuždymo deformacijas FRP armatūros nutrūkimo metu. Ši deformacija apskaičiuojama iteraciniu būdu, sprendžiant (2.37 – 2.39) lygtis:

$$bd\xi \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_c} = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f}. \quad (2.38)$$

Įtempiai betone gali būti apskaičiuojami pagal tokias išraiškas:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \text{ kai } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}; \quad (2.39)$$

$$\sigma_c = f_{cd}, \text{ kai } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2},$$

čia n - eksponentė pagal (LST EN 1992-1-1: 2005) pateiktą 3.1 lentelę;

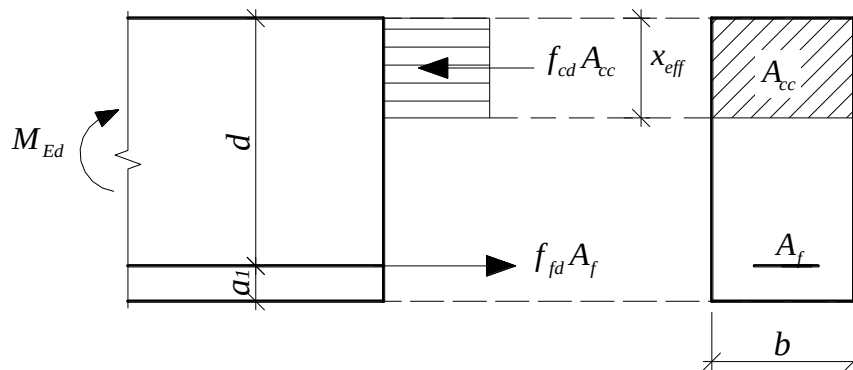
ε_{c2} - deformacija, pasiekus didžiausiąjį betono stiprį;

ε_{cu2} - ribinė betono deformacija.

Skaičiavimas pagal Statybos techninį reglamentą (STR 2.05.05:2005). Skaičiavimuose daromos šios prielaidos:

- tempiamojo betono stipris lygus nuliui;
- gniuždomojo betono stipris yra lygus įtempiams f_{cd} ir visoje gniuždomoje zonoje yra pastovus;
- ribinė gniuždomo betono deformacija priimama lygi 0,0035;
- armatūros deformacijos (įtempiai) nustatomos atsižvelgiant į skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštį, įvertinant išankstinio įtempimo deformacijas (įtempius);
- sukibimas tarp betono ir armatūros laikomas idealiu.

Stačiakampio skerspjūvio lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio stiprio skaičiuotinė schema pateikta 2.9 paveiksle.



2.9 pav. Stačiakampio skerspjūvio lenkiamųjų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiuotinė schema

Pagal STR rekomendacijas, stačiakampio skerspjūvio lenkiamieji elementai, kai

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{x_{\text{eff}}}{d} \leq \xi_{\text{lim}}, \text{ yra apskaičiuojami pagal tokią sąlygą:}$$

$$M_{Ed} = f_{cd} b x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}), \quad (2.40)$$

čia f_{cd} - betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

x_{eff} - efektyvusis gniuždomos zonos aukštis.

Elemento gniuždomosios zonos santykinis aukštis ξ_{lim} apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,lim}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}, \quad (2.41)$$

čia ω – betono gniuždomosios zonos charakteristika:

$$\omega = \alpha - 0,008f_{cd}; \quad (2.42)$$

α – koeficientas, įvertinantis betono rūšį;

$\sigma_{s,lim}$ ir $\sigma_{sc,lim}$ – atitinkamai tempiamosios ir gniuždomosios zonos armatūros įtempiai, atsižvelgiant į armatūros takumo ribą ir nustatomi pagal (STR 2.05.05:2005) 72 punkto nurodymus.

Visose trijose metodikose priimamos tokios pačios prielaidos, skirtumas tik tas, kad Fib rekomendacijose ir STR normose ribinė betono deformacija priimama lygi 0,0035, o ACI – 0,003.

Visose normose skaičiavimuose naudojama panaši idealizuota gniuždomo betono įtempių diagrama, skiriasi tik redukavimo koeficientų dydžiai. Fib ir STR naudoja du koeficientus aprašyti gniuždymo įtempių diagramai: gniuždymo įtempių redukavimo koeficientą η ir gniuždomosios zonos redukavimo koeficientą λ . Tuo tarpu ACI įtempių redukavimo koeficiento atsisako, priima jį nekintantį ir lygų 0,85, ir naudoja tik gniuždomos zonos aukščio redukavimo koeficientą β_1 , kuris tiesiogiai priklauso nuo betono klasės ir gali kisti nuo 0,65 iki 0,85.

Visų skaičiavimo normų skaičiavimo metodika labai panaši, skiriasi tik gniuždomos zonos aukščio nustatymo skaičiavimas. Reikėtų paminėti, kad ACI normos skaičiavimuose įvertina išankstinio įtempimo jėgą. Tai atliekama per armatūros deformacijas ir ši deformacija naudojama apskaičiuojant armavimo koeficientą ρ_b ir gniuždomos zonos aukštį. Taip yra todėl, kad ACI normose pateikta skaičiavimo metodika skirta skaičiuoti FRP armatūra armuotų elementų laikomajai galiai, o kitos dvi normos skirtos skaičiuoti plienine armatūra

armuotiems elementams. FRP armatūros ribinė defomacija yra žymiai mažesnė nei plieninės armatūros, todėl skaičiavimuose atsižvelgiama į tai, kokios deformacijos atsiranda nuo pradinio įtempimo, ir kokia dalis ribinių deformacijų liko atlaikyti momentui nuo išorinių apkrovų.

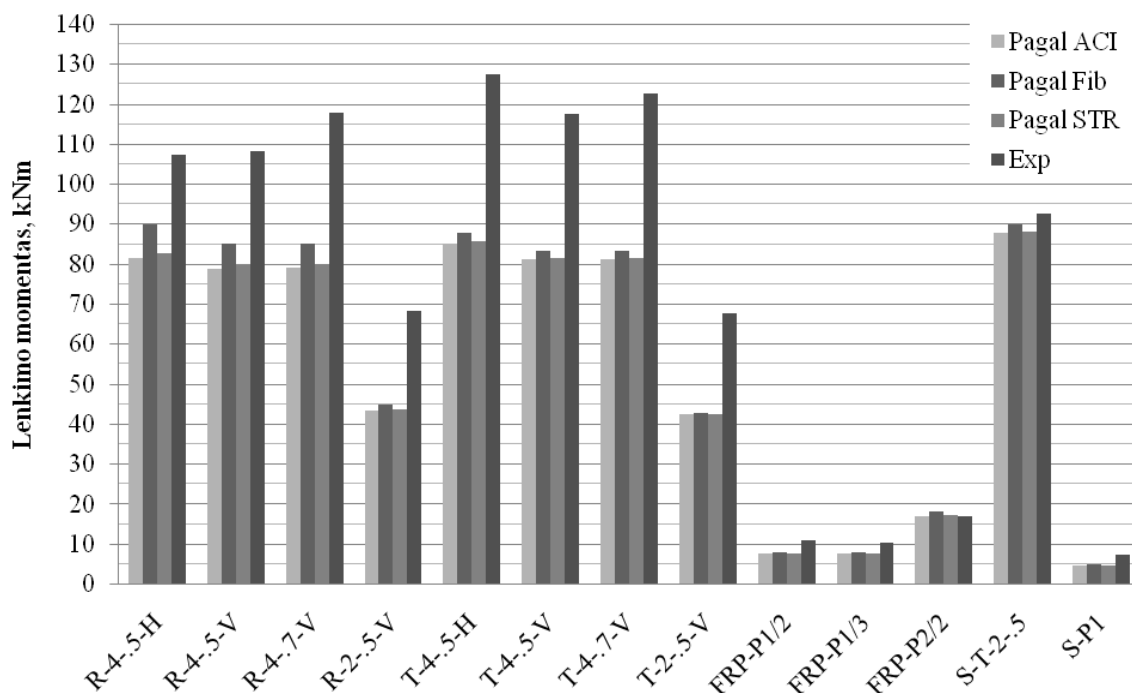
2.3.2. Statmenojo pjūvio laikomosios galios teorinė analizė

Panaudojant aptartas metodikas buvo atlikti kelių autorių (Abdelrahman ir Rizkalla 1997; Borosnyoi 2002) gelžbetoninių eksperimentinių sijų, armuotų anglies pluošto kompozitine armatūra, laikomosios galios teoriniai skaičiavimai (duomenys sijų skaičiavimui pateikti 2.1 poskyryje). Skaičiavimai atlikti įvertinant eksperimentines medžiagų mechanines charakteristikas ir tikruosius sijų matmenis. Teorinių stiprumo skaičiavimų rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniais.

2.15 lentelėje ir 2.10 paveiksle pateikti eksperimentinių sijų normalinio pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimento metu gautais rezultatais.

2.15 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

<i>Sijos pavadinimas</i>	<i>M_{calc} kNm</i>			<i>M_{exp} kNm</i>	<i>M_{calc}/ M_{exp}</i>		
	<i>Pagal ACI</i>	<i>Pagal Fib</i>	<i>Pagal STR</i>		<i>Pagal ACI</i>	<i>Pagal Fib</i>	<i>Pagal STR</i>
R-4-.5-H	81,3	89,7	82,6	107,2	0,76	0,84	0,77
R-4-.5-V	78,7	85,1	79,7	108,2	0,73	0,79	0,74
R-4-.7-V	79,0	85,1	79,9	117,7	0,67	0,72	0,68
R-2-.5-V	43,4	44,7	43,6	68,2	0,64	0,66	0,64
T-4-.5-H	85,1	87,8	85,5	127,3	0,67	0,69	0,67
T-4-.5-V	81,1	83,2	81,4	117,5	0,69	0,71	0,69
T-4-.7-V	81,2	83,2	81,5	122,6	0,66	0,68	0,67
T-2-.5-V	42,3	42,8	42,4	67,6	0,63	0,63	0,63
FRP-P1/2	7,58	7,92	7,64	10,78	0,70	0,73	0,71
FRP-P1/3	7,58	7,92	7,64	10,11	0,75	0,78	0,76
FRP-P2/2	16,68	18,05	17,18	16,84	0,99	1,07	1,02
S-T-2-.5	87,7	89,8	88,1	92,5	0,95	0,97	0,95
S-P1	4,56	4,69	4,59	7,30	0,63	0,64	0,63



2.10 pav. Lenkiamų elementų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

Atlikus lenkiamosios galios skaičiavimus, matyti, kad skaičiuojant pagal visas tris normas rezultatai gaunami labai panašūs, o artimiausi rezultatai, lyginant su eksperimentiniais, gaunami skaičiuojant pagal Fib rekomendacijose pateiktą skaičiavimo metodiką.

Elementų R-4-5-H, R-4-5-V ir R-4-7-V, kurių skerspjūvio armavimo procentas lygus 0,4, eksperimentų ir teorinių skaičiavimų rezultatai skaičiuojant pagal Fib rekomendacijas skiriasi 22 %, skaičiuojant pagal ACI – 28 %, o pagal STR – 27 %. Šių, kurių armavimo procentas lygus 0,28 (T-4-5-H, T-4-5-V, T-4-7-V), laikomoji galia, apskaičiuota pagal Fib rekomendacijas, gaunama vidutiniškai 31 % mažesnė, nei išmatuota eksperimento metu, apskaičiuota pagal ACI normas gaunama 33 % mažesnė, o pagal STR normas – 32 % mažesnė. Elementų R-2-5-V ir T-2-5-V, kurie armuoti tik dviem iš anksto įtemptais armatūros strypais, laikomoji galia, apskaičiuota pagal Fib metodiką gaunama vidutiniškai 36 % mažesnė, nei išmatuota eksperimento metu, o skaičiuojant pagal ACI ir STR normas gaunama 37 % mažesnė.

Bandinių FRP-P1, kurie armuoti vienu įtemptu FRP armatūros lynu (armavimo procentas 0,13), skaičiavimo pagal Fib metodiką rezultatai nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi vidutiniškai 24 %, o skaičiuojant pagal ACI ir STR normas skirtumas yra 27 %. Bandinio FRP-P2/2, kuris armuotas dviem įtemptais FRP armatūros lynais (armavimo procentas 0,26), laikomoji galia, apskaičiuota pagal Fib metodiką gaunama 7 % didesnė nei

nustatyta eksperimento metu, apskaičiuota pagal ACI normas – 1 % mažesnė, o skaičiuojant pagal STR normas gaunamas 2 % didesnis rezultatas.

Siekiant palyginti rezultatus, buvo atlikti ir sijų, armuotų iš anksto įtempta plienine armatūra, teoriniai statmenojo pjūvio stiprumo skaičiavimai. Gauta, kad skaičiuojant pagal Fib rekomendacijose pateiktą skaičiavimo metodiką laikomoji galia gaunama vidutiniškai 19 % mažesnė nei išmatuota eksperimento metu, o skaičiuojant pagal ACI ir STR normas rezultatas gaunamas 21 % mažesnis.

Palyginus visus gautus rezultatus matyti, kad teorinių skaičiavimų pagal STR ir ACI normas metu gauti rezultatai dauguma atvejų sutampa. Vidutinis skirtumas tarp rezultatų, gautų skaičiuojant pagal šias dvi normas, yra 0,9 %. Pagal Fib rekomendacijas apskaičiuota sijos laikomoji galia gaunama šiek tiek artimesnė eksperimento metu išmatuotai, o nuo kitų dviejų normų skaičiavimais gautų rezultatų vidutiniškai skiriasi 4,4 %. Skirtumai tarp gaunamų rezultatų atsiranda dėl šiek tiek skirtingų skaičiavimo metodikų. Skaičiuojant pagal ACI ir Fib rekomendacijas, gniuždomos zonos aukštis nustatomas iš deformacijų diagramos, o skaičiuojant pagal STR normas, šis dydis nustatomas iš skerspjuvyje veikiančių jėgų pusiausvyros. Taip pat skirtumas tarp rezultatų atsiranda ir todėl, kad ACI normos naudoja kitokio dydžio koeficientus, skirtus gniuždomosios zonos aukščio ir gniuždymo įtempių dydžiui redukuoti, nei tie, kurie yra naudojami skaičiuojant pagal Fib ir STR normas.

Išanalizavus gautus teorinių skaičiavimų rezultatus, matyti, kad rezultatai gaunami tikslesni esant didesniai armavimo procentui. Tai galima pastebėti lyginant R-4-.5-H, kurių juostos plotis 200 mm, ir T-4-.5-H, kurių juostos plotis yra 600 mm, skaičiavimo rezultatus. Šie elementai armuojami tokiu pačiu armatūros kiekiu, tačiau jų betono skerspjuvio plotas skirtingas, todėl skiriasi ir armavimo procentas. Visais atvejais, „R“ skerspjuvio elementų skaičiavimo rezultatai, lyginant su eksperimentiniais, gaunami tikslesni nei „T“ skerspjuvio elementų.

Teoriniai skaičiavimai atliekami naudojant eksperimentuose naudotų sijų išmatuotus matmenis ir medžiagų savybes, t.y. skaičiavimuose naudojamos charakteristinės betono ir armatūros stiprumo reikšmės. 2.16 lentelėje pateiktas kelių apskaičiuotų sijų laikomosios galios reikšmių palyginimas, kai naudojamos charakteristinės ir skaičiuotinės reikšmės.

2.16 lentelė. Lenkiamų elementų statmenąjo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo rezultatų palyginimas, kai naudojamos charakteristinės ir skaičiuotinės medžiagų savybių reikšmės

<i>Skaičiuojant pagal ACI normas</i>			
<i>Sijos pavadinimas</i>	<i>M_{Rdb} kNm</i>	<i>M_{Rkb} kNm</i>	<i>Santykis</i>
<i>R-4-.5-H</i>	69,1	81,3	1,18
<i>R-4-.5-V</i>	66,9	78,7	1,18
<i>R-4-.7-V</i>	67,1	79,0	1,18
<i>R-2-.5-V</i>	36,9	43,4	1,18
<i>Skaičiuojant pagal Fib normas</i>			
<i>Sijos pavadinimas</i>	<i>M_{Rdb} kNm</i>	<i>M_{Rkb} kNm</i>	<i>Santykis</i>
<i>R-4-.5-H</i>	70,7	89,7	1,27
<i>R-4-.5-V</i>	67,0	85,1	1,27
<i>R-4-.7-V</i>	67,0	85,1	1,27
<i>R-2-.5-V</i>	34,8	44,7	1,29
<i>Skaičiuojant pagal STR normas</i>			
<i>Sijos pavadinimas</i>	<i>M_{Rdb} kNm</i>	<i>M_{Rkb} kNm</i>	<i>Santykis</i>
<i>R-4-.5-H</i>	68,9	82,6	1,20
<i>R-4-.5-V</i>	66,8	79,7	1,19
<i>R-4-.7-V</i>	67,1	79,9	1,19
<i>R-2-.5-V</i>	38,7	43,6	1,13

Skaičiuojant pagal ACI normas gaunamas 1,18 karto mažesnis rezultatas. Šis sumažėjimas visiškai atitinka ACI normose naudojamą stiprio redukavimo koeficientą. Skaičiuojant pagal šias normas, kai suirimą lemia armatūros stipris, apskaičiuotas lenkimo momentas tiesiogiai dauginamas iš redukavimo koeficiento $\phi = 0,85$.

2.16 lentelėje matyti, kad naudojant Fib normose rekomenduojamus medžiagų stiprio dalinio patikimumo koeficientus, gaunami 1,27-1,29 karto mažesni rezultatai. Šių sijų laikomąją galią lemia FRP armatūros laikomoji galia, kadangi sijos armuotos normaliai. Fib normoms siūlomas FRP armatūros stiprio dalinis saugos koeficientas $\gamma_f = 1,25$ (Fib bulletin 40 2007). Šis koeficientas beveik atitinka gaunamą skirtumą tarp apskaičiuotų lenkimo momentų.

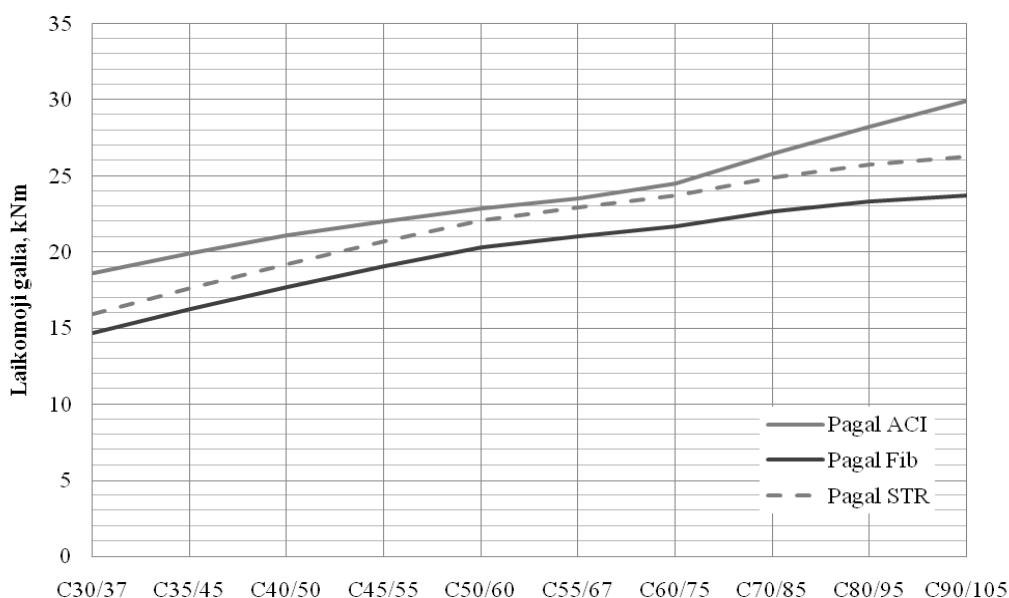
Skaičiuojant pagal STR normas gaunama 1,13-1,2 karto mažesnė laikomoji galia. Čia taip pat naudojamas armatūros stiprio dalinio patikimumo koeficientas $\gamma_f = 1,25$ (Fib bulletin 40 2007). Rezultatų skirtumas tarp STR ir EC normų gaunamas dėl skaičiavimo metodikos skirtumų.

2.3.3. Statmenojo pjūvio laikomosios galios priklausomybė nuo betono stiprumo klasės

Siekiant nustatyti kurie faktoriai turi didžiausią įtaką lenkiamų elementų statmenojo pjūvio stiprumui, atliekama analizė. 2.17 lentelėje ir 2.11 paveiksle pateikti laikomosios galios skaičiavimo rezultatai, kai keičiama betono stiprumo klasė. Skaičiavimai atlikti elementui, kurio pradinio įtempimo dydis siekia $0,5f_{tu}$. Skerspjūvio armavimo koeficientas imamas didesnis ($\rho_f = 0,5\%$) siekiant sudaryti perarmuoto skerspjūvio sąlygas, kad elemento laikomoji galia labiausiai priklausytų nuo betono gniuždomojo stiprio.

2.17 lentelė. Lenkiamų elementų statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė

Betono stiprumo klasė	Laikomoji galia, kNm		
	Pagal ACI normas	Pagal Fib normas	Pagal STR normas
C30/37	18,60	14,64	15,89
C35/45	19,93	16,19	17,58
C40/50	21,07	17,64	19,17
C45/55	22,03	19,01	20,66
C50/60	22,84	20,31	22,08
C55/67	23,51	21,04	22,95
C60/75	24,54	21,67	23,70
C70/85	26,47	22,65	24,90
C80/95	28,28	23,31	25,75
C90/105	29,96	23,70	26,28



2.11 pav. Lenkiamų elementų statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė

Atlikus gelžbetoninio lenkiamo elemento statmenojų pjūvio laikomosios galios priklausomybės nuo betono gniuždomojo stiprio analizę, matyti, kad didinant betono stiprį, skerspjuvio laikomoji galia didėja. Padidinus betono stiprumo klasę 5 MPa, statmenojų pjūvio stiprumas padidėja vidutiniškai 7 % skaičiuojant pagal Fib ir STR normose pateiktas skaičiavimo metodikas ir 5 % skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą skaičiavimo metodiką. Galima pažymėti, kad laikomosios galios didėjimas aktyvesnis esant žemesnės klasės betonui ir pasiekus betono klasę C50/60 toliau kinta nedaug. Dėl šios priežasties imti betono stiprumo klasę didesnę nei C50/60 vien tam, kad būtų galima padidinti šios laikomąją galią, neracionalu.

Didžiausia šios laikomoji galia gaunama skaičiuojant pagal ACI normas, o mažiausia – skaičiuojant pagal Fib normas. Pagal Fib normas apskaičiuotas statmenojų pjūvio stiprumas yra vidutiniškai 16 % mažesnis, nei apskaičiuotas pagal ACI normas. Skirtumas tarp rezultatų, gautų skaičiuojant pagal ACI ir STR normas, yra šiek tiek mažesnis ir siekia vidutiniškai 8 %.

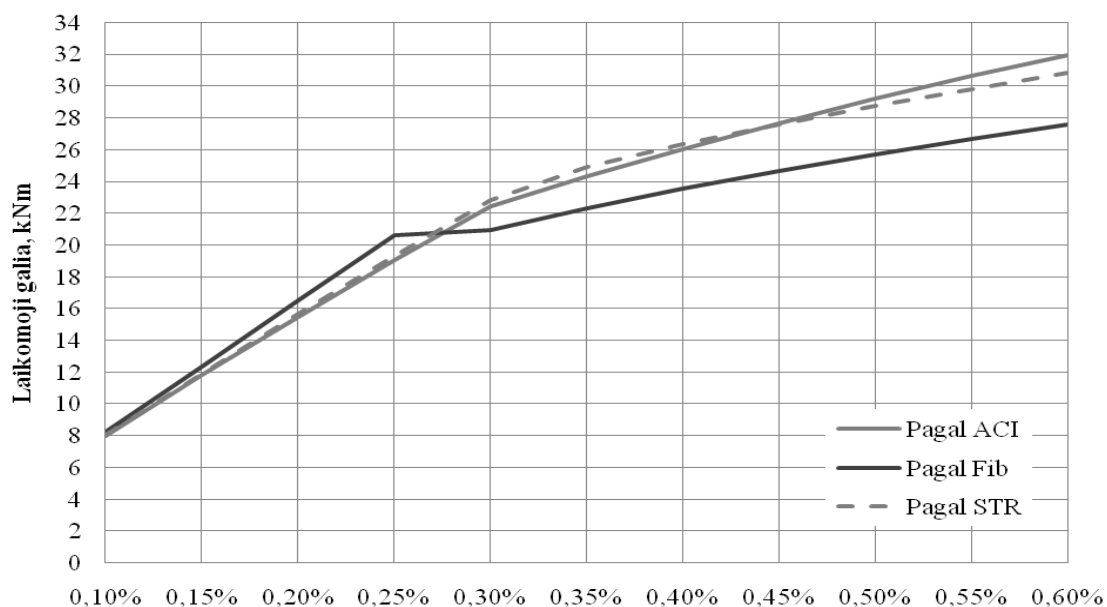
2.11 paveiksle galima pastebėti lūžį rezultatų, gautų skaičiuojant pagal ACI normas, kreivėje. Šis lūžis atsiranda dėl gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficiento β_1 . Šis koeficientas priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio ir pagal ACI normose pateiktas rekomendacijas didėjant betono gniuždomajam stipriui mažėja, tačiau negali būti imamas mažesnis nei 0,65. Todėl pasiekus betono stiprumo klasę C60/75, koeficientas β_1 priimamas lygus 0,65 ir toliau didėjant betono gniuždomajam stipriui nekinta.

2.3.4. Statmenojų pjūvio laikomosios galios priklausomybė nuo skerspjuvio armavimo procento

2.18 lentelėje pateiktas lenkiamų elementų statmenojų pjūvio stiprumo skaičiavimas, kai keičiamas armavimo procentas. Grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.12 paveiksle.

2.18 lentelė. Lenkiamų elementų statmenjojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiamas armavimo procentas

Armavimo procentas, %	Laikomoji galia, kNm		
	Pagal ACI normas	Pagal Fib normas	Pagal STR normas
0,10	8,01	8,25	8,05
0,15	11,81	12,37	11,90
0,20	15,49	16,49	15,64
0,25	19,03	20,60	19,28
0,30	22,42	20,92	22,80
0,35	24,30	22,29	24,92
0,40	26,05	23,52	26,31
0,45	27,67	24,65	27,57
0,50	29,19	25,70	28,73
0,55	30,60	26,66	29,81
0,60	31,93	27,57	30,82



2.12 pav. Lenkiamų elementų statmenjojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas, kai keičiamas armavimo procentas

2.12 paveiksle matyti, kad didėjant skerspjūvio armavimo procentui, t.y. didėjant armatūros kiekiui, šios laikomoji galia didėja. Tai savaime suprantama, kadangi laikomoji galia tiesiogiai priklauso nuo armatūros kiekio skerspjūvyje. Kol armavimo procentas nėra didesnis nei 0,25 %, rezultatai, gauti skaičiuojant pagal visas tris normas, yra labai panašūs, o skerspjūvio laikomoji galia didėja didesniu žingsniu. Padidinus armavimo procentą nuo 0,10 % iki 0,25 %, elemento laikomoji galia, skaičiuojant pagal Fib normas, padidėjo 2,5 karto, o

skaičiuojant pagal ACI ir STR normas – apie 2,4 karto. Armavimo procentui pasiekus didesnę reikšmę nei 0,25 %, rezultatų kreivės šiek tiek išsikreivina, ypač skaičiuojant pagal Fib normas, o laikomosios galios didėjimas, didėjant armavimo procentui, sulėtėja. Taip yra todėl, kad iki 0,25 armavimo procento elementas laikomas normaliai armuotu ir jo laikomoji galia priklauso nuo armatūros stiprio ir kiekio. Kai armavimo procentas yra didesnis nei 0,25 %, elementas laikomas perarmuotu, vadinasi, elementas pasieks ribinį būvį suirus gniuždomos zonos betonui. Kadangi šiuo atveju betono stipris nekinta, skerspjuvio laikomoji galia priklauso nuo gniuždomos zonos aukščio, o šis priklauso nuo armatūros kiekio. Gaunamas netiesioginis ryšys tarp laikomosios galios ir armatūros kiekio, todėl statmenojo pjūvio stiprumas didėja mažesniu žingsniu. Armavimo procentui padidėjus nuo 0,3 % iki 0,6 %, elemento laikomoji galia skaičiuojant pagal ACI normas padidėjo 43 %, skaičiuojant pagal Fib normas padidėjo 32 %, o pagal STR normas – 35 %.

2.12 paveiksle matyti, kad skaičiuojant pagal ACI ir STR normas gaunami labai panašūs rezultatai. Iki 0,25 % armavimo skirtumas tarp gautų rezultatų skaičiuojant pagal šias dvi normas tėra tik 0,9 %, o esant didesniai armavimo procentui skirtumas padidėja iki vidutinės 1,9 % reikšmės. Skaičiuojant pagal Fib normas gaunamas šiek tiek didesnis skirtumas, lyginant su kitų dviejų normų rezultatais. Armavimo procentui esant ne didesniai nei 0,25 %, laikomoji galia, apskaičiuota pagal Fib normas, gaunama vidutiniškai 4,7 % didesnė, nei apskaičiuota pagal kitas dvi normas, o armavimo procentui esant didesniai nei 0,3 %, laikomoji galia gaunama vidutiniškai 10,2 % mažesnė.

2.3.5. Išvados

Atlikus eksperimentinių sijų laikomosios galios teorinius skaičiavimus pagal pateiktas tris skaičiavimo metodikas nustatyta, kad skirtumas tarp skaičiavimo rezultatų, atliktų pagal skirtingas skaičiavimo normas, yra nedidelis ir gali siekti iki 4 %.

Nustatyta, kad artimiausi eksperimentiniams rezultatai gaunami skaičiuojant pagal Fib normose pateiktą statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodiką. Pagal šias normas apskaičiuota sijų laikomoji galia nuo eksperimento metu išmatuotos vidutiniškai skiriasi 28 %, o skaičiuojant pagal ACI ir STR normose pateiktas skaičiavimo metodikas skirtumas siekia vidutiniškai 31 %. Skaičiavimo rezultatai gaunami tikslesni, kai skerspjuvio armavimo procentas didesnis.

Lenkiamo elemento laikomąją galią galima padidinti imant aukštesnę betono stiprumo klasę. Padidinus betono stiprumo klasę 5 MPa, statmenojų pjūvio laikomoji galia padidėja vidutiniškai 7 % skaičiuojant pagal Fib ir STR normose pateiktas skaičiavimo metodikas ir 5 % skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą skaičiavimo metodiką. Didinti betono stiprumo klasę norint padidinti elemento laikomąją galią efektyvu tik eant žemesnės klasės betonui. Kai betono stiprumo klasė aukštesnė, toks statmenojų pjūvio laikomosios galios didinimo būdas neefektyvus.

Lenkiamo elemento statmenojų pjūvio laikomoji galia labai priklauso nuo išilginės armatūros kiekio. Padidinus armavimo procentą 0,05 %, elemento laikomoji galia padidėja vidutiniškai 35 %.

2.4. Įlinkio skaičiavimas

Šiame poskyryje nagrinėjamos įlinkio skaičiavimo metodikos. Amerikos betono instituto rekomenduojama skaičiavimo metodika skirta skaičiuoti FRP armatūra armuotų elementų įlinkį. Europoje tokių elementų projektavimui skirta įlinkio skaičiavimo metodika dar nėra sukurta, todėl analizei imamos dvi skaičiavimo normos, skirtos projektuoti plienine armatūra armuotas gelžbetonines konstrukcijas: Eurokodas 2 ir Lietuvos Statybos techninis reglamentas. Atliekant analizę siekiama nustatyti, kuri skaičiavimo metodika yra tinkamiausia skaičiuoti gelbetoninių elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, įlinkį.

2.4.1. Įlinkio skaičiavimo metodai

Skaičiavimas pagal ACI normas (American Concrete Institute) (ACI 440.1R-06).

Pagal ACI rekomendacijas, skaičiuojant elementus su plyšiais naudojamas modifikuotas efektyvusis inercijos momentas, kuris apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g, \quad (2.43)$$

čia β_d - koeficientas, įvertinantis plyšių įtaką, kompozitine armatūra armuotų elementų standumui:

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1,0; \quad (2.44)$$

ρ_f - armavimo FRP armatūra koeficientas;

ρ_{fb} - armavimo koeficientas, kai betono suirimas ir armatūros trūkimas vyksta tuo pačiu metu;

I_g - skerspjūvio inercijos momentas nevertinant armatūros;

M_{cr} - pleišėjimo momentas;

M - lenkimo momentas kuriam esant skaičiuojamas įlinkis;

I_{cr} - supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas. Stačiakampiui skerspjūviui ir tėjiniam skerspjūviui, kurio gniuždoma zona juostoje, šis dydis apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + \alpha_f A_p (d - kd)^2, \quad (2.45)$$

čia A_p - FRP armatūros skerspjūvio plotas;

k - neutraliosios ašies aukščio ir naudingo skerspjūvio aukščio santykis;

α_f - FRP armatūros ir betono tamprumo modulių santykis.

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį (Edward 2009):

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_t} \left[\frac{P}{A_c} \left(1 + \frac{e_p c_b}{r^2} \right) + 0,623 \sqrt{f_{ck}} \right], \quad (2.46)$$

čia c_b - atstumas nuo labiausiai gniuždomo krašto iki neutraliosios ašies;

r - skerspjūvio sukimosi spindulys.

ACI normos rekomenduoja perskaičiuoti efektyviosios neutraliosios ašies padėtį, kadangi dėl skerspjūvio supleišėjimo pakinta apspaudimo jėgos ekscentricitetas:

$$y_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 y_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \right] y_{cr}, \quad (2.47)$$

čia y_{eff} - atstumas nuo skerspjūvio viršutinio krašto iki efektyviosios neutraliosios ašies;

y_c - atstumas nuo skerspjūvio viršutinio krašto iki skerspjūvio svorio centro;

y_{cr} - atstumas nuo skerspjūvio viršutinio krašto iki supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies (t.y. $k \cdot d$).

Pagal ACI rekomendacijas, ilgalaikis įlinkis įvertinant betono traukumą ir valkšnumą apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\omega_{(cp+sh)} = 0,6 \cdot \lambda \cdot (\omega_i)_{sus}, \quad (2.48)$$

čia $(\omega_i)_{sus}$ - pradinis įlinkis nuo nuolatinės apkrovos;

$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'}$ - koeficientas, įvertinantis betono valkšnumo ir traukumo

įtaką įlinkiui;

ρ' - gniuždomos armatūros armavimo koeficientas;

ξ - nuo laiko priklausantis koeficientas.

Koeficientas ξ , priklausomai nuo laiko, įgauna tokias reikšmes (ACI 318-05):

– 5 metai ir daugiau - $\xi = 2,0$;

– 12 mėnesių - $\xi = 1,4$;

– 6 mėnesiai - $\xi = 1,2$;

– 3 mėnesiai - $\xi = 1,0$.

ACI normų skaičiavimai paremti efektyviojo inercijos momento naudojimu. Tai inercijos momentas, esantis tarp nesupleišėjusio skerspjuvio ir visiškai supleišėjusio skerspjuvio inercijos momentų. Panaši formulė naudojama ir skaičiuojant plienine armatūra armuotų elementų įlinkį, tik FRP armatūrai papildomai įvedamas β_d koeficientas, įvertinantis efektą, kurį sukelia plyšiai FRP armatūra armuotuose elementuose. Ilgalaikis įlinkis pagal ACI normas apskaičiuojamas padauginant trumpalaikį įlinkį nuo nuolatinės apkrovos iš λ koeficiento, kuris įvertina betono valkšnumo ir traukumo įtaką įlinkiui.

Skaičiavimas pagal Europos standartą Eurokodą 2 (LST EN 1992-1-1:2005).

Pagal Eurokodo rekomendacijas, elementai, kurie, kaip tikimasi, nebus veikiami didesnės apkrovos nei ta, dėl kurios kurioje nors vietoje galėtų būti viršytas betono tempiamasis stipris, turėtų būti laikomi nesupleišėjusiais. Elementai, kurie gali supleišėti, tačiau nevisiškai, bus tarpinio tarp nesupleišėjimo ir visiško supleišėjimo būvio. Tokių elementų kreivis apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$\frac{1}{r_m} = \zeta \cdot \frac{1}{r_{II}} + (1-\zeta) \cdot \frac{1}{r_I}, \quad (2.49)$$

čia $\frac{1}{r_{II}}$ - supleišėjusio sijos ruožo kreivis;

$\frac{1}{r_I}$ - nesupleišėjusio sijos ruožo kreivis;

ζ - pasiskirstymo koeficientas, kuris įvertina tempiamosios zonos betono įtaką elemento standumui:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2; \quad (2.50)$$

β - koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką vidutinei deformacijai. $\beta = 1$, jei veikiama vieną kartą trumpalaikė apkrova; $\beta = 0,5$, jei apkrovos ilgalaikės arba veikia daug kartotinės apkrovos ciklą;

σ_s - tempiamosios armatūros įtempiai, apskaičiuoti pagal supleišėjusį skerspjūvį;

σ_{sr} - tempiamosios armatūros įtempiai, apskaičiuoti pagal supleišėjusį skerspjūvį apkrovimo sąlygomis, kurios sukėlė pirmuosius plyšius;

M_{cr} - pleišėjimo momentas;

M_a - veikiantis lenkimo momentas.

Kreivis, sukeltas išankstinio apspaudimo jėgos, apskaičiuojamas taip:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_P = \frac{P \cdot e_p}{E_{c,eff} \cdot I_{eff}}, \quad (2.51)$$

čia P - išankstinio apspaudimo jėga atmetus nuostolius;

e_p - atstumas nuo skerspjūvio svorio centro iki armatūros svorio centro.

Veikiant ilgalaikėms apkrovoms, bendra deformacija, įskaitant valkšnumo deformaciją, gali būti apskaičiuojama įvertinant efektyvųjį betono tamprumo modulį $E_{c,eff}$:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}, \quad (2.52)$$

čia $\varphi(\infty, t_0)$ - apkrovą ir laiko intervalą atitinkantis valkšnumo koeficientas.

Eurokode 2 siūloma elementus, kuriuose gali atsirasti plyšiai, laikyti esančiais tarpiniame būvyje tarp nesupleišėjimo ir visiško supleišėjimo, todėl naudoja pasiskirstymo koeficientą ζ . Įlinkis, atsiradęs dėl betono taikimosi apskaičiuojamas atsižvelgiant į betono traukimosi deformaciją. Laiko įtaka įvertinama per betono valkšnumo koeficientą, naudojant efektyvųjį betono tamprumo modulį.

Skaičiavimas pagal Statybos techninį reglamentą (STR 2.05.05:2005). Lenkiamų elementų suminis kreivis ruožuose, kurių tempiamojoje zonoje nėra susidariusių normalinių plyšių, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2 - \left(\frac{1}{r}\right)_3 - \left(\frac{1}{r}\right)_4, \quad (2.53)$$

čia $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ – kreivis nuo kintamųjų poveikių (trumpalaikės dalies), apskaičiuojamas pagal kintamąją apkrovą, padaugintą iš 0,3:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M}{\varphi_{c1} E_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}; \quad (2.54)$$

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$ – kreivis nuo nuolatinių ir tariamai nuolatinių poveikių, neįvertinant išankstinio apspaudimo armatūra.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_2 = \frac{M \varphi_{c2}}{\varphi_{c1} E_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}, \quad (2.55)$$

čia M – kintamųjų ir tariamai nuolatinių poveikių sukeltas momentas apie ekvivalentinio skerspjuvio centro ašį, statmeną lenkimo momento veikimo plokštumai;

φ_{c1} – koeficientas, kuriuo įvertinama betono trumpalaikio valkšnumo įtaka;

φ_{c2} – koeficientas, kuriuo įvertinama betono ilgalaikio valkšnumo įtaka;

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$ – kreivis dėl elemento išlinkio nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$,

esant trumpalaikiai skaičiuotinei situacijai:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_3 = \frac{P_{m,0} \cdot e_p}{\varphi_{c1} E_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}; \quad (2.56)$$

$\left(\frac{1}{r}\right)_4$ – kreivis dėl elemento išlinkio, kurį sukelia betono susitraukimas ir

valkšnumas nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_4 = \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2}}{d}, \quad (2.57)$$

čia: $\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c2}$ – betono santykinės deformacijos, kurias sukelia betono

susitraukimas ir valkšnumas nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$, ir apskaičiuojamos atitinkamai išilginės tempiamosios armatūros masės centro lygyje ir kraštiniame gniuždomojo betono sluoksnyje pagal formules:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{\sigma_{c1}}{E_f}; \quad \varepsilon_{c2} = \frac{\sigma_{c2}}{E_f}. \quad (2.58)$$

Pilnutinis tempiamosios zonos su plyšiais ruožo kreivis apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_2 + \left(\frac{1}{r}\right)_3 - \left(\frac{1}{r}\right)_4, \quad (2.59)$$

čia $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ – kreivis nuo charakteristinio poveikių derinio, esant trumpalaikiai skaičiuotinei situacijai;

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$ – kreivis nuo tariamai nuolatinio poveikių derinio, esant trumpalaikiai skaičiuotinei situacijai, neįvertinant išankstinio apspaudimo įtemptąją armatūrą;

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$ – kreivis nuo tariamai nuolatinio poveikių derinio, esant nuolatinei skaičiuotinei situacijai, neįvertinant išankstinio apspaudimo įtemptąją armatūrą;

$\left(\frac{1}{r}\right)_4$ – kreivis dėl elemento išlinkio, kurį sukelia betono susitraukimas ir valkšnumas nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$, apskaičiuojamas pagal (2.56) formulę.

Lenkiamųjų stačiakampio, tėjinio ir dvitėjo skerspjūvio elementų, kai $e_{0,tot} \geq 0,8d$, kreivis ruožuose, kurių tempiamojoje zonoje atsivėrę plyšiai, apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{dz} \left[\frac{\psi_s}{E_f A_{f1}} + \frac{\psi_c}{(\phi_f + \xi) b d E_{c,eff} \nu} \right] - \frac{N_{tot}}{d} \cdot \frac{\psi_s}{E_f A_{f1}}, \quad (2.60)$$

čia M – momentas apie ašį, statmeną lenkimo momento veikimo plokštumai ir einančią per tempiamosios armatūros skerspjūvio centrą, nuo iš visų išorės jėgų, išdėstytų vienoje nagrinėjamojo skerspjūvio pusėje, taip pat nuo išankstinio apspaudimo jėgos $P_{m,0}$;

z – atstumas nuo tempiamosios armatūros skerspjūvio centro iki gniuždomosios zonos atstojamosios virš plyšio;

ψ_s – koeficientas, kuris įvertina tempiamojo betono darbą ruožuose su plyšiais;
 ψ_c – koeficientas, kuris įvertina kraštinio gniuždomojo betono sluoksnio deformacijų netolygumą ir yra lygus: sunkiojo, smulkiagrūdžio ir lengvojo betono aukštesnės nei LC12/13 klasės – 0,9; lengvojo, LC12/13 ir žemesnės klasės – 0,7; konstrukcijoms, apskaičiuotoms daugkartinių apkrovų poveikiui, neatsižvelgiant į betono klasę ir rūšį, – 1,0;
 ξ – sąlyginis gniuždomosios betono zonos aukštis;
 ν – koeficientas, apibūdinantis elastingai tamprią betono gniuždomosios zonos savybę ir imamas iš 26 lentelės (STR 2.05.05:2005);
 N_{tot} – išilginės jėgos N ir apspaudimo jėgos $P_{m,0}$ atstojamoji (esant necentriniam tempimui jėga N imama su minuso ženklu).

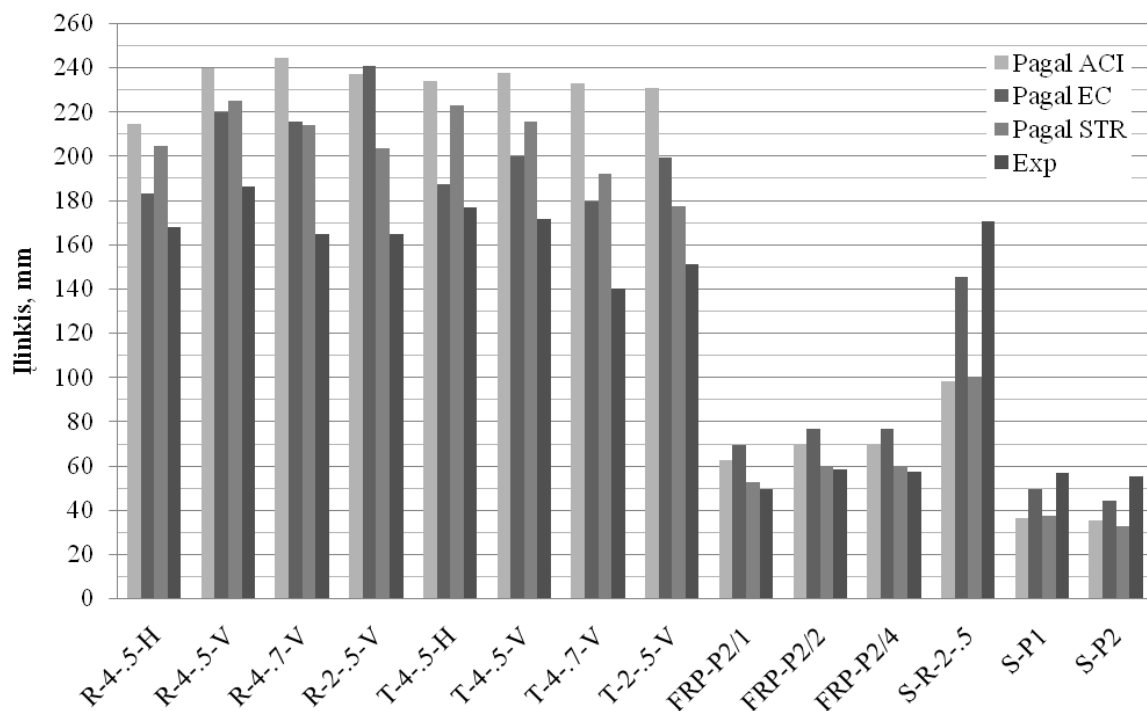
STR normose ilgalaikių deformacijų didėjimas bėgant laikui įvertinamas naudojant empirinius koeficientus, kurie skirtingi esant trumpalaikiai apkrovai ir ilgalaikiai: φ_{ls} , kuris priklauso nuo armatūros tipo, ir ν , priklausančio nuo oro drėgmės ir betono savybių. Galima paminėti, kad empiriniai koeficientai nepriklauso nuo betono amžiaus apkrovimo metu, apkrovimo trukmės ar kitų veiksnių, kurie lemia deformacijų būvio kitimą bėgant laikui.

2.4.2. Įlinkio skaičiavimo metodų teorinė analizė

Panaudojant aptartas metodikas buvo atlikti kelių autorių (Abdelrahman ir Rizkalla 1997; Borosnyoi 2002). gelžbetoninių eksperimentinių sijų, armuotų anglies pluošto kompozitine armatūra, įlinkio teoriniai skaičiavimai (duomenys sijų skaičiavimui pateikti 2.1 poskyryje). Įlinkis skaičiuojamas sijos tarpatramio viduryje, veikiant didžiausiai apkrovai. 2.19 lentelėje ir 2.13 paveiksle pateiktas eksperimentinių sijų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais.

2.19 lentelė. Lenkiamų elementų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

Sijos pavadinimas	ω_{cab} mm			ω_{exp} mm	$\omega_{cal} / \omega_{exp}$		
	Pagal ACI	Pagal EC	Pagal STR		Pagal ACI	Pagal EC	Pagal STR
R-4-5-H	214,3	183,1	204,7	168,0	1,28	1,09	1,22
R-4-5-V	239,4	219,6	224,8	186,2	1,29	1,18	1,21
R-4-7-V	244,4	215,3	213,8	164,5	1,49	1,31	1,30
R-2-5-V	236,9	240,4	203,4	164,6	1,44	1,46	1,24
T-4-5-H	233,9	187,1	222,9	176,5	1,33	1,06	1,26
T-4-5-V	237,6	199,8	215,6	171,4	1,39	1,17	1,26
T-4-7-V	232,6	179,5	191,8	140,1	1,66	1,28	1,37
T-2-5-V	230,5	199,4	177,3	151,0	1,53	1,32	1,17
FRP-P2/1	62,3	69,3	52,6	49,2	1,27	1,41	1,07
FRP-P2/2	69,5	76,9	59,8	58,1	1,20	1,32	1,03
FRP-P2/4	69,2	76,5	59,5	57,4	1,20	1,33	1,04
S-R-2-5	98,0	145,3	100,4	170,6	0,57	0,85	0,59
S-P1	36,3	49,5	37,2	56,6	0,64	0,87	0,66
S-P2	35,4	44,1	32,8	55,1	0,64	0,80	0,59



2.13 pav. Grafinis lenkiamų elementų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

Atlikus teorinius sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, įlinkio skaičiavimus nustatyta, kad skaičiuojant pagal skirtingas normas, gaunami labai skirtingi rezultatai.

Sijų R-4-.5-H ir T-4-.5-H, kurių įtempta armatūra išdėstyta dviem lygiais, įlinkis, apskaičiuotas pagal ACI normas, yra vidutiniškai 30 % didesnis, nei gautas eksperimento metu, apskaičiuotas pagal EC normas – 8 % didesnis, o pagal STR normas – 24 % didesnis. Kai įtempta armatūra išdėstyta keturiais lygiais (sijos R-4-.5-V ir T-4-.5-V), skirtumas gaunamas didesnis: įlinkis, apskaičiuotas pagal ACI normas, gaunamas 34 % didesnis nei eksperimentinis, apskaičiuotas pagal EC normas įlinkis gaunamas 17 % didesnis, o pagal STR – 23 % didesnis.

Sijų R-4-.7-V ir T-4-.7-V, kurių pradinio įtempimo dydis didesnis, įlinkis, apskaičiuotas pagal ACI normas, yra vidutiniškai 57 % didesnis, nei gautas eksperimento metu, apskaičiuotas pagal EC normas – 30 % didesnis, o pagal STR normas – 33 % didesnis.

Sijų R-2-.5.V ir T-2-.5-V, kurių armavimo procentas mažesnis, t.y. jos armuotos tik dviem iš anksto įtemptais anglies pluošto armatūros strypais, teoriškai pagal ACI normas apskaičiuotas įlinkis gaunamas 48 % didesnis, nei eksperimento metu gautas įlinkis, apskaičiuotas pagal EC normas – 39 % didesnis, pagal STR – 21 % didesnis.

Sijų FRP-2, armuotų dviem įtemptais FRP armatūros lynais, teoriškai pagal ACI normas gauti rezultatai yra vidutiniškai 22 % didesni nei gauti eksperimento metu, apskaičiuoti pagal EC normas 35 % didesni, pagal STR normas – 5 % didesni.

Atlikus analizę matyti, kad EC normos labiau tinkamos skaičiuoti įlinkį elementų su didesniu armavimo procentu. Tai galima pastebėti lyginant gautus rezultatus: sijų, kurios armuotos keturiais iš anksto įtemptais armatūros strypais, apskaičiuotas įlinkis artimesnis išmatuotam eksperimento metu, o sijų, armuotų tik dviem armatūros strypais skaičiavimais prognozuojamas įlinkis gaunamas su didesne atsarga. Kai sijų armavimo procentas didesnis nei 0,25 %, vidutinis kirtumas tarp pagal EC normas apskaičiuoto įlinkio ir eksperimento metu išmatuoto įlinkio yra mažesnis nei 20 %. Sijų armavimo procentui esant mažesniui nei 0,25 % („FRP“ sijos ir „R, T“ sijos su dviem armatūros strypais), artimiausias eksperimento metu išmatuotam įlinkiui rezultatas gaunamas skaičiuojant pagal STR normose pateiktą įlinkio skaičiavimo metodiką, o skirtumas tarp rezultatų gaunamas mažesnis nei 25 %. Taip pat reiktų pabrėžti, kad naudojant ACI normose pateikiamą metodiką dažniausiai prognozuojamas įlinkis su per didele atsarga.

Buvo atlikti ir sijų, armuotų iš anksto įtempta plienine armatūra, įlinkio teoriniai skaičiavimai, o rezultatai palyginti su eksperimento metu gautais rezultatais. 2.13 paveiksle galima matyti, kad skaičiuojant sijas, armuotas iš anksto įtempta plienine armatūra, skaičiavimais prognozuojamas įlinkis nesiekia eksperimento metu išmatuotos reikšmės.

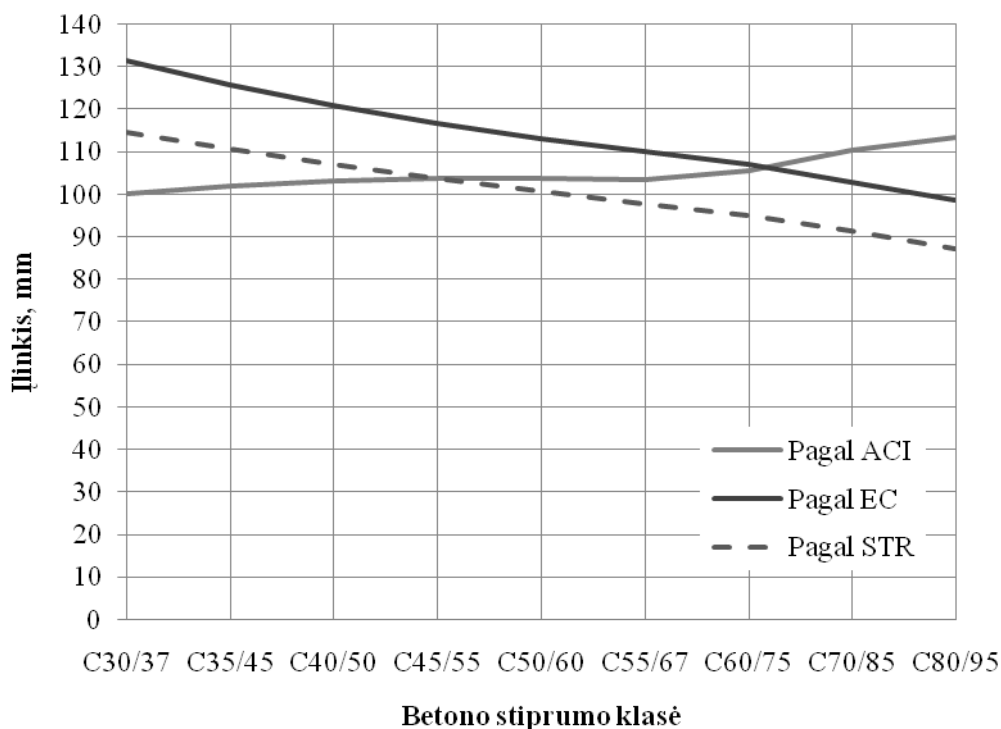
Skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą skaičiavimo metodiką apskaičiuotas įlinkis yra vidutiniškai 38 % mažesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, skaičiuojant pagal EC normas – 16 % mažesnis, o skaičiuojant pagal STR normas – 39 % mažesnis. Taip yra todėl, kad pateiktas eksperimentinis įlinkis buvo išmatuotas prieš pat sijos suirimą, kai armatūra jau teka. Visos skaičiavimo normos paremtos prielaida, kad armatūra dirba tamprioje stadijoje, todėl atsirandančios papildomos plastinės deformacijos neįvertinamos. Dėl šios priežasties skaičiavimais gaunamas mažesnis nei eksperimento metu išmatuotas įlinkis. Kadangi kompozitinė FRP armatūra iki pat suirimo dirba tampriai, įlinkį galima skaičiuoti betkurioje stadijoje iki suirimo.

2.4.3. Įlinkio priklausomybė nuo betono stiprumo klasės

Siekiant nustatyti įvairių faktorių įtaką elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, įlinkiui, atliekama ilgalaikio įlinkio teorinė analizė. Skaičiavimai atliekami rekomenduojamam pastatų eksploatavimo laikui, t.y. 50 metų. 2.20 lentelėje pateikti elementų su plyšiais ilgalaikio įlinkio skaičiavimai, kai keičiama betono stiprumo klasė ir atitinkamai betono tamprumo modulis (skaičiavimai atliekami sijai su 200 mm pločio juosta, pradinis įtempimo dydis $0,6 f_{pk}$). Grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.14 paveiksle.

2.20 lentelė. Sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio skaičiavimas, kai keičiama betono stiprumo klasė

<i>Betono stiprumo klasė</i>	<i>Įlinkis, mm</i>		
	<i>Pagal ACI normas</i>	<i>Pagal EC normas</i>	<i>Pagal STR normas</i>
<i>C30/37</i>	100,0	131,4	114,7
<i>C35/45</i>	101,9	125,6	110,9
<i>C40/50</i>	103,0	120,8	107,2
<i>C45/55</i>	103,7	116,7	103,9
<i>C50/60</i>	103,8	113,2	100,9
<i>C55/67</i>	103,4	110,0	97,9
<i>C60/75</i>	105,3	107,1	95,1
<i>C70/85</i>	110,3	102,9	91,6
<i>C80/95</i>	113,4	98,7	87,3



2.14 pav. Sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio skaičiavimo, kai keičiama betono stiprumo klasė, grafinis rezultatų palyginimas

Skaičiuojant pagal EC normose pateiktą metodiką, betono stipriui padidėjus nuo C30/37 iki C80/95, įlinkis sumažėjo 25 %, o skaičiuojant pagal STR normas sumažėjo 24 %. Skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą ilgalaikio įlinkio skaičiavimo metodiką gaunama kitokia situacija – didėjant betono stiprumo klasei ir tamprumo moduliui, įlinkis didėja. Padidinus betonų klasę nuo C30/37 iki C80/95, įlinkis padidėjo daugiau nei 13 %.

Atlikus elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgalaikio įlinkio analizę matyti, kad kintant betono tamprumo moduliui įlinkiai, apskaičiuoti pagal EC ir STR normas, kinta tiesiškai ir didėjant betono klasei (taip pat betono tamprumo moduliui) įlinkis mažėja. Įlinkio, apskaičiuoto pagal ACI normose pateiktą metodiką, pokytis didėjant betono stiprumo klasei nėra tiesinis. Pradžioje, iki C50/60 stiprumo klasės prognozuojamas sijų įlinkis didėja nedideliu žingsniu, po to pradeda mažėti, o nuo C55/67 betono klasės vėl pradeda intensyviai didėti. Taip yra todėl, kad šiose normose skaičiuojant efektyvųjį inercijos momentą naudojamas β_d koeficientas, kuris proporcingas skerspjuvio armavimo koeficiento ρ_f ir ρ_{fb} santykiui. Didėjant betono stiprumo klasei ir atitinkamai betono tamprumo moduliui ρ_{fb} koeficientas mažėja, todėl mažėja ir koeficientas β_d , o atitinkamai ir sijų skerspjuvio efektyvusis inercijos momentas. Todėl didėjant sijų betono tamprumo moduliui, o efektyviajam inercijos momentui mažėjant, gaunama 2.14 paveiksle pavaizduota išlinkusi

kreivė. Aktyvesnis įlinkio, apskaičiuoto pagal ACI normas, didėjimas nuo C55/67 betono klasės atsiranda dėl gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficiento β_1 . Šis koeficientas priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio ir pagal ACI normose pateiktas rekomendacijas didėjant betono gniuždomajam stipriui mažėja, tačiau negali būti imamas mažesnis nei 0,65. Todėl pasiekus betono tipumo klasę C60/75, koeficientas β_1 priimamas lygus 0,65, ir toliau didėjant betono gniuždomajam stipriui nekinta. Dėl šios priežasties koeficientas ρ_{pb} didėjant betono klasei pradeda didėti didesniu žingsniu, o koeficientas β_d ima atitinkamai mažėti. Koeficiento β_d skaičiavimas pagal (2.44) lygtį pradėtas naudoti 2006 metais išleistame ACI projektavimo normų leidime (ACI 440.1R-06). Šis koeficiento skaičiavimo būdas sulaukia daug kritikos, kadangi jis paremtas ne esamomis skaičiavimo teorijomis, o atliktų eksperimentų statistiniais duomenimis. Todėl tyrėjai iš įvairių šalių ir toliau ieško alternatyvių skaičiavimo metodų, kurie kuo realiau atspindėtų tikrąją konstrukcijų elgseną.

Kaip matyti 2.14 paveiksle, didžiausias ilgalaikis įlinkis gaunamas skaičiuojant pagal EC normose pateiktą metodiką. Taip yra todėl, kad EC normose pateikiamoje įlinkio skaičiavimo metodikoje įvertinamos tokios betono savybės, kaip valkšnumas ir traukumas. STR normos taip pat įvertina betono traukumą, tačiau jose įvestas supaprastinimas, t.y. betono susitraukimo reikšmės paimamos iš lentelės ir kintant betono klasei nekinta, o valkšnumas įvertinamas per nekintančius empirinius koeficientus. EC normose betono traukumo deformacijos apskaičiuojamos kiekvienai betono stiprumo klasei. Taip pat šiose normose pateiktoje metodikoje įlinkis dėl valkšnumo apskaičiuojamas naudojant efektyvųjį betono tamprumo modulį, kuris priklauso nuo valkšnumo koeficiento. Valkšnumo koeficientas priklauso nuo betono klasės ir yra didesnis žemesnės, ir mažesnis aukštesnės klasės betonui. Amerikiečių parengtose ACI normose įlinkio skaičiavimo metodika visai supaprastinama. Čia betono valkšnumo ir traukumo įtaka ilgalaikiam konstrukcijos įlinkiui įvertinama naudojant vieną koeficientą λ , iš kurio padauginamas trumpalaikis įlinkis. Šis koeficientas priklauso nuo eksploataavimo trukmės ir yra nustatytas remiantis per daugelį metų surinktais statistiniais duomenimis.

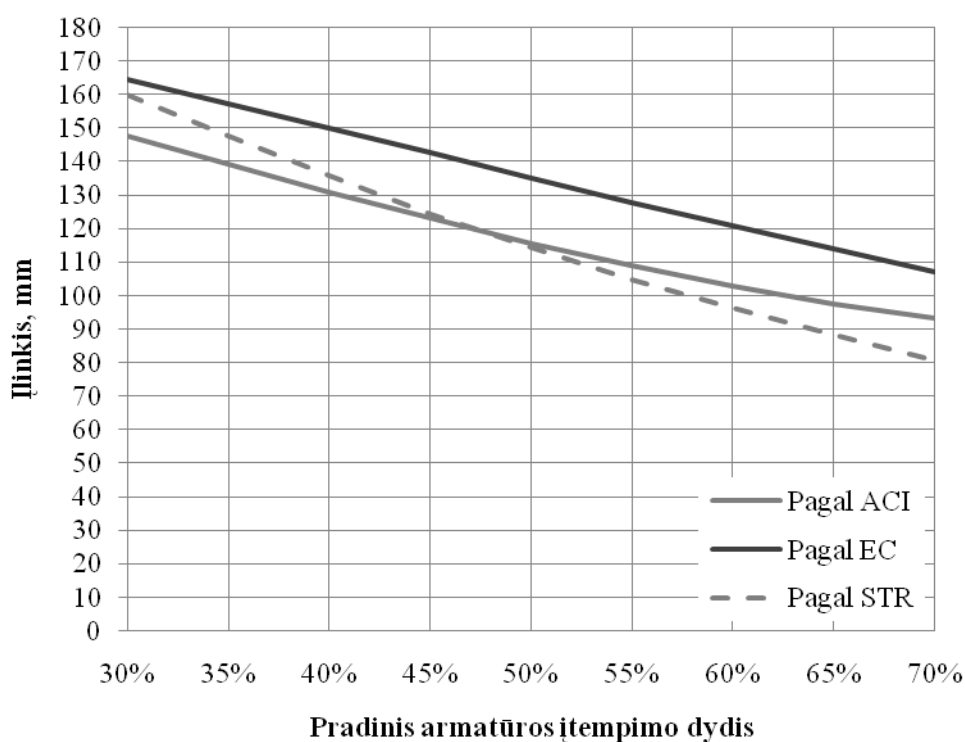
2.4.4. Įlinkio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio

Lentelėje 2.21 pateikti elementų su plyšiais ilgalaikio įlinkio skaičiavimai, keičiant pradinį iš anksto įtemptos armatūros įtempimo dydį (skaičiavimai atliekami sijai su 200 mm

pločio juosta, betono stiprumo klasė C40/50). Grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.15 paveiksle.

2.21 lentelė. Ilgaikio įlinkio skaičiavimas, kai keičiamas iš anksto įtemptos armatūros pradinio įtempimo dydis

<i>Pradinis įtempimo dydis</i>	<i>Įlinkis, mm</i>		
	<i>Pagal ACI normas</i>	<i>Pagal EC normas</i>	<i>Pagal STR normas</i>
$0,3 f_{fu}$	147,6	164,6	159,8
$0,35 f_{fu}$	139,2	157,3	147,5
$0,4 f_{fu}$	130,9	149,9	135,6
$0,45 f_{fu}$	123,1	142,5	124,1
$0,5 f_{fu}$	115,7	135,1	114,2
$0,55 f_{fu}$	108,9	127,8	105,0
$0,6 f_{fu}$	102,9	120,6	96,3
$0,65 f_{fu}$	97,7	113,6	88,2
$0,7 f_{fu}$	93,3	106,9	80,7



2.15 pav. Elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, ilgaikio įlinkio skaičiavimo, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydis, grafinis rezultatų palyginimas

Paveiksle 2.15 matyti, kad ilgalaikis įlinkis, apskaičiuotas pagal EC normas gaunamas didžiausia lyginant su kitomis dvejomis normomis. Ilgalaikis įlinkis, apskaičiuotas pagal EC normas gaunamas vidutiniškai 13 % didesnis nei gautas skaičiuojant pagal ACI normas ir vidutiniškai 15% didesnis nei skaičiuojant pagal STR normas.

Didžiausias įlinkio pokytis, kai keičiamas pradinis iš anksto įtemptos armatūros įtempimo dydis, gaunamas skaičiuojant pagal STR normas – padidinus pradinio įtempimo dydį du kartus, ilgalaikis įlinkis sumažėjo 45 %. Skaičiuojant pagal kitas dvi normas pokytis siek tiek mažesnis: skaičiuojant pagal EC normas, padidinus pradinį įtempimą du kartus, įlinkis sumažėjo 32 %, o pagal ACI – 33 %. Didinant iš anksto įtemptos armatūros įtempimo dydį įlinkis mažėja, nes padidinamas elemento standumas ir atsparumas pleišėjimui.

2.4.5. Išvados

Atlikus teorinius eksperimentinių sijų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, skaičiavimus matyti, kad rezultatai skaičiuojant pagal skirtingas skaičiavimo normas gaunami labai skirtingi. Skirtumas tarp pagal EC ir ACI normas apskaičiuoto trumpalaikio įlinkio vidutiniškai siekia 13 %, o tarp EC ir STR – 11 %.

Atlikus analizę nustatyta, kad esant didesniai skerpjūvio armavimo procentui ($\rho_f \geq 0,25 \%$), eksperimentinis įlinkis su teoriškai apskaičiuotu geriausiai sutampa skaičiuojant pagal EC normose pateiktą įlinkio skaičiavimo metodiką. Skirtumas tarp apskaičiuotų ir eksperimentinių įlinkių gaunamas mažesnis nei 20 %.

Esant mažesniai sijų armavimo procentui ($\rho_f < 0,25 \%$), artimiausias eksperimento metu išmatuotam įlinkiui rezultatas gaunamas skaičiuojant pagal STR normose pateiktą įlinkio skaičiavimo metodiką, o skirtumas tarp apskaičiuotų ir eksperimentinių įlinkių yra mažesnis nei 25 %.

Atlikta analizė parodė, kad pagal aptartas metodikas apskaičiuotas įlinkis, esant toms pačioms medžiagų charakteristikoms ir apkrovoms, gali skirtis iki 30 %.

Lenkiamų elementų, armuotų iš anksto įtempta armatūra, įlinkis labai priklauso nuo pradinio anglies pluošto armatūros įtempimo dydžio. Padidinus pradinį įtempimą 10 %, įlinkis gali sumažėti nuo 10 iki 15 %.

Atlikus teorinius skaičiavimus nustatyta, kad naudojant aukštesnės klasės betoną galima sumažinti elementų, armuotų kompozitine armatūra, įlinkį. Padidinus betono stiprumą viena klase įlinkis vidutiniškai sumažėja 3,2 %.

Analizuojant Amerikos betono instituto rekomenduojamą skaičiavimo metodiką, pastebėta, kad dėl koeficiento β_d įtakos didėjant betono stiprumo klasei ir betono tamprumo moduliui, sijos įlinkis netiesiškai didėja. Iš to galima spręsti, kad šis koeficientas neatspindi

gelžbetoninio elemento tikrosios elgsenos ir iškreipia gaunamus įlinkio skaičiavimo rezultatus.

2.5. Plyšių pločio skaičiavimas

Šiame poskyryje nagrinėjamos plyšių pločio skaičiavimo metodikos. Amerikos betono instituto rekomenduojama skaičiavimo metodika skirta skaičiuoti FRP armatūra armuotų elementų pleišėjimą. Europoje tokių elementų projektavimui skirta skaičiavimo metodika dar nėra sukurta, todėl analizei imamos dvi skaičiavimo normos, skirtos projektuoti plienine armatūra armuotas gelžbetonines konstrukcijas: Eurokodas 2 ir Lietuvos Statybos techninis reglamentas. Atliekant analizę siekiama nustatyti, kuri skaičiavimo metodika yra tinkamiausia skaičiuoti gelžbetoninių elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, plyšių plotį.

2.5.1. Plyšių pločio skaičiavimo metodai

Skaičiavimas pagal ACI normas (American Concrete Institute) (ACI 440.1R: 2006). ACI rekomenduoja plyšio plotį apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}, \quad (2.61)$$

čia $\frac{f_f}{E_f} = \varepsilon_f$ - FRP armatūros deformacija;

k_b - koeficientas, priklausantis nuo armatūros ir betono sukibties sąlygų (jei sukibimas panašus į betono sukibimą su plieno armatūra - $k_b = 1,0$; jei sukibimas prastesnis, k_b turi būti didesnis nei 1; jei sukibimas geresnis, k_b imamas mažesnis nei 1; jei nėra sukibimo eksperimentinių duomenų, nelygiems strypams koeficientas gali būti imamas lygus 1,4);

β - atstumo, nuo neutraliosios ašies iki tempiamo elemento krašto ir atstumo nuo neutraliosios ašies iki tempiamos armatūros svorio centro, santykis;

c - atstumas nuo tempiamo skerspjuvio krašto iki arčiausiai paviršiaus esančio išilginės armatūros strypo centro;

s - atstumas tarp išilginių strypų.

ACI normos siūlo naudoti metodiką, skirtą skaičiuoti plienine armatūra armuotus gelžbetoninius elementus, papildomai naudojant koeficientą k_b . Šis koeficientas nusako armatūros ir betono sukibties sąlygas, lyginant su plieninės armatūros rumbuotų strypų sukibties savybėmis. Skaičiavimo metodika paremta armatūros deformacijomis.

Skaičiavimas pagal Europos standartą Eurokodą 2 (LST EN 1992-1-1:2005).

Pagal Eurokodo rekomendaciją, plyšio plotis w_k gali būti apskaičiuojamas taikant tokią lygtį:

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}), \quad (2.62)$$

čia $s_{r,\max}$ - didžiausias tarpas tarp plyšių;

ε_{fm} - pagrindinė armatūros deformacija veikiant atitinkamam deriniui, įskaitant poveikio deformacijų efektą ir atsižvelgiant į tempiamojo standinimo efektus;

ε_{cm} - vidutinė betono deformacija tarp plyšių.

Dydis $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ gali būti apskaičiuojamas taikant šią lygtį:

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_f - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_f} \geq 0,6 \frac{\sigma_f}{E_f}, \quad (2.63)$$

čia σ_f - įtempiai tempiamoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs;

α_e - santykis E_f / E_{cm} ;

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}}; \quad (2.64)$$

A'_p - į atsparas arba į betoną įtempiamos armatūros, esančios $A_{c,eff}$ plote, skerspjūvio plotas;

$A_{c,eff}$ - įprastą ar įtemptąją armatūrą supančio tempiamo betono, kurio aukštis yra $h_{c,ef}$ (čia $h_{c,ef}$ yra mažiausioji iš reikšmių: $2,5(h-d)$, $(h-x)/3$ arba $h/2$), efektyvusis skerspjūvio plotas;

k_t - nuo apkrovos trukmės priklausantis koeficientas ($k_t = 0,6$, kai apkrova trumpalaikė; $k_t = 0,4$, kai apkrova ilgalaikė);

ξ_1 - pakoreguotas sukibimo stiprio koeficientas, atsižvelgiant į skirtingus įprastos ir įtemptosios armatūros skersmenis:

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\phi_s}{\phi_p}}; \quad (2.65)$$

ξ - įprastos ir įtemptosios armatūros sukibimo stiprio koeficientas, nustatomas pagal 6.2 lentelę (LST EN 1992-1-1:2005). Jei pleišėjimui apriboti naudojama tik įtemptoji armatūra, tai $\xi_1 = \sqrt{\xi}$;

ϕ_s - armatūros didžiausias strypo skersmuo;

ϕ_p - įtemptosios armatūros lygiavertis skersmuo.

Tais atvejais, kai sukibusioji armatūra tempiamoje zonoje pritvirtinta pakankamai artimuose centruose (tarpai $\leq 5(c + \phi / 2)$), didžiausias galutinis tarpas tarp plyšių gali būti apskaičiuotas taikant tokią lygtį:

$$s_{r,\max} = 3,4 \cdot c + 0,425 \cdot k_1 k_2 \phi / \rho_{p,\text{eff}}, \quad (2.66)$$

čia ϕ - strypo skersmuo;

c - išilginės armatūros apsauginio betono sluoksnio storis;

k_1 - koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į sukibusiosios armatūros sukibties savybes (0,8 - didelės sukibties strypams; 1,6 - strypams su beveik lygiu paviršiumi);

k_2 - koeficientas kurį taikant atsižvelgiama į deformacijų pasiskirstymą (0,5 - lenkimo atveju; 1,0 - grynojo tempimo atveju).

Jei tarpas tarp sukibusųjų įtemptųjų lynų viršija $5(c + \phi / 2)$ arba tempiamoje zonoje nėra sukibusios armatūros, didžiausio plyšio reikšmė gali būti nustatyta darant prielaidą, kad tarpas tarp plyšių yra didžiausias:

$$s_{r,\max} = 1,3(h - x). \quad (2.67)$$

Eurokodo 2 pateikiama skaičiavimo metodika remiasi deformacijomis armatūroje ir betone tarp plyšių, todėl galėtų būti naudojama kompozitine armatūra armuotų elementų plyšio pločio prognozavimui. Naudojant koeficientą k_t galima įvertinti apkrovos trukmę, o koeficientas k_1 įvertina armatūros sukibties savybes.

Skaičiavimas pagal Statybos techninį reglamentą (STR 2.05.05:2005). Pagal STR rekomendacijas normalinių, statmenų elemento išilginei ašiai, plyšių atsivėrimo plotis w_k apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_k = \delta \varphi_l \eta \frac{\sigma_f}{E_f} 20(3,5 - 100\rho_1) \sqrt[3]{\phi}, \quad (2.68)$$

čia $\delta = 1,0$, kai apskaičiuojami lenkiamieji ir ekscentriškai gniuždomieji elementai;
 φ_l – koeficientas, priklausantis nuo apkrovimo tipo, betono rūšies ir jo drėgnumo. Parenkamas pagal (STR 2.05.05:2005) pateiktą 23 lentelę;
 η – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į sukibusiosios armatūros sukibties savybes ($\eta = 1$, kai yra rumbuotoji strypinė armatūra; $\eta = 1,3$, kai yra lygaus paviršiaus strypinė armatūra; $\eta = 1,2$, kai rumbuotoji viela ir lynai; $\eta = 1,4$, kai yra lygi armatūrinė viela);
 σ_f – tempiamosios armatūros kraštinės eilės strypų įtempiai (arba jų prieaugis, kai armatūra iš anksto įtempta) nuo veikiančios išorinės apkrovos;
 ρ_1 – elemento skerspjūvio armavimo koeficientas imamas lygus tempiamosios armatūros skerspjūvio ploto ir elemento betoninio skerspjūvio ploto (naudingojo aukščio ribose ir atmetus gniuždomųjų tėjinio skerspjūvio lentynų plotą) santykiui, bet imamas ne didesnis kaip 0,02;
 ϕ – armatūros skersmuo.

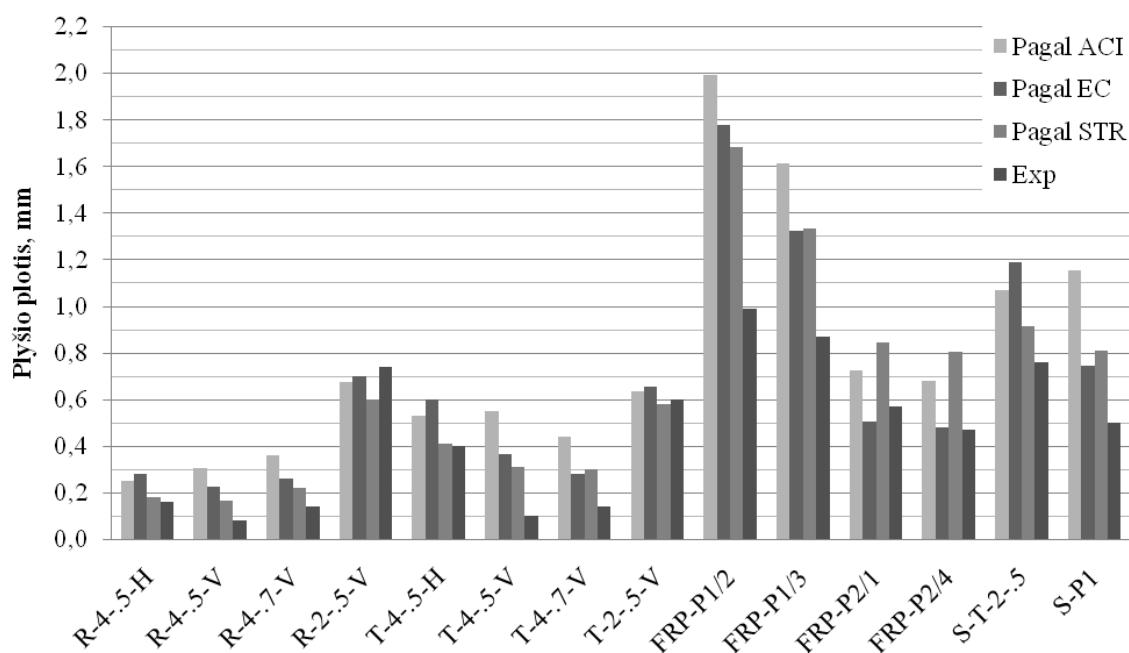
STR normose pateikta skaičiavimo metodika taip pat paremta armatūros deformacijomis, todėl galėtų būti naudojama skaičiuoti elementus, armuotus FRP armatūra. Skaičiavimuose naudojamas koeficientas η , kuriuo atsižvelgiama į armatūros sukibties savybes ir paviršiaus formą, o naudojant koeficientą δ atsižvelgiama į deformacijų pasiskirstymą skerspjūvyje, kai elementas yra lenkiamas arba veikiamas grynojo tempimo.

2.5.2. Plyšių pločio teorinė analizė

Panaudojant aptartas metodikas buvo atlikti kelių autorių (Abdelrahman ir Rizkalla 1997; Borosnyoi 2002) gelžbetoninių eksperimentinių sijų, armuotų anglies pluošto kompozitine armatūra, plyšių pločio teoriniai skaičiavimai (duomenys sijų skaičiavimui pateikti 2.1 poskyryje). Plyšių plotis skaičiuojamas nuo apkrovos, kuriai esant eksperimento metu pleišėjimas stabilizavosi. 2.22 lentelėje ir 2.16 paveiksle pateiktas eksperimentinių sijų įlinkio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais.

2.22 lentelė. Lenkiamų elementų plyšių pločio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

<i>Sijos pavadinimas</i>	<i>w_{k,calc} mm</i>			<i>w_{k,exp} mm</i>	<i>w_{k,calc} / w_{k,exp}</i>		
	<i>Pagal ACI</i>	<i>Pagal EC</i>	<i>Pagal STR</i>		<i>Pagal ACI</i>	<i>Pagal EC</i>	<i>Pagal STR</i>
<i>R-4-5-H</i>	0,25	0,28	0,18	0,16	1,57	1,73	1,12
<i>R-4-5-V</i>	0,31	0,23	0,17	0,08	3,83	2,82	2,07
<i>R-4-7-V</i>	0,36	0,26	0,22	0,14	2,55	1,86	1,58
<i>R-2-5-V</i>	0,67	0,70	0,59	0,74	0,91	0,94	0,80
<i>T-4-5-H</i>	0,53	0,60	0,41	0,40	1,32	1,49	1,02
<i>T-4-5-V</i>	0,55	0,37	0,31	0,10	5,49	3,65	3,11
<i>T-4-7-V</i>	0,44	0,28	0,30	0,14	3,14	2,00	2,14
<i>T-2-5-V</i>	0,63	0,65	0,58	0,60	1,06	1,09	0,96
<i>FRP-P1/2</i>	1,99	1,78	1,68	0,99	2,01	1,80	1,70
<i>FRP-P1/3</i>	1,61	1,32	1,33	0,87	1,85	1,52	1,53
<i>FRP-P2/1</i>	0,73	0,51	0,84	0,57	1,27	0,89	1,48
<i>FRP-P2/4</i>	0,68	0,48	0,80	0,47	1,45	1,02	1,71
<i>S-T-2-5</i>	1,07	1,19	0,91	0,76	1,40	1,56	1,20
<i>S-P1</i>	1,15	0,74	0,81	0,50	2,30	1,49	1,61



2.16 pav. Lenkiamų elementų plyšių pločio skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

Kaip matyti 2.16 paveiksle, teorinių skaičiavimų rezultatai gaunami labai įvairūs, o gautas skirtumas tarp skaičiavimų ir eksperimentų rezultatų svyruoja nuo 2 % iki daugiau nei penkių kartų.

Elementų R-4.5-H ir T-4.5-H, kuriuose iš anksto įtempta armatūra išdėstyta dviem lygiais, pagal ACI normas apskaičiuotas plyšių plotis yra vidutiniškai 45 % didesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, apskaičiuotas pagal EC normas yra vidutiniškai 61 % didesnis, o pagal STR normas – 7,5 % didesnis. Sijų R-4.5-V ir T-4.5-V, kuriose armatūra išdėstyta keturiuose lygiuose, pagal ACI normas apskaičiuotas plyšių plotis gaunamas vidutiniškai 4,7 karto didesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, apskaičiuotas pagal EC normas gaunamas vidutiniškai 3,2 karto didesnis, o apskaičiuotas pagal STR normas – 2,6 karto didesnis.

Sijų R-4.7-V ir T-4.7-V, kurių pradinis apspaudimo dydis didesnis, pagal ACI normose pateiktą skaičiavimo metodiką apskaičiuotas plyšio plotis yra vidutiniškai 2,8 karto didesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, o apskaičiuotas pagal EC ir STR normas – 1,9 karto didesnis.

Elementų R-2.5-V ir T-2.5-V, kurių skerspjuvio armavimo procentas mažesnis, pagal EC normose pateiktą metodiką apskaičiuotas plyšių plotis gaunamas vidutiniškai 1,5 % didesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, o apskaičiuotas pagal STR normas – 12 % mažesnis. Skaičiuojant pagal ACI normas gaunama, kad vienos sijos prognozuojamas plyšių plotis yra 9 % mažesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, o kitos 6 % didesnis.

Elementų FRP-1, kurie armuoti tik vienu iš anksto įtemptu FRP armatūros lynu, pagal EC ir ACI normose pateiktas skaičiavimo metodikas apskaičiuotas plyšio plotis yra vidutiniškai 1,7 karto didesnis, nei išmatuotas eksperimento metu, o pagal STR normas – 1,6 karto didesnis. Elementų FRP-2, armuotų dviem iš anksto įtemptais FRP armatūros lynais, pagal EC normas apskaičiuoti plyšių pločiai gaunami vidutiniškai 5 % mažesni, nei išmatuoti eksperimento metu, apskaičiuoti pagal ACI normas – 36 % didesni, o apskaičiuoti pagal STR normas – 60 % didesni.

Elementų S-T-2.5 ir SP1, kuriems apspausti naudojama iš anksto įtempta plieninė armatūra, pagal EC normas apskaičiuotas plyšių plotis yra vidutiniškai 53 % didesnis, nei gautas eksperimento metu, pagal ACI normas – 85 % didesnis, o pagal STR normas – 41 % didesnis.

Skaičiuojant sijų H-4.5-V, H-4.7-V, T-4.5-V, T-4.7-V pleišėjimą, gaunama didžiausia atsarga. Taip yra todėl, kad šių sijų keturi iš anksto įtempti armatūros strypai išdėstyti keturiomis eilėmis po vieną, todėl gaunamas mažiausias naudingas skerspjuvio aukštis ir mažiausias apspaudimo jėgos ekscentricitetas.

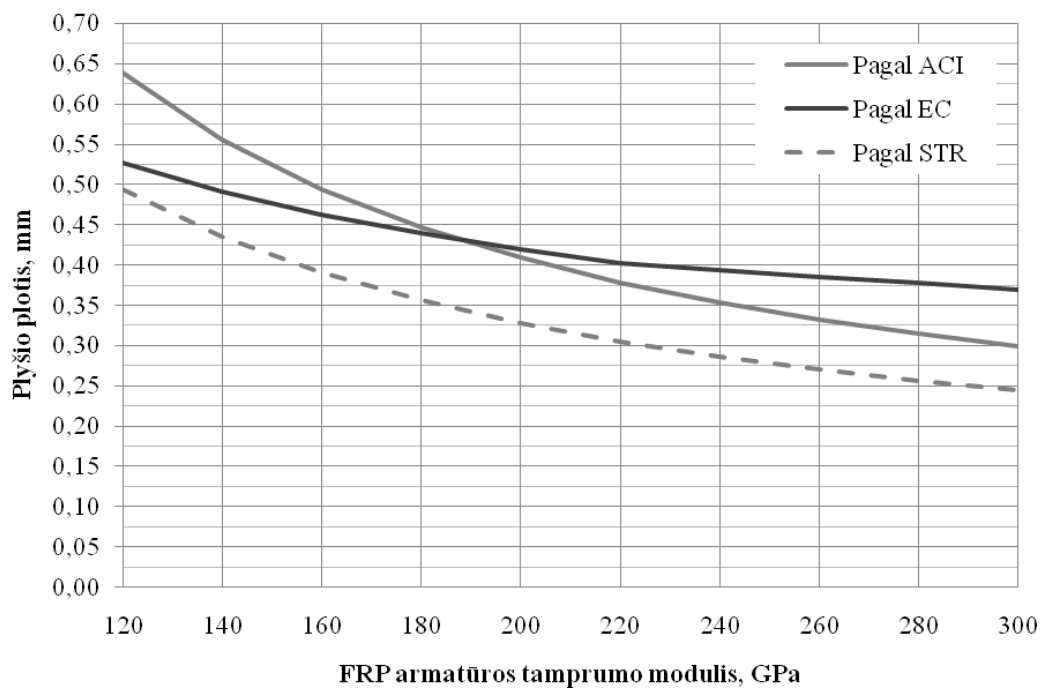
Atlikus analizę, nustatyta, kad artimiausi eksperimento metu išmatuotam plyšių pločiui rezultatai gaunami skaičiuojant pagal STR normose pateiktą skaičiavimo metodiką. Rezultatai labai priklauso nuo apskaičiuotų tempiamos armatūros įtempių. Skaičiuojant pagal EC ir ACI normas rezultatai gaunami prastesni, kadangi pagal šias normas skaičiuojant armatūroje atsirandančius įtempius skerspjūvis laikomas visiškai supleišėjusiu, tad įtempiai gaunami didesni. Tuo tarpu skaičiuojant pagal STR normose pateiktą metodiką skerspjūvis yra skaičiuojamas kaip ne visiškai supleišėjęs, todėl esant didesniam gniuždomosios zonos aukščiui ir armatūros įtempiai gaunami mažesni.

2.5.3. Plyšių pločio priklausomybė nuo armatūros tamprumo modulio

Siekiant nustatyti įvairių faktorių įtaką elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, pleišėjimui, atliekama pleišėjimo teorinė analizė. 2.23 lentelėje pateikti elementų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, plyšio pločio skaičiavimai, keičiant kompozitinės armatūros tamprumo modulį (skaičiavimai atliekami sijai su 200 mm pločio juosta, pradinis įtempimo lygis $0,6 \cdot f_{fk}$). Grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.17 paveiksle.

2.23 lentelė. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis

<i>FRP armatūros tamprumo modulis, GPa</i>	<i>Plyšio plotis, mm</i>		
	<i>Pagal ACI normas</i>	<i>Pagal EC normas</i>	<i>Pagal STR normas</i>
120	0,639	0,527	0,493
140	0,556	0,492	0,434
160	0,494	0,463	0,390
180	0,447	0,439	0,355
200	0,409	0,419	0,328
220	0,378	0,402	0,305
240	0,353	0,394	0,286
260	0,332	0,385	0,270
280	0,314	0,377	0,256
300	0,299	0,369	0,244



2.17 pav. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas FRP armatūros tamprumo modulis

Kaip matyti 2.17 paveiksle, didėjant kompozitinės armatūros tamprumo moduliui, elemente atsirandančių plyšių plotis mažėja. Didžiausias sumažėjimas gaunamas skaičiuojant pagal ACI normas: padidinus armatūros tamprumo modulį du kartus, apskaičiuotas plyšių plotis sumažėjo 44 %. Skaičiuojant pagal STR normose pateiktą skaičiavimo metodiką, padidinus armatūros tamprumo modulį du kartus, plyšių plotis sumažėjo 41 %, o skaičiuojant pagal EC normas sumažėjimas gaunamas mažiausias ir siekia tik 23 %.

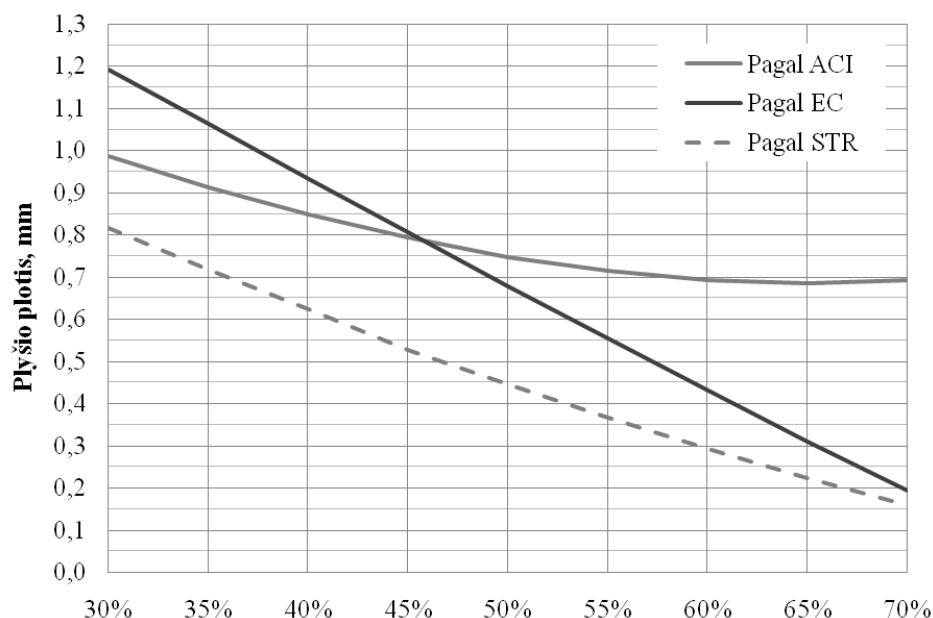
Galima matyti, kad mažiausias plyšių plotis gaunamas skaičiuojant pagal STR normose pateiktą metodiką. Skaičiuojant pagal EC normas plyšių plotis gaunamas vidutiniškai 30 % didesnis nei skaičiuojant pagal STR normas, o skaičiuojant pagal ACI gaunamas 20 % didesnis rezultatas.

2.5.4. Plyšių pločio priklausomybė nuo armatūros pradinio įtempimo dydžio

2.24 lentelėje pateikti elementų, armuotų iš anksto įtempta kompozitine armatūra, plyšių pločio skaičiavimai, kai keičiamas pradinio armatūros įtempimo dydis (skaičiavimai atliekami sijai su 200 mm pločio juosta). Grafinis skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 2.18 paveiksle.

2.24 lentelė. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydžiui

<i>Armatūros pradinio įtempimo dydis</i>	<i>Plyšio plotis, mm</i>		
	<i>Pagal ACI normas</i>	<i>Pagal EC normas</i>	<i>Pagal STR normas</i>
$0,3 f_{fu}$	0,985	1,190	0,816
$0,35 f_{fu}$	0,912	1,061	0,718
$0,4 f_{fu}$	0,848	0,932	0,622
$0,45 f_{fu}$	0,792	0,804	0,528
$0,5 f_{fu}$	0,748	0,678	0,444
$0,55 f_{fu}$	0,714	0,553	0,366
$0,6 f_{fu}$	0,693	0,430	0,292
$0,65 f_{fu}$	0,686	0,310	0,222
$0,7 f_{fu}$	0,692	0,193	0,158



2.18 pav. Elemento plyšių pločio skaičiavimas, kai keičiamas armatūros pradinio įtempimo dydžis

Kaip matyti 2.18 paveiksle, pagal skirtingas normas apskaičiuotas plyšių plotis gaunamas labai skirtingas. Rezultatai, gauti skaičiuojant pagal EC ir STR normas pasiskirsto tiesiškai, tuo tarpu skaičiuojant pagal ACI normose pateiktą metodiką gaunamas netiesinis pasiskirstymas. Taip yra todėl, kad ACI normos rekomenduoja perskaičiuoti supleišėjusių elementų neutraliosios ašies padėtį pasinaudojant anksčiau pateikta (2.47) lygtimi. Kadangi šioje lygtyje figuruoja pleišėjimo momento ir veikiančio lenkimo momento santykio kvadratas, neutraliosios ašies padėties dydis didėjant apspaudimo dydžiui kinta netiesiškai.

2.18 paveiksle matyti, kad didžiausias plyšio pločio sumažėjimas, didinant pradinį armatūros įtempimo dydį, gaunamas skaičiuojant pagal EC ir STR normas. Padidinus įtempimą du kartus, prognozuojamas plyšių plotis skaičiuojant pagal EC normas sumažėjo 82 %, o pagal STR – 78 %. Skaičiuojant pagal ACI normas gaunamas mažesnis sumažėjimas, siekiantis 24 %.

2.5.5. Išvados

Atlikus gelbetoninių sijų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, plyšių pločio teorinius skaičiavimus nustatyta, kad apskaičiuoti rezultatai nuo eksperimentų metu gautų rezultatų gali skirtis nuo 2 % iki daugiau nei penkių kartų.

Atlikus analizę nustatyta, kad eksperimentiniai ir teoriškai apskaičiuoti plyšių pločiai geriausiai sutampa skaičiuojant pagal STR normose pateiktą plyšių pločio skaičiavimo metodiką. Vis dėlto reikėtų pabrėžti, kad atsarga gaunama labai įvairi – nuo kelių procentų iki daugiau nei 3 kartų.

Plyšių dydis labai priklauso nuo pradinio armatūros įtempimo dydžio. Padidinus pradinį anglies pluošto armatūros įtempimo dydį 10 %, plyšių plotis gali sumažėti nuo 20 iki 55 %. Imant didesnio tamprumo modulio FRP armatūrą taip pat galima sumažinti atsirandančių plyšių dydį. Padidinus kompozitinės armatūros tamprumo modulį 20 GPa, atsirandančių plyšių plotis gali sumažėti 4 - 8 %.

3. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Siekiant prailginti specialiųjų statinių gelžbetoninių konstrukcijų eksploataavimo trukmę, vis dažniau naudojama korozijai atspari neplieninė kompozitinė armatūra. Tačiau šiuo metu dar tėra sukurta tik keletas rekomendacijų, skirtų skaičiuoti gelžbetoninius elementus, armuotus neplienine kompozitine armatūra, o ir šios nėra pakankamai išstobulintos. Šiame darbe nagrinėjamos įtempimo nuostolių, statmenojų pjūvio laikomosios galios, įlinkio ir plyšių pločio skaičiavimo metodikos. Siekiama nustatyti, kurios iš pateiktų metodikų tinkamos skaičiuoti kompozitine neplienine armatūra iš anksto įtemptus gelžbetoninius elementus.

Buvo atlikti gelžbetoninių sijų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, įtempimo nuostolių skaičiavimai. ACI normose pateikta įtempimo nuostolių skaičiavimo metodika skirta skaičiuoti kompozitine armatūra armuotų elementų įtempimo nuostolius, o Eurokode 2 ir Statybos techniniame reglamente pateiktos metodikos skirtos skaičiuoti elementus, apspausčius naudojant plieninę armatūrą. Atlikus skaičiavimo rezultatų analizę nustatyta, kad Eurokode 2 pateikta skaičiavimo metodika, nors ir nėra skirta skaičiuoti nuostolius elementuose, armuotuose iš anksto įtempta FRP (Fiber reinforced polymer) armatūra, yra dalinai tinkama skaičiuoti tokiems elementams, kadangi šioje metodikoje įvertinamos armatūros fizinės ir mechaninės savybės. Tačiau šiose normose pateikiamos nuostolių dėl armatūros relaksacijos skaičiavimo išraiškos nėra tinkamos skaičiuoti FRP armatūros relaksacijas, kadangi jos pritaikytos tik plieninei armatūrai, todėl dauguma atvejų gaunami relaksacijos nuostoliai yra per dideli. Atlikus analizę nustatyta, kad skaičiavimo metodika, pateikta Statybos techniniame reglamente, nėra tinkama skaičiuoti elementų, armuotų iš anksto įtempta FRP armatūra, įtempimo nuostolius. Taip yra dėl šios metodikos supaprastinimų, kurie padaro ją tinkama skaičiuoti tik plienine armatūra įtemptas konstrukcijas.

Atlikus gelžbetoninių eksperimentinių sijų statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimus ir gautus rezultatus tarpusavyje palyginus su eksperimentų metu išmatuota laikomąja galia nustatyta, kad tiksliausi rezultatai gaunami skaičiuojant pagal Fib rekomendacijose pateiktą statmenojų pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodiką. Pagal šią skaičiavimo metodiką apskaičiuota laikomoji galia nuo eksperimento metu išmatuotos vidutiniškai skiriasi 28 %. Rezultatai, gauti skaičiuojant pagal ACI ir STR normas, nuo eksperimentinių skiriasi vidutiniškai 31 %. Skirtumas tarp eksperimentinės ir teoriškai pagal

skirtingas normas apskaičiuotos laikomosios galios, yra nedidelis ir gali siekti iki 4 %. Nustatyta, kad padidinus gelžbetoninio elemento armavimo procentą 0,05 %, jo laikomoji galia padidėja vidutiniškai 35 %.

Atlikus eksperimentinių sijų, armuotų iš anksto įtempta anglies pluošto armatūra, teorinius įlinkio skaičiavimus ir gautus rezultatus tarpusavyje palyginus su eksperimentiniais įlinkiais nustatyta, kad pagal aptartas skaičiavimo metodikas apskaičiuotas įlinkis, esant toms pačioms medžiagų charakteristikoms ir apkrovoms, gali skirtis iki 30 %. Atlikus analizę nustatyta, kad esant didesniai skerspjūvio armavimo procentui, tiksliausi rezultatai gaunami skaičiuojant pagal Eurokode 2 pateiktą įlinkio skaičiavimo metodiką. Kai sijų armavimo procentas didesnis nei 0,25 %, vidutinis skirtumas tarp pagal Eurokodą 2 apskaičiuoto įlinkio ir eksperimento metu išmatuoto įlinkio yra mažesnis nei 20 %. Sijų armavimo procentui esant mažesniai nei 0,25 %, jų eksperimentinis įlinkis yra artimesnis pagal Statybos techniniame reglamente pateiktą skaičiavimo metodiką apskaičiuotam įlinkiui, o skirtumas tarp eksperimentinių ir teorinių įlinkių gaunamas mažesnis nei 25 %. Naudojant Amerikos betono instituto siūlomą įlinkio skaičiavimo metodiką, nors ši metodika vienintelė iš pateiktų yra pritaikyta skaičiuoti FRP armatūra armuotus elementus, yra gaunama didžiausia įlinkio atsarga. Skaičiavimais nustatyta, kad padidinus gelžbetoninio elemento pradinį anglies pluošto armatūros įtempimą 10 %, įlinkis gali sumažėti nuo 10 iki 15 %. Analizuojant Amerikos betono instituto rekomenduojamą skaičiavimo metodiką, nustatyta, kad dėl koeficiento β_d įtakos, didėjant betono stiprumo klasei ir betono tamprumo moduliui, sijos įlinkis netiesiškai didėja. Iš to galima spręsti, kad šis koeficientas (β_d) neatspindi gelžbetoninio elemento, armuoto FRP armatūra, tikrosios elgsenos ir iškreipia gaunamus įlinkio skaičiavimo rezultatus.

Atlikus gelžbetoninių eksperimentinių sijų plyšių pločio skaičiavimus ir gautus rezultatus palyginus su eksperimentų metu išmatuotais didžiausiais plyšių pločiais nustatyta, kad skirtumas tarp eksperimento metu išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių labai svyruoja ir gali kisti nuo 2 % iki daugiau nei penkių kartų. Atlikus analizę nustatyta, kad eksperimentiniai ir teoriškai apskaičiuoti plyšių pločiai geriausiai sutampa skaičiuojant pagal Statybos techniniame reglamente pateiktą plyšių pločio skaičiavimo metodiką, nors ši metodika skirta skaičiuoti plienine, o ne kompozitine armatūra armuotus elementus. Taip pat skaičiavimais nustatyta, kad padidinus pradinį anglies pluošto armatūros įtempimą 10 %, plyšių plotis gali sumažėti nuo 20 iki 55 %.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Abdelrahman, A. A.; Rizkalla, S. H. 1995. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon fibre plastic rods, *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*: 447–454.

Abdelrahman, A. A.; Rizkalla, S. H. 1997. Serviceability of Concrete Beams Prestressed by Carbon Fiber – Reinforced - Plastic Bars, *ACI Structural Journal*: 447–454.

ACI 318-05 Building Code Requirements For Structural Concrete. ACI Committee Report, 2005. 432 p.

ACI 435-R95 Control of Deflection in Concrete Structures. ACI Committee Report 1995. 89 p.

ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee Report, 2006. 44 p.

ACI 440.4R-04 Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. American Concrete institute: 2004. 35 p.

ACI 440R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete institute: 1996. 68 p.

Ammon, K.; Berman, N.; Bank, L. C. 1999. Effect Of High Temperature On Bond Strength Of FRP Rebars, *Journal of composites for construction*: 73-81.

Atutis, M.; Valivonis, J. 2010. Lenkiamųjų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų armavimo kompozitine armatūra ypatumai, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 2(2): 71–78.

Bank, L. C. 2006. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. 567 p.

Bareišis, J.; Tričys, V. 2003. *Polimerų ir kompozitų mechanika*. Šiauliai: Šiaulių universiteto leidykla. 258 p.

Borosnyoi, A. 2002. Serviceability of CFRP prestressed concrete beams: PhD Thesis. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Civil Engineering. 285 p.

Burke, C. R.; Dolan, C. W. 2001. Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons, *PCI Journal*, March – April 2001: 76-87.

Ceroni, F.; Cosenza, E.; Gaetano, M.; Pecce, M. 2006. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, *Cement & Concrete Composites* 28 (2006): 857–868.

Dolan, C. W.; Bakis, C. E.; Nanni, A. 2001. Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons, Final Report. 133 p.

Edward, G. N. 2009. *Prestressed Concrete*. ACI, AASHTO, IBC 2009 Codes Version. New York: Prentice Hall, 2009. 976 p.

Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; Tao, S., 1993. Bond of GFRP Rebars to Ordinary-Strength Concrete, *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, SP-138. American Concrete Institute, Detroit: 333-345.

Fib bulletin 40 2007. *FRP reinforcement in RC structures*. Technical report. Switzerland. 160 p.

GangaRao, H. V. S; Taly, N.; Vijay, P. V. 2007. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 400 p.

Gerritse, A. 1993. Aramid-based prestressing tendons, alternative materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete. London: Ed. Clarke, Chapman & Hall: 172-199.

Gorty, S. S. 1994. Mechanical Properties of Composite Cables, MS thesis, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City. 21-33 p.

Lees, J.M. 2001. Fibre – reinforced polymers in reinforced and prestressed concrete applications: moving forward, *Progresive Structural Engineering Materials* (3): 122-131.

Leung, H.Y.; Balendran, R.V.; Maqsood, T.; Nadeem, A.; Rana, T.M.; Tang, W.C. 2003. Fibre reinforced polymer materials for concrete structures, *Structural Survey* Volume 21 No.2: 95-101.

LST EN 1992-1-1:2005 Eurokodas 2. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2007. 232 p.

Mandell, J.F.; Meier, U. 1983. Effects of stress ratio, frequency and loading time on the tensile fatigue of glass reinforced epoxy. Long-term behaviour of composites. ASTM STP 813: 110-122.

Parkyn, B. 1985. *Glass reinforced plastics*. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons. 346 p.

Pisani, M. A. 1997. A numerical survey on the behaviour of beams prestressed with FRP cables, *Construction and Building Materials* (12): 221–232.

Rostasy, F. 1996. State-of-the-Art Report on FRP Materials, *FIP Report*: 89-108.

Schwarz, M. M. 1992. *Composite Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill. 651 p.

STR 2.05.05:2005 *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius, 2005. 126 p.

Talreja, R. 1987. *Fatigue of Composite Materials*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company. 181 p.

Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd. 1993. *Technical data on CFCC*. Tokyo, October.

Uomoto, T.; Nishimura, T. 1990. Deterioration of Aramid, Glass, and carbon Fibers Due to Alkali, Acid, and Water in Different Temperatures, *Fiber Reinforced Polymer Reinforcements*: 515-522.

Zoch, P.; Kimura, H.; Iwasaki, T.; Heym, M. 1991. Carbon Fiber Composite Cables – A New Class of Prestressing Members. Transportation Research earch Board. 19 p.