



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Austėja Gilvickaitė

**GELŽBETONINIŲ SIJŲ, PAGAMINTŲ IŠ PERDIRBTO BETONO,
LENKIAMASIS STIPRIS IR ĮLINKIS**

**FLEXURAL RESISTANCE AND DEFLECTION OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS MADE FROM RECYCLED CONCRETE**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Austėja Gilvickaite

**GELŽBETONINIŲ SIJŲ, PAGAMINTŲ IŠ PERDIRBTO BETONO,
LENKIAMASIS STIPRIS IR ILINKIS**

**FLEXURAL RESISTANCE AND DEFLECTION OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS MADE FROM RECYCLED CONCRETE**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Mykolas Daugevičius



Lietuvių kalbos konsultantė

dr. Lina Rutkienė

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Studijų kryptis: Statybos inžinerija

Studijų programa: Statinių konstrukcijos, valstybinis kodas 6211EX040

Specializacija: Pastatų konstrukcijos

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Juozas Valivonis

2023-05-29

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. PKfm-21-4176

Vilnius

Studentas (-ė): Austėja Gilvickaitė

Baigiamojo darbo tema: Gelžbetoninių sijų, pagamintų iš perdirbto betono, lenkiamasis stipris ir įlinkis

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Bendroji baigiamojo magistro darbo užduotis: Atlikti kitų tyrėjų atliktų mokslinių tyrimų analizę su perdirbto betono panaudojimu, bandymu. Nustatyti perdirbto betono mechanines savybes ir pritaikyti lenkiamų sijų iš perdirto betono laikomosios galios, įlinkiui skaičiuoti. Sijų laikomąją galią ir įlinkius nustatyti skirtingais skaičiavimo metodais. Pateikti laikomosios galios ir įlinkių palyginimą. Parašyti išvadas. Pateikti naudotos literatūros sąrašą, priedus apie skaičiavimus.

Vadovas docentas Mykolas Daugevičius

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Austėja Gilvickaitė, 20153779	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Statybos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Statinių konstrukcijos, PKfm-21	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Gelžbetoninių sijų, pagamintų iš perdirbto betono, lenkiamasis stipris ir įlinkis“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Mykolas Daugevičius. Mano darbo vadovas docentas daktaras Mykolas Daugevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

			Austėja Gilvickaitė
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

<table><tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr><tr><td>Statybos fakultetas</td></tr><tr><td>Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra</td></tr></table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Statybos fakultetas	Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	<table><tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr><tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr><tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr></table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas											
Statybos fakultetas											
Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra											
ISBN	ISSN										
Egz. sk.											
Data-.....-.....											
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas											
Pavadinimas	Gelžbetoninių sijų, pagamintų iš perdirbto betono, lenkiamasis stipris ir įlinkis										
Autorius	Austėja Gilvickaitė										
Vadovas	Mykolas Daugevičius										
<table><tr><td></td><td>Kalba: lietuvių</td></tr></table>			Kalba: lietuvių								
	Kalba: lietuvių										
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama įtaka įlinkiui ir lenkiamajam stipriui įprastus betono užpildus pakeitus perdirbto betono užpildais gelžbetoninėje sijoje. Išanalizuoti moksliniai tyrimai ir juose pateiktos įtempių-deformacijų kreivės. Šie duomenys pritaikyti apskaičiuojant lenkiamos sijos laikomąją galią ir įlinkį. Taip pat įvertinta ir perdirbtų užpildų kiekio gelžbetoninėje sijoje įtaka. Atliktas gelžbetoninės sijos su perdirbto betono užpildais laikomosios galios palyginimas su apskaičiuotomis, naudojantis Eurokodo 2 įtempių ir deformacijų kreive. Atlikus mokslinių tyrimų analizę ir apskaičiuotų bei eksperimentinių duomenų palyginimą, pateiktos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, teorinė (apžvalginė) dalis, metodinė dalis, skaičiavimų eiga ir rezultatų analizė, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 78 p. teksto be priedų, 32 iliustr., 20 lent., 28 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.											
Prasminiai žodžiai: perdirbtas betonas, užpildai, betonas su perdirbto betono užpildais, gelžbetoninė sija, tvarumas, atliekos, įlinkis, lenkiamasis stipris, armatūra											

<table border="1"> <tr> <td>Vilnius Gediminas Technical University</td> </tr> <tr> <td>Faculty of Civil Engineering</td> </tr> <tr> <td>Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics</td> </tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Civil Engineering	Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Civil Engineering																			
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Flexural Resistance and deflection of Reinforced Concrete Beams made from Recycled Concrete</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Austėja Gilvickaitė</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Mykolas Daugevičius</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Flexural Resistance and deflection of Reinforced Concrete Beams made from Recycled Concrete			Author	Austėja Gilvickaitė			Academic supervisor	Mykolas Daugevičius		
Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Flexural Resistance and deflection of Reinforced Concrete Beams made from Recycled Concrete																		
Author	Austėja Gilvickaitė																		
Academic supervisor	Mykolas Daugevičius																		
			<table border="1"> <tr> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>	Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td> Annotation In this Master's thesis the analysis of what influence does changing common reinforced concrete (RC) aggregates into recycled concrete aggregates (RCA) have on RC beam deflection and flexural strength is performed. Existing research articles and stress-strain diagrams that can be found in them are analysed. This data is later used for the calculation of the flexural strength and deflection of RC beams. In addition to that, the influence of the amount of RCA in the concrete beam is evaluated and comparison of recycled aggregate concrete (RAC) beam flexural strength and RC beam flexural strength calculated using Eurocode's concrete stress-strain curve is done. After the analysis of previous research and comparison of calculated and experimental data, the conclusion and recommendations are provided. Thesis is composed of 6 parts: introduction, theoretical part, methodical part, calculation process and result analysis, conclusions and recommendations, list of references. The scope of the thesis - 78 pages of text without annexes, 32 images., 20 tables and 28 references. Annexes are added separately to the end of this paper. </td> </tr> </table>				Annotation In this Master's thesis the analysis of what influence does changing common reinforced concrete (RC) aggregates into recycled concrete aggregates (RCA) have on RC beam deflection and flexural strength is performed. Existing research articles and stress-strain diagrams that can be found in them are analysed. This data is later used for the calculation of the flexural strength and deflection of RC beams. In addition to that, the influence of the amount of RCA in the concrete beam is evaluated and comparison of recycled aggregate concrete (RAC) beam flexural strength and RC beam flexural strength calculated using Eurocode's concrete stress-strain curve is done. After the analysis of previous research and comparison of calculated and experimental data, the conclusion and recommendations are provided. Thesis is composed of 6 parts: introduction, theoretical part, methodical part, calculation process and result analysis, conclusions and recommendations, list of references. The scope of the thesis - 78 pages of text without annexes, 32 images., 20 tables and 28 references. Annexes are added separately to the end of this paper.															
Annotation In this Master's thesis the analysis of what influence does changing common reinforced concrete (RC) aggregates into recycled concrete aggregates (RCA) have on RC beam deflection and flexural strength is performed. Existing research articles and stress-strain diagrams that can be found in them are analysed. This data is later used for the calculation of the flexural strength and deflection of RC beams. In addition to that, the influence of the amount of RCA in the concrete beam is evaluated and comparison of recycled aggregate concrete (RAC) beam flexural strength and RC beam flexural strength calculated using Eurocode's concrete stress-strain curve is done. After the analysis of previous research and comparison of calculated and experimental data, the conclusion and recommendations are provided. Thesis is composed of 6 parts: introduction, theoretical part, methodical part, calculation process and result analysis, conclusions and recommendations, list of references. The scope of the thesis - 78 pages of text without annexes, 32 images., 20 tables and 28 references. Annexes are added separately to the end of this paper.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: recycled concrete, aggregate, concrete with recycled concrete aggregates, RCA, RAC, RC beam, sustainability, waste, deflection, flexural resistance, reinforcement </td> </tr> </table>				Keywords: recycled concrete, aggregate, concrete with recycled concrete aggregates, RCA, RAC, RC beam, sustainability, waste, deflection, flexural resistance, reinforcement															
Keywords: recycled concrete, aggregate, concrete with recycled concrete aggregates, RCA, RAC, RC beam, sustainability, waste, deflection, flexural resistance, reinforcement																			

TURINYS

ĮVADAS	12
1 BETONO SU PERDIRBTAIS UŽPILDAIS LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
1.1 Betono, pagaminto su perdirbtais užpildais, pritaikymas statyboje	15
1.2 Perdirbtų užpildų susidarymas	18
1.3 Betono užpildų gavyba.....	20
1.4 Betono užpildų kokybė.....	21
1.5 Skirtingų perdirbto betono užpildų kiekių įtaka betono savybėms	22
1.6 Vandens – cemento kiekio įtaka.....	24
1.7 Tamprumo modulis	26
1.8 Įtempių ir deformacijų kreivė.....	27
1.9 Įlinkis.....	29
1.10 Pleišėjimas.....	30
1.11 Skyriaus išvados	31
2 PERDIRBTO BETONO SIJOS LAIKOMOSIOS GALIOS IR ĮLINKIO SKAIČIAVIMO METODIKA	32
2.1 Perdirbto betono sijos laikomosios galios skaičiavimas.	32
2.2 Pleišėjimo momento apskaičiavimas.....	35
2.3 Perdirbto betono sijos įlinkio skaičiavimas.....	37
2.4 Laikomosios galios ir įlinkio apskaičiavimas pagal EC2 įtempių-deformacijų kreivę.....	43
2.5 Laikomosios galios ir įlinkio apskaičiavimas pagal ACI-318-14 metodiką	45
2.6 Įlinkio ir laikomosios galios apskaičiavimas sijoms, apkrautoms dviem koncentruotomis apkrovomis	46
Skyriaus išvados	48
3 SKAIČIAVIMŲ EIGA IR REZULTATŲ ANALIZĖ	49
3.1 Laikomosios galios ir įlinkio skaičiavimų eiga (2 metodai):	49
3.2 Rezultatų analizė	51
3.3 Skyriaus išvados	75
BENDROSIOS IŠVADOS.....	76

LITERATŪROS SĄRAŠAS	78
PRIEDAI	81
A Priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą	82
A.1 priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą (Breccolotti et al., 2015)	82
A.2 priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą (Belén et al., 2010).....	125
A.3 priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą (Martínez-Lage et al., 2012)	354
B Priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą	397
B.1 priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą. (Hamad et al., 2018).....	397
B.2 priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą. (Knaack & Kurama, 2015).....	432

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Du identiškai pastatai Šanchajuje (Xiao et al., 2018b).....	15
2 pav. Daugiabutis gyvenamasis namas (Lendager group, 2018)	16
3 pav. Daiktų saugykla (Lendager Group, 2015)	16
4 pav. Muziejus Ciuriche (David Chipperfield Architects, 2008).....	16
5 pav. ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal jų rūšį (Eurostat, 2018b).....	18
6 pav. ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal ekonominės veiklos rūšį (Eurostat, 2018a)	18
7 pav. Standartinio betono mišinio sudėtis	20
8 pav. Natūralių ir perdirbtų betono užpildų gavimo schema (pagal Jian et al., 2021).....	20
9 pav. Perdirbto betono užpildo mezo-struktūra (Xiao et al., 2012)	21
10 pav. Tankio priklausomybė nuo perdirbto betono kiekio (Topçu & Şengel, 2004).....	22
11 pav. Gniuždomojo betono stiprio priklausomybė nuo perdirbto betono kiekio bandinyje (Topçu & Şengel, 2004)	22
12 pav. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo perdirbto betono kiekio bandinyje (Topçu & Şengel, 2004)	23
13 pav. Betono gniuždomasis stipris (Maruyama et al., 2004)	23
14 pav. Betono su perdirbtais užpildais, fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybė nuo v/c (Li et al., 2022)	24
15 pav. Tamprumo modulio kaita nuo vandens ir cemento santykio bei naudojamų užpildų tipo (Maruyama et al., 2004).....	25
16 pav. Įtempių ir deformacijų kreivės priklausomybė nuo perdirbto betono užpildų kiekio (Breccolotti et al., 2015)	27
17 pav. Įtempių ir deformacijų kreivės a) 50 % perdirbtų užpildų, b) 100 % perdirbtų užpildų (Martínez-Lage et al., 2012).....	28
18 pav. Įtempių-deformacijų kreivė, kai v/c santykis lygus 0.65 (Belén et al., 2010).....	28
19 pav. Įtempių-deformacijų kreivė, kai v/c santykis lygus 0.65 (Belén et al., 2010).....	28
20 pav. Pleišėjimo charakterio atvaizdavimas paprastojo betono ir betono sijoje, su perdirbtais smulkiaisiais užpildais (Sato et al., 2007).....	30
21 pav. Nesupleišėjusio skerspjuvio schemas: a) nesupleišėjęs skerspjuvis b) deformacijų schema c) įtempių schema	33
22 pav. Supleišėjusio skerspjuvio schemas: a) supleišėjęs skerspjuvis b) transformuotas supleišėjęs skerspjuvis c) deformacijų schema d) įtempių schema.....	36
23 pav. Viena koncentruota apkrova apkrautos sijos schema	37
24 pav. Plyšių vystymosi, pasiekus ir viršijus pleišėjimo momentą, grafinis atvaizdavimas, siją apkrovus viena koncentruota apkrova	37

25 pav. Skerspjūvio inercijos momento priklausomybė nuo lenkimo momento	40
26 pav. Įlinkio priklausomybė nuo lenkimo momento.....	40
27 pav. Konstrukcijų analizės įtempių ir deformacijų priklausomybės scheminis atvaizdas (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005)	44
28 pav. Dviem koncentruotomis apkrovomis apkrautos sijos schema.....	46
29 pav. Plyšių vystymosi, pasiekus ir viršijus pleišėjimo momentą, grafinis atvaizdavimas, siją apkrovus dviem koncentruotomis apkrovomis.....	47
30 pav. Lenkiamos sijos modelis skaičiavimams 1 metodu.....	50
31 pav. Lenkiamos sijos bandinys (Hamad et al., 2018).....	50
32 pav. Lenkiamos sijos bandinys su vienu sluoksniu armatūros (Knaack & Kurama, 2015)	50

LENTELIŲ SARAŠAS

1 lentelė. Teisiniai dokumentai apibrėžiantys perdirbto betono naudojimą (pagal Vintimilla & Etxeberria, 2023).	17
2 lentelė. Tamprumo modulis naudojamas konstrukcijų projektavimui (matavimo vienetai 10^4MPa) (Xiao et al., 2018b).....	26
3 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Breccolotti et al., 2015).....	52
4 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Martínez-Lage et al., 2012).....	53
5 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (matavimas tenzodavikliais)	54
6 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (poslinkių jutikliais)	56
7 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (matavimas tenzodavikliais)	58
8 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (poslinkių jutikliais)	60
9 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (Knaack & Kurama, 2015)	62
10 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (Hamad et al., 2018)	63
11 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Breccolotti et al., 2015).....	65
12 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Martínez-Lage et al., 2012).....	66
13 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c - 0.5$ (Belén et al., 2010)....	67
14 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c - 0.65$ (Belén et al., 2010)..	68
15 lentelė. Įlinkio palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6M_y$, M_y (Breccolotti et al., 2015).....	69
16 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Martínez-Lage et al., 2012).....	70
17 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c - 0.5$ (Belén et al., 2010).....	71
18 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c - 0.65$ (Belén et al., 2010).....	72
19 lentelė. Inercijos momentų-lenkimo momentų palyginimas (Breccolotti et al., 2015),(Martínez-Lage et al., 2012)	73
20 lentelė. Inercijos momentų-lenkimo momentų palyginimas (Belén et al., 2010).....	74

IVADAS

Pastaraisiais metais vis dažnėja klimato kaitos padarinių. Daugėja stichinių nelaimių, miško gaisrų, potvynių, sausrų ir kitų besikeičiančio klimato efektų. Globali temperatūra 2016 m. ir 2020 m. siekė 1,0°C didesnę temperatūrą, nei nuo prieš industrializaciją matuota temperatūra (NASA/GISS, 2022). Klimato kaita gali sukelti skubią ir potencialiai nepakeičiamą grėsmę žmonijai ir planetai (Allen et al., 2018). Dėl šių priežasčių 2015 m. gruodžio mėn. didžioji dalis pasaulio šalių pasirašė Paryžiaus klimato sutartį su tikslu apriboti globalinę temperatūrą iki 1,5°C aukštesnės, nei prieš-industrinių laikų (Allen et al., 2018).

Tam, kad būtų išvengta šių pokyčių, turime daryti kuo daugiau veiksmų siekdami mažinti ir neleisti toliau didėti globaliai temperatūrai. Jos didėjimas yra veikiamas reiškinių, vadinamo šiltnamio efektu. Globalinį atšilimą sukelia atmosferinės dujos (anglies dioksidas, metanas ir kt.), kurių didžioji dalis susidaro nuo žmonių veiklos. Šios dujos vadinamos šiltnamio efektą sukeliančiomis dujomis, nes jos sugeria patenkančius į atmosferą ir žemės paviršių šildančius saulės spindulius, tačiau šios dujos taip pat ir sulaiko šią nuo žemės paviršiaus atsispindėjusią šilumą (Ma, 1998). Siekiant sumažinti poveikį klimatui būtina atsižvelgti į galimybes sumažinti šiltnamio dujų kiekį atmosferoje.

Statybos sektoriuje cemento gamyba ir betono užpildų gavyba yra viena daugiausiai anglies dvideginio (CO₂) išskiriančių sričių (IEA, 2008).

Poveikis klimatui nėra vienintelė problema, su kuria susiduria betono gamybos pramonė. Kiti išskylantys iššūkiai yra riboti natūralių užpildų ištekliai ir atsirandantis jų trūkumas, kasybos poveikis kraštovaizdžiui, augalijai ir gyvūnijai. Be to daug statybos ir griovimo atliekų yra dažniausiai išmetamos. Toks atliekų išmetimas taip pat turi neigiamą poveikį aplinkai. Vienas iš galimų būdų sumažinti poveikį aplinkai bei sunaudoti statybos ir griovimo atliekas yra naudoti perdirbto betono užpildus pakartotinei betono gamybai.

Tyrimai šia tema prasidėjo dar 1919 m., kai Pirmojo pasaulinio karo metais susidarė daug betono atliekų ir reikėjo rekonstruoti daug statinių (Xiao et al., 2018, cit. iš De Vries, 1919). Po to sekantis Antrasis pasaulinis karas taip pat paliko daug sugriuvusių pastatų ir betono atliekų. Tokie tyrimai taip pat yra aktualūs Japonijoje bei kitose šalyse su ribotais atliekų laikymo plotais.

Betono atliekų, kaip užpildo, naudojimas įrengiant kelius ir grindinius yra dažna praktika, tačiau perdirbto betono panaudojimas statybinėse konstrukcijose vis dar yra retas. Visgi didėjant mokslinių tyrimų kiekiui, betonas su perdirbtais užpildais yra aprašomas standartais ir jo naudojimas dažnėja. Tokie standartai yra kuriami Japonijoje, Kinijoje, Vokietijoje ir kitose šalyse (standartai pateikti 1 lentelėje).

Lietuvoje standarto, apibrėžiančio betono su perdirbtais užpildais naudojimą, nėra. Vis dėlto problematika išlieka itin aktuali. Šalies ekonomikai gerėjant bei sparčiai plečiantis statybų sektoriui

statybinių atliekų tik daugėja (Lietuvos Respublikos Vyriausybė, 2022). Paminėtina, kad daugiausia statybinių atliekų susidaro griauinant statinius, mažesnę dalį sudaro rekonstravimo, remonto ir naujos statybos metu susidarančios atliekos (Lietuvos Respublikos Vyriausybė, 2022).

Taigi, siekiant patenkinti didėjančią betono paklausą ir dalinai išspręsti kylančias aplinkosaugines problemas, betono gamybai vietoje naujai išgaunamų užpildų galima naudoti perdirbtas medžiagas. Šiame darbe bus nagrinėjamas betono, kaip perdirbto užpildo, naudojimas gelžbetoninėse sijose.

Pirmame skyriuje apžvelgiama literatūra šia tema, antrame – laikomosios galios ir įlinkio skaičiavimų metodika, trečiame – atliekama rezultatų analizė, tada pateikiamos išvados bei priedai.

Darbo problemos – cemento gamybos įtaka klimato kaitai, gamtinių išteklių ribotumas bei statybose ir griovime susidarančių atliekų kaupimasis.

Darbo objektas – gelžbetoninės sijos su skirtingais perdirbto betono, kaip užpildo, kiekiais.

Darbo tikslas – pagal kitų autorių tyrimus palyginti sijų, pagamintų iš betono su perdirbtomis betono užpildais, stiprį ir įlinkį su sijų, pagamintų iš paprasto betono sijomis stipriu ir įlinkiu.

Uždaviniai:

- išnagrinėti esamus mokslinius tyrimus šia tema;
- nustatyti perdirbto betono mechaninius parametrus (gniuždomasis, tempiamasis stipris, tamprumo modulis) pagal kitų autorių atliktus tyrimus;
- apskaičiuoti sijų laikomąją galią ir įlinkį naudojant tyrimuose pateiktas įtempių-deformacijų kreives;
- naudojant įtempių-deformacijų kreives iš mokslinių tyrimų apskaičiuoti įlinkį pagal Eurokodą 2 (toliau - EC2) (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) ir nustatyti jo vystymosi charakterį;
- apskaičiuoti sijų laikomąją galią ir įlinkį naudojantis EC2 įtempių ir deformacijų kreive;
- apskaičiuoti įlinkį naudojant EC2 ir ACI-318 (American Concrete Institute, 2011) normatyvas;
- atlikti momento-įlinkio grafiko ir jo reikšmių palyginimą pagal atliktus skaičiavimus visais minėtais būdais;
- išnagrinėti perdirbto betono užpildų kiekio įtaką gelžbetoninės konstrukcijos laikomajai galiai;

Metodika – pirmoje skaičiavimų dalyje (A priedas) įlinkio skaičiavimai atliekami naudojant EC2 ir ACI-318 normatyvuose aprašytas metodikas, laikomoji galia apskaičiuojama naudojant tyrimuose pateiktas įtempių-deformacijų kreives, antroje skaičiavimų dalyje (B priedas) skaičiavimai atliekami naudojant tas pačias normas, tik laikomoji galia apskaičiuojama pritaikant EC2 įtempių ir deformacijų kreivę.

Naujumas ir praktinis pritaikomumas – šiame darbe yra analizuojami ir lyginami mokslinių tyrimų ir EC2 bei ACI-318 metodikomis apskaičiuotos laikomosios galios, vertinama ar galima naudojant esamas normas projektuoti perdirbto betono užpildus.

1 BETONO SU PERDIRBTAIS UŽPILDAIS LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Betono, pagaminto su perdirbtais užpildais, pritaikymas statyboje

Didžioji dalis betono atliekų yra panaudojamos kaip užpildai keliams, atraminėms sienoms, tai nereikalauja didelio atsparumo, lyginant su konstrukciniu betonu (Maruyama et al., 2004). Visgi pagal EC2 perdirbto betono užpildai gali būti naudojami įprastam betonui gaminti, be papildomo sutikimo, jei yra laikomasi A tipo perdirbtų užpildų reikalavimų, nurodytų EN 206 standarte (Vintimilla & Etxeberria, 2023).

Mokslininkas Xiao ir kt. savo tyrimuose rašė, kad su tinkamomis betono mišinio proporcijomis betonas su perdirbto betono užpildais, gali pasiekti tokį pat gniuždomąjį stiprį kaip ir betonas su natūralias užpildais (Xiao et al., 2018b). Tai rodo, kad perdirbtų užpildų betonas gali pakeisti natūralių užpildų betoną. Tą jis įrodė ir suprojektuodamas 12 aukštų pastatą iš betono, su perdirbtais užpildais. Šis pastatas buvo suprojektuotas taip, kad būtų identiškas kitam pastatui, pagamintam iš betono be perdirbtų užpildų (žr. 1 pav.).

Tai nėra vienintelis pastatas, pastatytas naudojant perdirbtus betono užpildus. Keletas pavyzdžių pateikiami paveiksluose (žr. 2 pav.-4 pav.)

Betono, pagaminto iš perdirbtų betono, naudojimas yra aktualus. Dėl šios priežasties daugelyje šalių tokio betono naudojimui yra sukurti standartai, numatantys galimus natūralių užpildų pakeitimus į perdirbto betono užpildus kiekius (žr. 1 lentelė).



1 pav. Du identiški pastatai Šanchajuje (Xiao et al., 2018b)



2 pav. Daugiabutis gyvenamasis namas (Lendager group, 2018)



3 pav. Daiktų saugykla (Lendager Group, 2015)



4 pav. Muziejus Ciuriche (David Chipperfield Architects, 2008)

1 lentelė. Teisiniai dokumentai apibrėžiantys perdirbto betono naudojimą (pagal Vintimilla & Etxeberria, 2023).

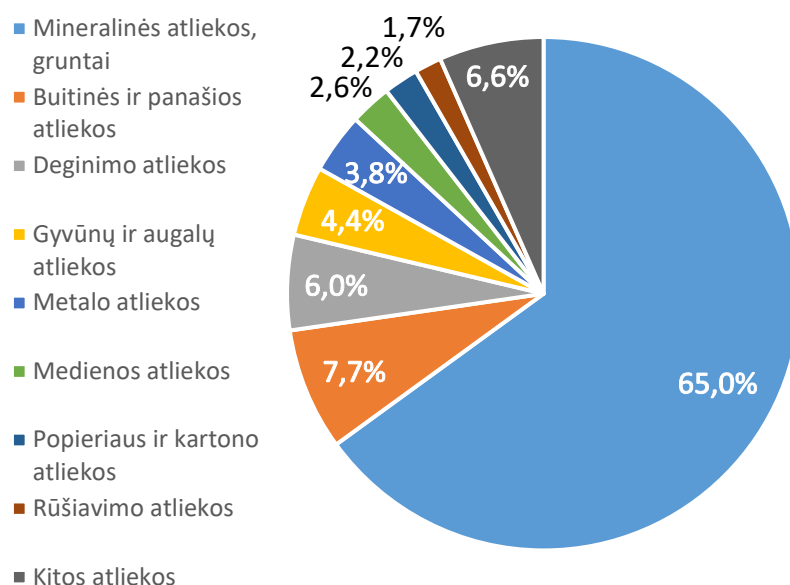
Šalis ir standartas	Užpildų tipas A	Maksimalus užpildų pakeitimas (%)	Frakcija	Betono klasė	Tankis (kg/m ³)	Igeriamumas (%)
Ispanija Konstrukcinio betono kodas (SC-BOE)	RCA	20	CRCA	C40/50	-	7
Belgija PTV 406-2003/NBN B 15-001	RCA	50,30,20*		C30/37	2100	9
Italija NTC-2008	RCA 1	30	CRCA	C30/37	-	-
		60		C25/30		
	RCA 2	15		C45/55		
Portugalija LNEC - E471	RCA 1	25	CRCA	C40/50	2200	7
Prancūzija NP-545	RCA 1	60,30,20	CRCA	Nėra ribojimų	–	–
	RCA 2	40,15				
Šveicarija MB-2030	RCA 1	100	CRCA	Lauko sąlygomis $\geq 25/30$	–	–
Kinija GB/T-2573	RCA-Tipas 1	100	CRCA	Nėra ribojimų	2450	3
	RCA- Tipas 2	30	CRCA	C40/50	2350	5
	RCA- Tipas 3	30	CRCA	C25/30	2250	8
	RCA- Tipas 1	100	FRCA	C40/50	2450	3
	RCA- Tipas 2	30	FRCA	C25/30	2350	5
Didžioji Britanija BS 8500-2	RCA	20	CRCA + FRCA	C40/50	2200	–
Japonija JIS- 5021/JIS-5022	RCA-HQ	100	CRCA + FRCA	C45/55	2500	3(C)3.5(F)
	RCA-MQ	100	CRCA + FRCA	C35/45	2300(C)2 200(F)	5(C)7(F)
Danija DS 2426/DCA No.34	RCA 1	100	CRCA	C40/50	2200	netaikoma
	RCA 2	100	CRCA + FRCA	C40/50	2200	netaikoma
UNE EN 206	RCA	50,30	CRCA	Nėra ribojimų	–	–
UNE EN 206 (pakeitimai ateityje)	RCA	60,50,40,30	CRCA	Nėra ribojimų	–	–
		30,20,10	FRCA		–	–

Pastabos: pateiktos reikšmės yra perdirbto betono užpildams. HQ – geros kokybės, MQ – vidutinės kokybės, RCA – perdirbto betono užpildai, CRCA – stambieji perdirbto betono užpildai, FRCA – smulkieji perdirbto betono užpildai.

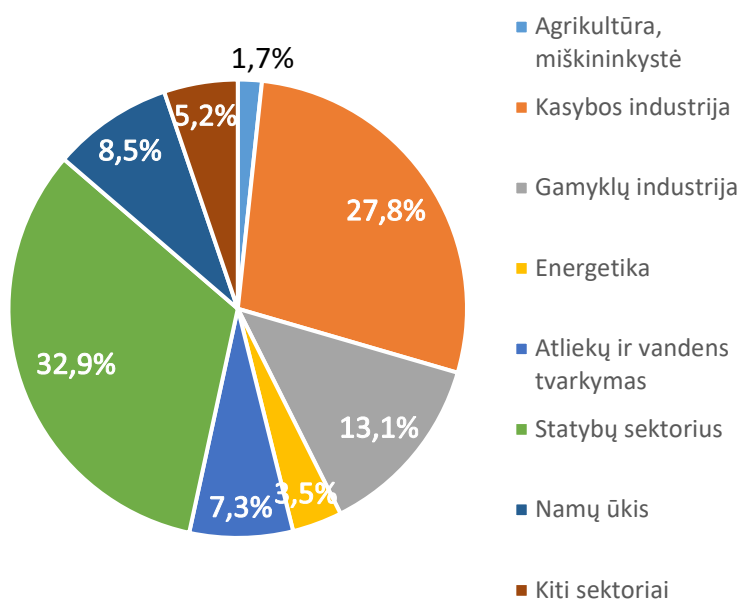
Visi standartai nurodyti lentelėje yra taikomi konstrukciniam betonui. *Pakeitimo procentas priklauso nuo aplinkos klasės.

1.2 Perdirbtų užpildų susidarymas

Statybinių atliekų susidarymas yra opi problema Europos Sąjungoje (toliau ES). „Eurostat“ statistika tai taip pat patvirtina. Pirmoje skritulinėje diagramoje (žr. 5 pav.) matyti, kad didžioji dalis (65 %) visų atliekų yra mineralinės kilmės. Antroje diagramoje (žr. 6 pav.) matoma, kad net 33 % atliekų yra sukuriamos statybos sektoriuje, o 28 % kasimo industrijoje. Kartu abi šios ekonominės veiklos sukuria 61 % visų ES atliekų.



5 pav. ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal jų rūšį (Eurostat, 2018b)



6 pav. ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal ekonominės veiklos rūšį (Eurostat, 2018a)

Statybų ir griovimo atliekos susidaro visuose pastato gyvavimo cikluose: statybų, renovacijos bei griovimo (da Rocha & Sattler, 2009). Mokslininkė Vivijana Tam ir jos kolegos įvardino kaip ir kokios statybų ir griovimo atliekos gali susidaryti (Tam et al., 2018):

Statybinės atliekos susidaro:

- *Dėl per didelio atliekamo kiekio statybinių medžiagų;*
- *pažeistų medžiagų, konstrukcijų (nebetinkamos naudojimui statybose);*
- *nupjautos medžiagų dalys;*
- *darbo procesų atliekos (plovimo dulkės, metalo drožlės);*
- *klojinių atliekos;*
- *sunaudotų įrankių;*
- *pakavimo ir kitos atliekos, sugeneruotos žmonių dirbančių statybų aikštelėse.*

Griovimo atliekos gali būti:

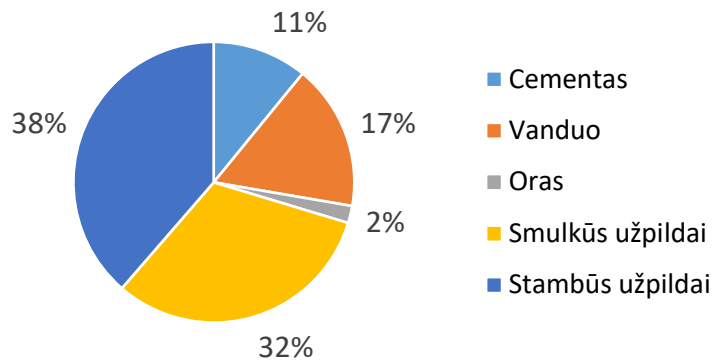
- *statinių, tiltų, kelių griovimo arba renovacijos metu susidarančios atliekos;*
- *griūčių, sukeltų veikiant stichinėms nelaimėms (žemės drebėjimams, uraganams, cunamiams), civiliniams konfliktams, vandalizmui, sprogamams, gaisrams ir silpnų konstrukcijų griūtims.*

Statybinių ir griovimo atliekos gali būti iš šių medžiagų:

- *Betono;*
- *Plytų, plytelių, keramikos;*
- *Stiklo;*
- *Plastiko;*
- *Bitumų;*
- *Metalų;*
- *Gruntų ir akmenų;*
- *Šiltinimo medžiagų;*
- *Gipsinių medžiagų;*
- *Elektronikos ir elektros prietaisų atliekos;*
- *Cheminės medžiagos;*
- *Pakavimo medžiagos;*
- *Pavojingos atliekos.*

1.3 Betono užpildų gavyba

Betonas susideda iš trijų pagrindinių komponentų: užpildo, rišamosios medžiagos ir vandens. Skritulinėje diagramoje (žr. 7 pav.) galima matyti, kad didžiąją dalį (apie 70 %) betono sudaro užpildai.

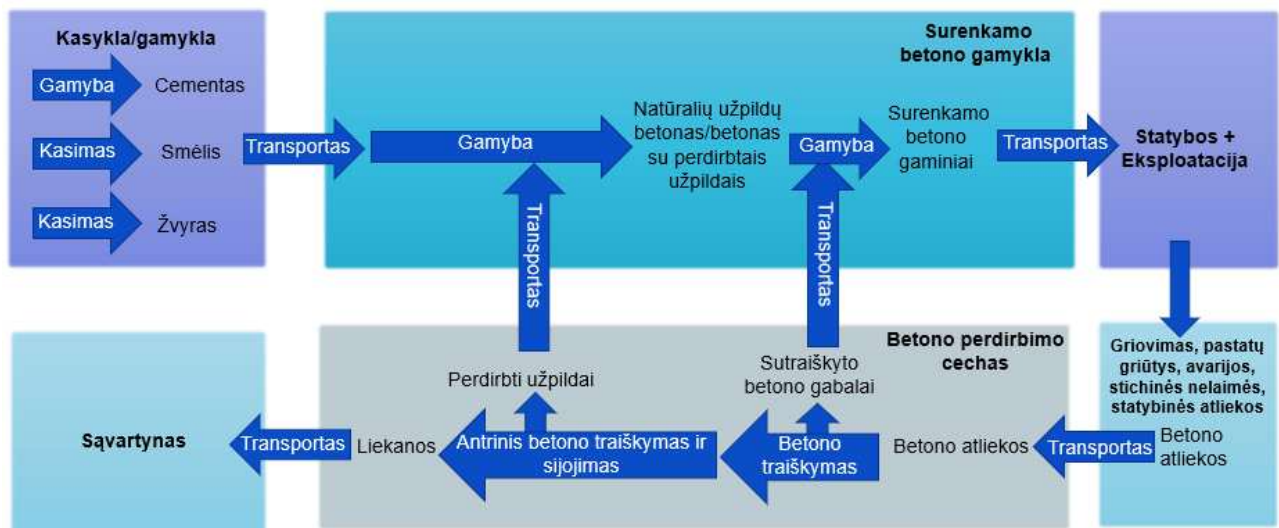


7 pav. Standartinio betono mišinio sudėtis

Natūralūs užpildai gaunami įprastiniu būdu: smėlis, žvyras ir cementui reikalingos medžiagos kasamos, gaminamas cementas ir tada šios medžiagos yra transportuojamos į gamyklą, kur pagaminamas betonas ir (arba) surenkami gelžbetonio elementai ir tuomet jie keliauja į statybas ir vėliau pastatai, pastatyti naudojant tokias medžiagas/gaminius, yra eksploatuojami.

Perdirbtų užpildų gavimo būdas atitinka žiedinės ekonomikos principus. Šie užpildai gaunami, kai betono atliekos yra sutraiskomos iki reikiamos frakcijos, sijojamos ir tada jos yra transportuojamos į gamyklą, kur pagaminamas perdirbtas betonas ir (arba) surenkami gelžbetonio elementai. Šie produktai tada yra vežami į statybas. Vėliau iš tokių konstrukcijų pagaminti pastatai yra eksploatuojami. Likusios po visų traiškymo ir sijojimo procesų liekanos yra vežamos į sąvartyną.

Natūralių ir perdirbtų užpildų gavimo schema atvaizduota 8 pav.

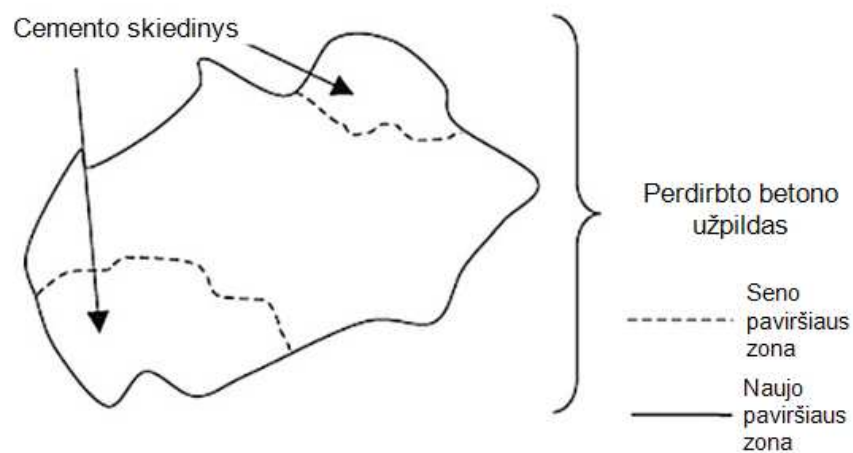


8 pav. Natūralių ir perdirbtų betono užpildų gavimo schema (pagal Jian et al., 2021)

1.4 Betono užpildų kokybė

Perdirbto betono užpildo panaudojimas, kaip statybinėse konstrukcijose naudojamo užpildo, dėl jame esančių didelių prilipusio cementinio skiedinio kiekių (žr. 9 pav.) lemia prastesnės kokybės betoną (Sato et al., 2007). Tokį betono kokybės pokytį lemia prie perdirbto užpildo prilipęs skiedinys, kuris turi daugiau porų ir gali sugerti daugiau vandens, nei įprastas užpildas.

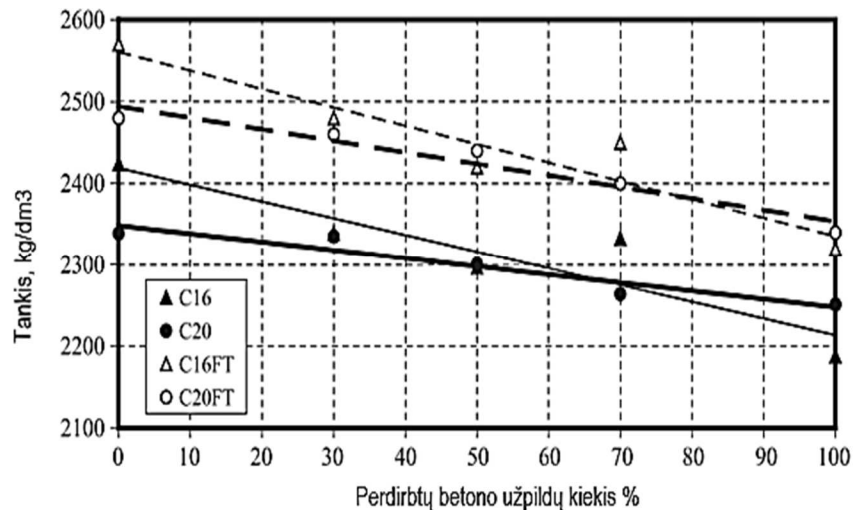
Perdirbtas stambusis užpildas laikomas esantis aukštos kokybės, kai kiek įmanoma daugiau cementinio skiedinio yra pašalinta (Sato et al., 2007). Visgi toks kokybiško betono užpildo pagaminimo būdas yra brangus, reikalauja daug energijos ir sukuria poreikį surasti būdus pašalintam skiediniui panaudoti (Sato et al., 2007).



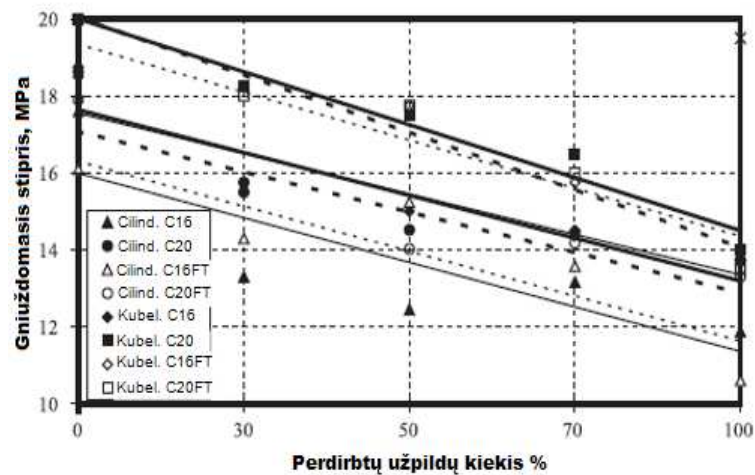
9 pav. Perdirbto betono užpildo mezo-struktūra (Xiao et al., 2012)

1.5 Skirtingų perdirbto betono užpildų kiekių įtaka betono savybėms

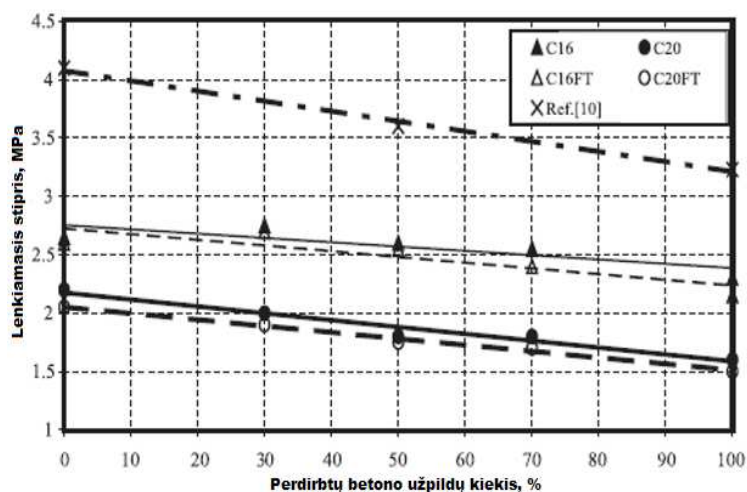
Tyrėjai Topçu ir Şengel (Topçu & Şengel, 2004) tyrė įvairius betono parametrų priklausomybę nuo perdirbto betono kiekio. Savo tyrimais jie nustatė, kad naudojant didesnę kiekį perdirbtų užpildų betono tankis mažėja, todėl pagamintas gaminys bus lengvesnis (žr. 10 pav.). Iš 11 pav. galima matyti, kad gniuždomasis stipris mažėja didinant perdirbtų užpildų kiekį. Lenkiamasis stipris taip pat seka tokią pat tendenciją kaip ir prieš tai minėti du parametrai (žr. 12 pav.).



10 pav. Tankio priklausomybė nuo perdirbto betono kiekio (Topçu & Şengel, 2004)

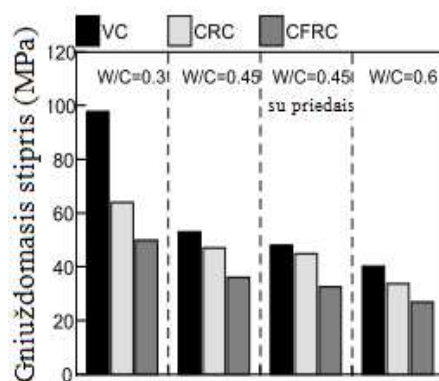


11 pav. Gniuždomojo betono stiprio priklausomybė nuo perdirbto betono kiekio bandinyje (Topçu & Şengel, 2004)



12 pav. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo perdirbtų betono kiekio bandinyje (Topçu & Şengel, 2004)

Tyrėjo Maruyama'os ir jo kolegų (Maruyama et al., 2004) atliktame tyrime buvo įvertinta betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų tipo ir vandens/cemento kiekio. Iš šio tyrimo duomenų matyti, kad į betono mišinį įdėjus bet kokių perdirbtų betono užpildų betono gniuždomasis stipris mažėja. Gniuždomasis stipris yra mažiausias naudojant ir stambius ir smulkius perdirbtus užpildus vietoje natūralių užpildų. Šios tendencijos pavaizduotos 13 pav.

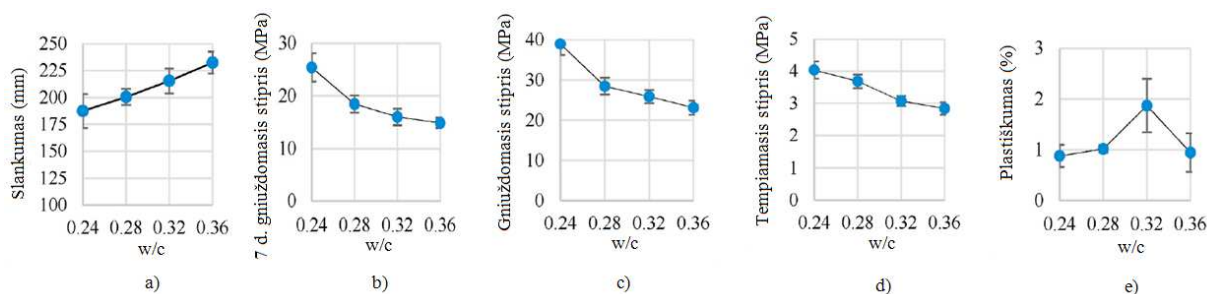


Pastabos: čia W/C – vandens/cemento santykis, VC – betonas su natūraliais užpildais, CRC – betonas su stambiais perdirbtomis užpildais, CFRC – betonas su smulkiais ir stambiais perdirbtomis užpildais

13 pav. Betono gniuždomasis stipris (Maruyama et al., 2004)

1.6 Vandens – cemento kiekio įtaka

Pagal atliktus mokslininkų tyrimus (Li et al., 2022) buvo įvertinti įvairūs parametrai, kuriuos keičiant, buvo stebima kokių efektus šie parametrai sukels šviežio ir sukietėjusio betono savybėms. Vienas iš tirtų betono parametrų buvo vandens/cemento (toliau v/c) santykis. Iš 14 pav. galima matyti, kad didinant vandens kiekį slankumas didėja. Pastebėta, kad mažinant šį santykį (t. y. naudojant didesnę cemento ir mažesnę vandens kiekį mišinyje) betono, su perdirbtais užpildais, mechaninės savybės yra geresnės (gniuždomasis ir tempiamasis stipris yra didesni). Betono sijos plastiškumas auga didėjant vandens kiekiui iki tam tikro lygio, tada plastiškumas pradeda mažėti.



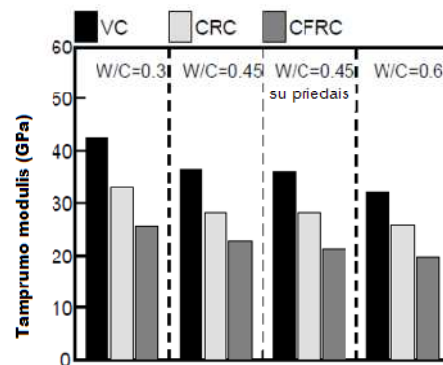
Pastaba: čia w/c – vandens/cemento santykis

14 pav. Betono su perdirbtais užpildais, fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybė nuo v/c (Li et al., 2022)

Ta pati tendencija, matoma ir mokslininko Maruyama'os ir jo kolegų tyrime (Maruyama et al., 2004). Šiame tyrime mokslininkas pastebi, kad betono su perdirbtais užpildais gniuždomasis stipris yra kontroliuojamas taip pat kaip ir paprastojo betono, keičiant vandens/cemento santykį (žr. 13 pav.).

Pasak mokslininkų, perdirbtas betonas pasižymi mažesniu gniuždomuoju stipriu, dėl didelio perdirbto betono užpildų porėtumo, dėl kurio perdirbto betono užpildas gali sugerti daugiau vandens. Todėl gniuždomasis stipris gali būti aprašytas naudojant priklausomybę nuo viso vandens betone kiekio santykio su cemento mase (Sato et al., 2007 cit. iš Fumoto et. al. 2002).

Vandens/cemento santykio įtaka taip pat ryški ir tamprumo moduliui. Iš Maruyama'os ir jo kolegų (Maruyama et al., 2004) atlikto tyrimo (žr. 15 pav.), matoma, kad tamprumo modulis mažėja didinant šį santykį nepriklausomai nuo to ar betonai turi perdirbtų užpildų ar ne.



Pastabos: čia W/C – vandens/cemento santykis, VC – betonai su natūraliais užpildais, CRC – betonai su stambiais perdirbtais užpildais, CFRC – betonai su smulkiais ir stambiais perdirbtais užpildais

15 pav. Tamprumo modulio kaita nuo vandens ir cemento santykio bei naudojamų užpildų tipo (Maruyama et al., 2004)

1.7 Tamprumo modulis

Užpildai, turintys didesnę tamprumo modulį, padidina ir pačio betono tamprumo modulį (Maruyama et al., 2004). Tačiau perdirbto betono užpildai pasižymi mažesniu tamprumu negu natūralūs užpildai, todėl bendras tamprumo modulis mažėja (žr. 15 pav.). Šis parametras mažėja ir dėl to, kad betonas, su perdirbtais užpildais, turi daugiau cementinio skiedinio (Sato et al., 2007).

Betonas, pagamintas su perdirbtais užpildais, kaip nagrinėta mokslininko Xiao ir kt. tyrime, pasižymi mažesniu tamprumo moduliu, lyginant su tą pačią betono klasę turinčiu paprastuoju natūralių užpildų betonu (Xiao et al., 2018b). Šios reikšmės atvaizduotos 2 lentelėje, konstrukcijų projektavimui buvo pasirinkta naudoti mažesnes, nei gautas bandymų metu, reikšmes, dėl nepakankamų mokslinių tyrimų perdirbtų užpildų naudojimo realiose pastatų konstrukcijose.

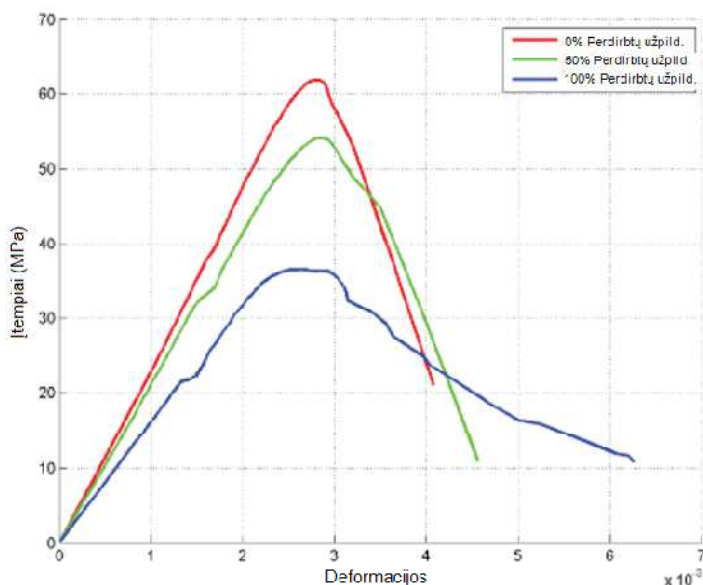
2 lentelė. Tamprumo modulis naudojamas konstrukcijų projektavimui (matavimo vienetai 10^4MPa) (Xiao et al., 2018b).

Betono klasė	RAC			NAC		
	RAC30	RAC40	RAC50	C30	C40	C50
Bandymų metu gauta reikšmė	3.51	3.61	4.19	3.66	3.76	4.38
Projektavimui naudota reikšmė	2.70	2.92	3.10	3.00	3.25	3.45
Pastaba: čia RAC – perdirbtų užpildų betonas, NAC - natūralių užpildų betonas.						

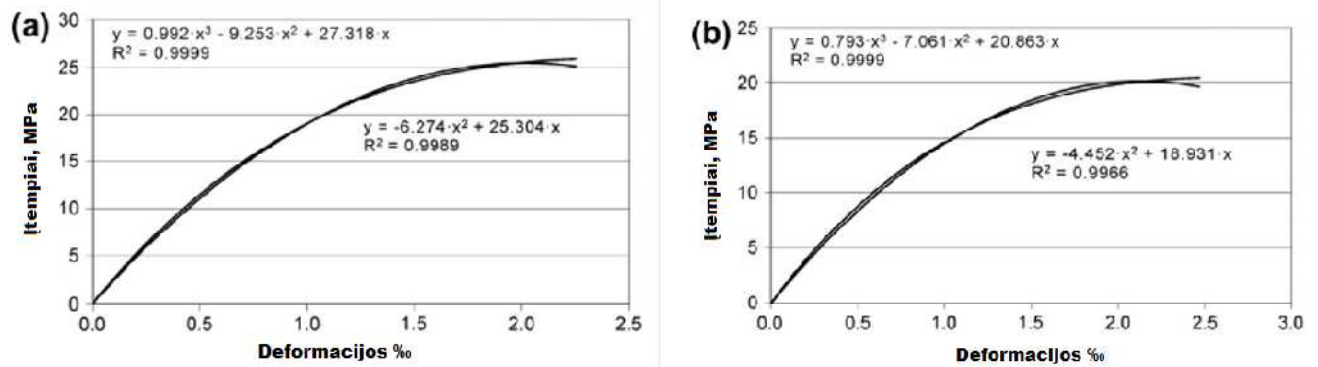
1.8 Įtempių ir deformacijų kreivė

Mokslininkai Breccolotti ir kt. (Breccolotti et al., 2015), Martinez-Lage ir kt. (Martínez-Lage et al., 2012), ir Belén ir kt. (Belén et al., 2010) tyrė kaip keičiant betono užpildų kiekį, keičiasi įtempių ir deformacijų kreivė. Iš 16 – 19 pav. matoma, kad didinant perdirbto betono užpildų kiekį deformacijos betone yra didesnės prie mažesnių įtempių, nei lyginant su paprastuoju betonu. Šiose kreivėse taip pat galima pastebėti, kad perdirbto betono bandiniai pasiekia mažesnę gniuždomąją betono stiprį. Kuo daugiau naudojama perdirbtų užpildų, tuo mažesnis gniuždomasis stipris. Iš 16 pav. galima matyti, kad pakeitus 50 % natūralių užpildų perdirbtais, betono gniuždomasis stipris sumažėja 13 %, o pakeitus 100 % užpildų stipris sumažėja drastiškai apie 43 %. Iš šių duomenų galima daryti prielaidą jog, naudojant perdirbtus užpildus vietoje dalies natūralių užpildų iki tam tikro lygio betono savybės kinta nedaug, todėl galima perdirbtą betoną naudoti statybinėms konstrukcijoms, taikant perdirbto betono užpildų kiekio betono mišinyje ribojimus.

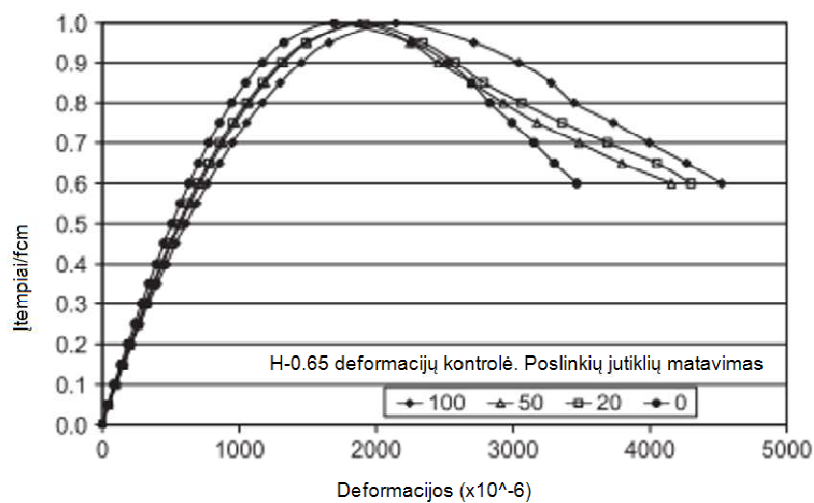
Šios kreivės (žr. 16 - 19 pav.) toliau naudojamos laikomosios galios ir įlinkio skaičiavimui bei palyginimui su šiomis reikšmėmis, apskaičiuotomis pritaikant normatyvinių dokumentų EC2 (nuoroda) ir ACI-318-M (nuoroda) skaičiavimo metodikas. Šios metodikos aprašytos 2 skyriuje, gauti rezultatai pateikti 3 skyriuje, skaičiavimai pateikti A priede.



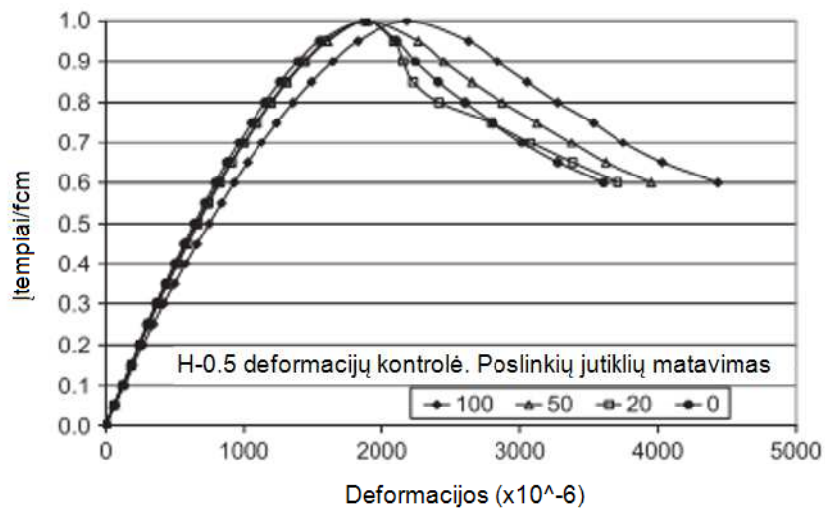
16 pav. Įtempių ir deformacijų kreivės priklausomybė nuo perdirbto betono užpildų kiekio (Breccolotti et al., 2015)



17 pav. Įtempių ir deformacijų kreivės a) 50 % perdirbtų užpildų, b) 100 % perdirbtų užpildų (Martínez-Lage et al., 2012)



18 pav. Įtempių-deformacijų kreivė, kai v/c santykis lygus 0.65 (Belén et al., 2010)



19 pav. Įtempių-deformacijų kreivė, kai v/c santykis lygus 0.65 (Belén et al., 2010)

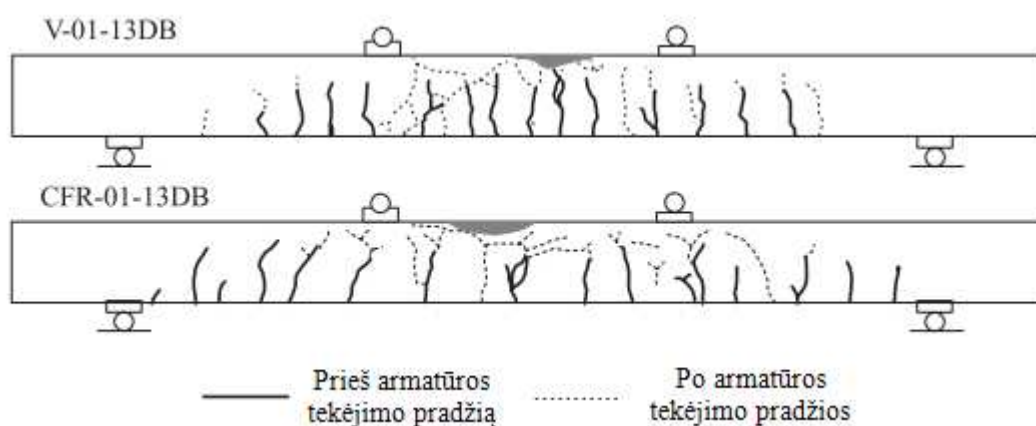
1.9 Įlinkis

Mokslininkų tyrimuose pastebima, kad sijos pagamintos iš betono su perdirbto betono užpildais prie tos pačios apkrovos pasiekia didesnę įlinkį, nei paprastojo betono sijos. Xiao kartu su kolegomis atliktame tyrime rašo, kad didesnis perdirbto betono sijų įlinkis, lyginant su paprastojo betono sijomis, parodo, kad perdirbto betono sijos yra mažesnio standumo, nei natūralaus betono sijos (Xiao et al., 2018b). Kadangi lenkiamasis standumas (EI) susideda iš tamprumo modulio (E) ir skerspjūvio inercijos momento (I), žinome, kad šis standumas keičiasi keičiantis tamprumo moduliui. Kuo mažesnis standumas, tuo didesnis yra įlinkis. Tamprumo modulis, kaip aprašyta 1.7 skyriuje, mažėja didinant perdirbtų užpildų kiekį, todėl mažėja ir sijos lenkiamasis standumas.

Xiao ir jo kolegos taip pat suprojektavo 12 aukštų pastatą (žr. 1 pav.), kuriame viso aukšto konstrukcijose, išskyrus pirmą aukštą (dėl seisminių reikalavimų), buvo naudojamos perdirbto betono konstrukcijos (Xiao et al., 2018b). Šis pastatas buvo analogiškas kitam pastatui, pagamintam iš betono su natūraliais užpildais. Perdirbto ir natūralių užpildų betono konstrukcijos buvo suprojektuojamos taip, kad pasiektų tą pačią betono klasę. Abiejuose pastatuose buvo matuojamas toje pačioje vietoje esančios sijos įlinkis. Perdirbto betono sijos pasiekė didesnę įlinkį, bet nors ir pasižymėdamos mažesniu standumu perdirbto betono sijos vis tiek atitiko įlinkio reikalavimus tinkamumo ribiniam būviui, nurodant maksimalų leidžiamą įlinkį $l/250$ (Xiao et al., 2018b).

1.10 Pleišėjimas

Pagal mokslininko Sato ir kt. (Sato et al., 2007) atliktus tyrimus lenkiamai perdirbto betono sijai, pastebėta, kad iškarto pasireiškiančių ir ilgalaikių plyšių plotis buvo nežymiai didesnis nei paprastojo betono sijose. Perdirbto betono su stambiais užpildais plyšio plotis buvo 0.57 - 1.37 karto, o perdirbto betono su smulkiais užpildais 0,74 – 1,26 karto plyšio pločio paprastojo betono sijose. Atstumas tarp plyšių taip pat buvo iki 1,3 karto didesnis sijose su stambiais perdirbtomis užpildais ir nuo 1,1 iki 1,7 karto didesnis perdirbto betono sijose su smulkiais užpildais, lyginant su atstumu tarp plyšių paprastojo betono sijose. Pleišėjimo charakteris parodytas 20 pav.



čia V-01-13DB – iš natūralių užpildų pagaminta betono sija, CFR-01-13DB – iš perdirbtų smulkiųjų užpildų pagaminta sija.

20 pav. Pleišėjimo charakterio atvaizdavimas paprastojo betono ir betono sijoje, su perdirbtomis smulkiaisiais užpildais (Sato et al., 2007)

Li ir kt. savo atliktame tyrime (Li et al., 2021) padarė išvadą, kad nors ir perdirbto betono sijos turėjo 20 % mažesnę atsparumą pleišėjimui, 15 % didesnę plyšio plotį ir 10 % didesnę sijos vidurio įlinkį, tokia pat laikomoji galia gali būti pasiekta sijose su perdirbto betono užpildais ir sijose be perdirbto betono užpildų.

1.11 Skyriaus išvados

Apžvelgus mokslinę literatūrą galima formuluoti tokias išvadas:

1. Betono su perdirbtais užpildais gniuždomąjį stiprį galima reguliuoti per vandens/cemento santykį;
2. Didėjant perdirbtų užpildų kiekiui betonas lengvėja;
3. Betono tamprumo modulis mažėja didinant perdirbtų užpildų kiekį;
4. Lenkiamasis ir gniuždomasis stipris mažėja didinant perdirbtų užpildų kiekį;
5. Didinant vandens/cemento santykį betono mišinyje betono, pagaminto iš perdirbtų betono užpildų, kaip ir betone su natūraliais užpildais, mažėja mechaninės savybės (gniuždomasis stipris, tempiamasis stipris, tamprumo modulis) ir didėja slankumas;
6. Ribojant perdirbto betono užpildų kiekį betone galima pasiekti panašias savybes kaip betono su natūraliais užpildais;
7. Didinant perdirbtų užpildų kiekį betone, lyginant su įprastiniu betonu, prie mažesnių įtempių pasiekiamos didesnės deformacijos;
8. Nors sijos, pagamintos iš betono su perdirbtais užpildais, linksta daugiau nei sijos be perdirbtų užpildų įmanoma suprojektuoti siją, kuri gali tenkinti tinkamumo ribinio būvio sąlygas;
9. Tam, kad betono su perdirbtais užpildais konstrukcija pasiektų tokį pat gniuždomąjį stiprį kaip įprasto betono konstrukcija, reikia didesnio kiekio cemento betono mišinyje;
10. Dažnu atveju sijose, pagamintose iš betono su perdirbtais užpildais, pasireiškus pleišėjimui atsiveria didesni plyšiai, ir atstumai tarp plyšių yra didesni. Nagrinėtuose mokslininkų tyrimuose perdirbto betono sijos plyšio plotis yra iki 1,15 - 1,37 karto didesnis nei įprastojo betono sijoje.

2 PERDIRBTO BETONO SIJOS LAIKOMOSIOS GALIOS IR ĮLINKIO SKAIČIAVIMO METODIKA

2.1 Perdirbto betono sijos laikomosios galios skaičiavimas.

Iš nagrinėjamų mokslinių straipsnių įtempių-deformacijų grafikų ištraukus duomenis gaunamos įtempių-deformacijų formulės. Jas taikydama apskaičiuoju parametrus (statinį momentą, grafiko figūros plotą, figūros svorio centrą, tamprumo modulį ir neutraliąją skerspjūvio ašį), reikalingus laikomajai sijos galiai ir įlinkiui nustatyti. Skaičiavimams parenkamas sijos skerspjūvis ir armavimas. Skaičiavimai pateikti A priede.

Laikomosios galios parametrų apskaičiavimas:

Statinis momentas apskaičiuojamas integruojant abi (kylančią ir krentančią) įtempių ir deformacijos kreives. Pointergralinė funkcija yra figūros esančios po kreive plotas, padaugintas iš ordinatės:

$$S_{\varepsilon.c} = \int_{\varepsilon_{c0}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_c)) \cdot \varepsilon_c d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{cu})) \cdot \varepsilon_{cu} d\varepsilon_{cu} , \quad (1)$$

čia ε_{c0} – betono deformacija, kuri yra lygi nuliui; ε_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis fc ; ε_{cu1} – ribinė gniuždomoji betono deformacija; ε_c – kylančios kreivės deformacijų reikšmės; ε_{cu} – krentančios kreivės deformacijų reikšmės; $\sigma_{c.c1}(\varepsilon_c)$ – įtempių reikšmės esant ε_c deformacijoms kylančioje kreivėje; $\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{cu})$ – įtempių reikšmės esant ε_{cu} deformacijoms krentančioje kreivėje.

Figūros, esančios po $\sigma - \varepsilon$ kreive, plotas:

$$A_{\varepsilon.c} = \int_{\varepsilon_{c0}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) d\varepsilon_{c.c2} , \quad (2)$$

čia ε_{c0} – betono deformacija, kuri yra lygi nuliui; ε_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis fc ; ε_{cu1} – ribinė gniuždomoji betono deformacija; ε_c – kylančios kreivės deformacijų reikšmės; ε_{cu} – krentančios kreivės deformacijų reikšmės; $\sigma_{c.c1}(\varepsilon_c)$ – įtempių reikšmės esant ε_c deformacijoms kylančioje kreivėje; $\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{cu})$ – įtempių reikšmės esant ε_{cu} deformacijoms krentančioje kreivėje.

Figūros svorio centras:

$$y_{c.c} = \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}}, \quad (3)$$

čia $S_{\varepsilon.c}$ – statinis momentas; $A_{\varepsilon.c}$ – figūros esančios po $\sigma - \varepsilon$ kreive plotas.

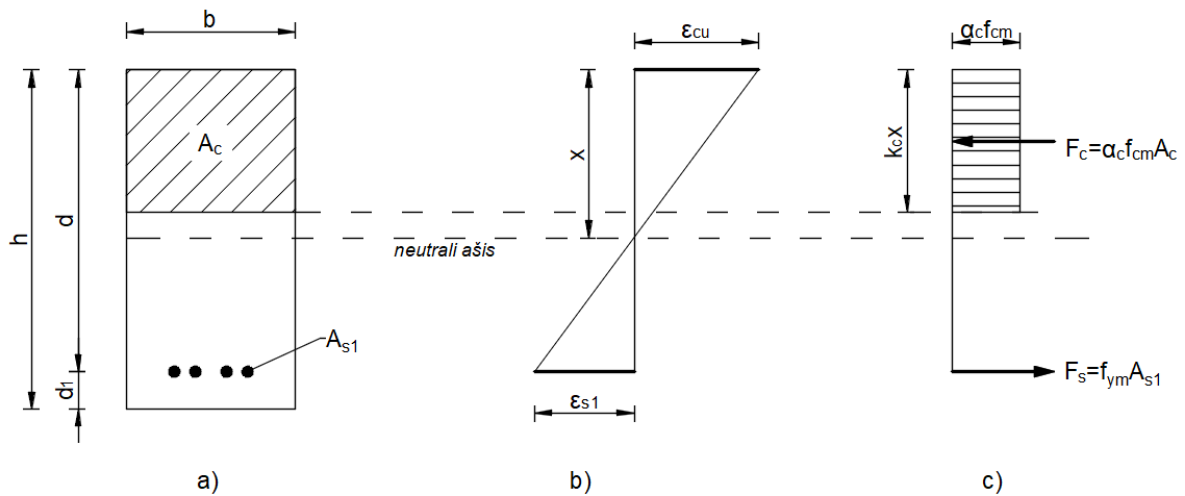
Kirstinis tamprumo modulis nustatomas, įtempių ir deformacijų kreivėje nubrėžiant liniją per nulinę įtempių reikšmę ir per įtempių reikšmę lygią $0,4f_{cm}$, ir imant šių linijų sudaryto kampo tangentą.

Kirstinis tamprumo modulis:

$$E_{cm} = \tan \alpha = \frac{0,4f_{cm}}{\varepsilon_{c.Ecm}}, \quad (4)$$

čia f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; $\varepsilon_{c.Ecm}$ – deformacija esanti ties $0,4f_{cm}$ įtempių reikšme.

Neutraliosios ašies apskaičiavimas



21 pav. Nesupleišėjusio skerspjūvio schemas: a) nesupleišėjęs skerspjūvis b) deformacijų schema c) įtempių schema

Šios ašies padėtis apskaičiuojama iš jėgų esančių betone ir armatūroje pusiausvyros $F_s=F_c$ (žr. 21 pav.):

$$F_s = f_{ym} \cdot A_{s1}, \quad (5)$$

$$F_c = \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_I, \quad (6)$$

čia F_s – jėga esanti armatūroje; F_c – jėga esanti betone; α_c – koeficientas įvertinantis įtempių lygį; f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; f_{ym} – vidutinis armatūros takumo stipris; A_{s1} – armatūros plotas; b – elemento plotis; x_I – nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis.

Sulyginus (5) ir (6) formules gaunama neutralios ašies padėties lygtis:

$$x_I = \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}, \quad (7)$$

čia f_{ym} – vidutinis armatūros takumo stipris; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas; α_c – koeficientas įvertinantis įtempių lygį; f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; b – elemento plotis.

Laikomoji galia:

$$M_R = \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_I \cdot (d - k_c \cdot x_I), \quad (8)$$

čia α_c – koeficientas įvertinantis įtempių lygį; f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; b – elemento plotis; x_I – nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; d – efektyvusis skerspjūvio aukštis; k_c – koeficientas, apskaičiuojamas taip:

$$k_c = \frac{\varepsilon_{cu1} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu1}}, \quad (9)$$

čia ε_{cu1} – ribinė gniuždomoji betono deformacija; $y_{c.c}$ – figūros svorio centras.

2.2 Pleišėjimo momento apskaičiavimas

Vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris

Kai betono klasė $\leq C50/60$:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}, \quad (10)$$

čia f_{ck} – cilindrinis charakteristinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris.

Kai betono klasė $> C50/60$:

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)\right], \quad (11)$$

čia f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris.

Vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris lenkiant:

$$f_{ctm,fl} = \max\left\{\left(1,6 - \frac{h}{1000}\right)f_{ctm}; f_{ctm}\right\}, \quad (12)$$

čia h – bendras elemento aukštis, mm; f_{ctm} – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris.

Kadangi armatūros inercijos momentas yra labai mažas, jis nėra vertinamas skaičiuojant nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentą.

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (13)$$

čia h – bendras elemento aukštis; b – elemento plotis.

Nesupleišėjusio skerspjūvio svorio centras:

Kadangi didžiausią dalį skerspjūvio sudaro betonas, todėl aproksimuojant priimama, kad skerspjūvio svorio centras yra skerspjūvio aukščio viduryje:

$$y_t = \frac{h}{2}, \quad (14)$$

čia h – bendras elemento aukštis.

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas:

$$W = \frac{I_I}{y_t}, \quad (15)$$

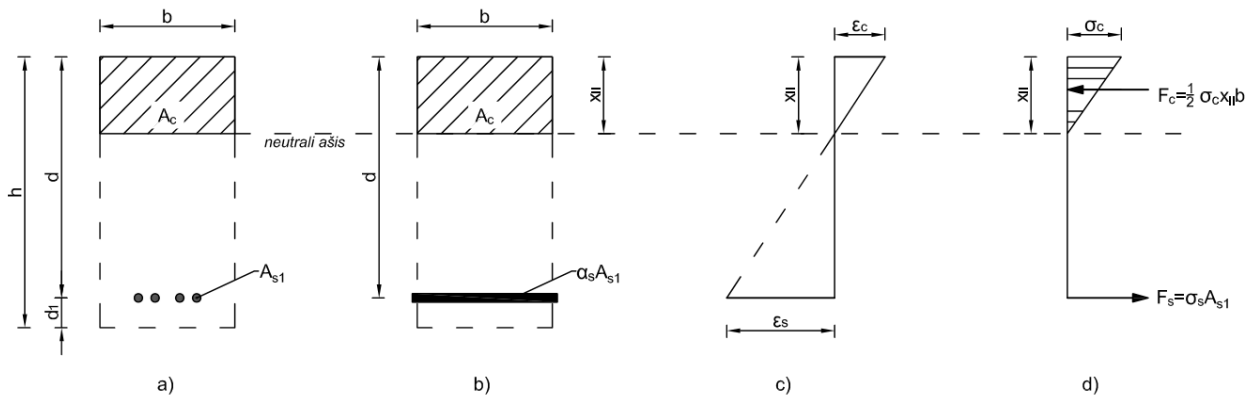
čia I_I – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas; y_t – nesupleišėjusio skerspjūvio svorio centras.

Pleišėjimo momentas:

$$M_{cr.fl} = f_{ctm.fl} \cdot W, \quad (16)$$

$$M_{cr.ctm} = f_{ctm} \cdot W, \quad (17)$$

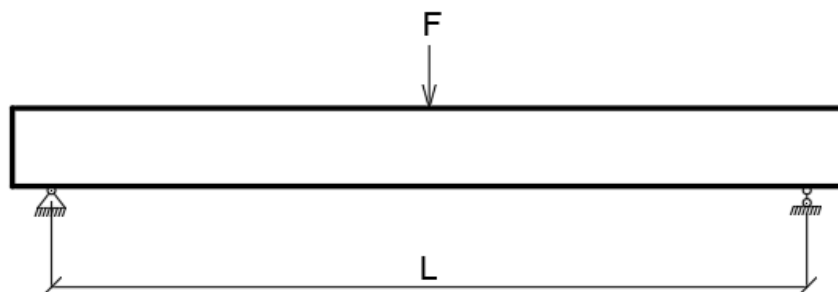
čia $M_{cr.fl}$ – pleišėjimo momentas, esant $f_{ctm.fl}$ įtempių pasiskirstymui; $M_{cr.ctm}$ – pleišėjimo momentas, esant f_{ctm} įtempių pasiskirstymui; $f_{ctm.fl}$ – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris lenkiant; f_{ctm} – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris; W – nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas.



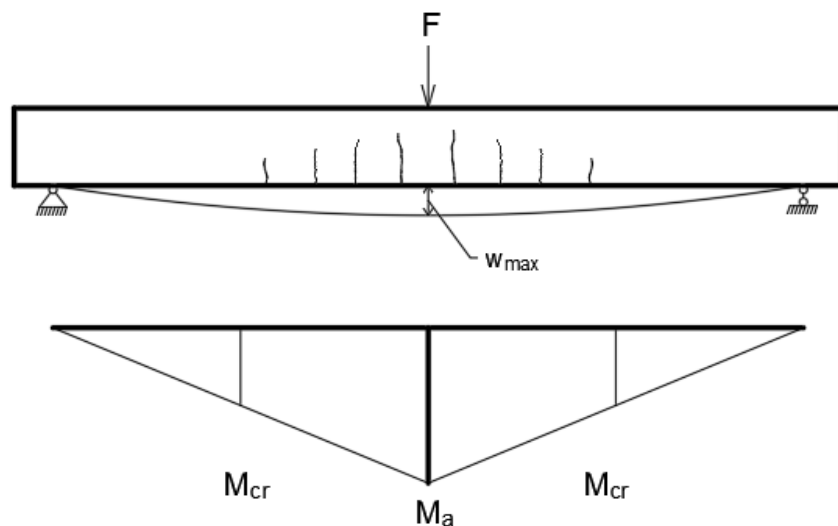
22 pav. Supleišėjusio skerspjūvio schemas: a) supleišėjęs skerspjūvis b) transformuotas supleišėjęs skerspjūvis c) deformacijų schema d) įtempių schema

2.3 Perdirbto betono sijos įlinkio skaičiavimas

Įlinkio skaičiavimui vertinama 23 pav. pateikta sijos schema ir 24 pav. parodytas sijos pleišėjimo profilis. Įlinkis apskaičiuojamas pagal Eurokodo 2 (toliau Eurokodas 2 arba EC2) (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) 7.4.3 skyrių. Skaičiavimuose vertinamas tik trumpalaikis įlinkis, todėl nevertinama traukumo ir valkšnumo įtaka įlinkiui.



23 pav. Viena koncentruota apkrova apkrautos sijos schema



24 pav. Plyšių vystymosi, pasiekus ir viršijus pleišėjimo momentą, grafinis atvaizdavimas, siją apkrovus viena koncentruota apkrova

Siekiant apskaičiuoti skerspjūvio ploto inercijos momentą pasinaudojama redukuoto skerspjūvio metodu, t. y. skaičiuojant skerspjūvį sudarytą iš skirtingų medžiagų, vienos medžiagos plotas transformuojamas į kitą. Šiuo atveju armatūros plotas pakeičiamas jį atitinkančiu betono plotu, tai padaroma įvedant šių medžiagų tamprumo modulių santykio koeficientą ir jį dauginant iš atitinkamo ploto.

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{cm}}, \quad (18)$$

čia E_s – plieno tamprumo modulis; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis.

Redukuotas armatūros skerspjūvio plotas:

$$A_{eq} = \alpha_s \cdot A_{s1}, \quad (19)$$

čia α_s – plieno tamprumo modulio ir betono tamprumo modulio santykis; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas.

Pagal 22 pav. c) iš panašių trikampių:

$$\frac{x_{II}}{\varepsilon_c} = \frac{d - x_{II}}{\varepsilon_s}, \quad (20)$$

čia x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis; ε_c – gniuždomoji betono deformacija; ε_s – tempiamoji armatūros deformacija.

Iš (20) formulės išsireiškiu armatūros deformaciją ε_s :

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_c(d - x_{II})}{x_{II}}, \quad (21)$$

čia x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis; ε_c – gniuždomoji betono deformacija.

Deformacijos betone:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{cm}}, \quad (22)$$

čia σ_c – gniuždomieji betono įtempiai; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis.

Deformacijos armatūroje:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (23)$$

čia σ_s – armatūros įtempiai; E_s – plieno tamprumo modulis.

Jėga, veikianti gniuždomame betone:

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot x_{II} \cdot b, \quad (24)$$

čia σ_c – gniuždomieji betono įtempiai; x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; b – elemento plotis.

Jėga, veikianti tempiamoje armatūroje:

$$F_s = \sigma_s \cdot A_{s1} = \varepsilon_s E_s A_{s1} = \frac{\varepsilon_s (d - x_{II})}{x_{II}} E_s A_{s1} = \frac{\sigma_c (d - x_{II})}{E_{cm} \cdot x_{II}} E_s A_{s1}, \quad (25)$$

čia σ_s – armatūros įtempiai; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas; ε_s – tempiamoji armatūros deformacija; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis; x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; σ_c – gniuždomieji betono įtempiai; E_s – plieno tamprumo modulis; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis.

Sulyginusi pusiausvyros jėgas, veikiančias armatūroje ir betone gaunu:

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot x_{II} \cdot b = \frac{\sigma_c (d - x_{II})}{E_{cm} \cdot x_{II}} E_s A_{s1}, \quad (26)$$

čia σ_s – armatūros įtempiai; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas; ε_s – tempiamoji armatūros deformacija; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis; x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; σ_c – gniuždomieji betono įtempiai; E_s – plieno tamprumo modulis; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis.

Iš čia gaunama supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėties kvadratinė lygtis:

$$\frac{b}{2} x_{II}^2 + x_{II} \alpha_e A_{s1} - d \alpha_s A_{s1} = 0, \quad (27)$$

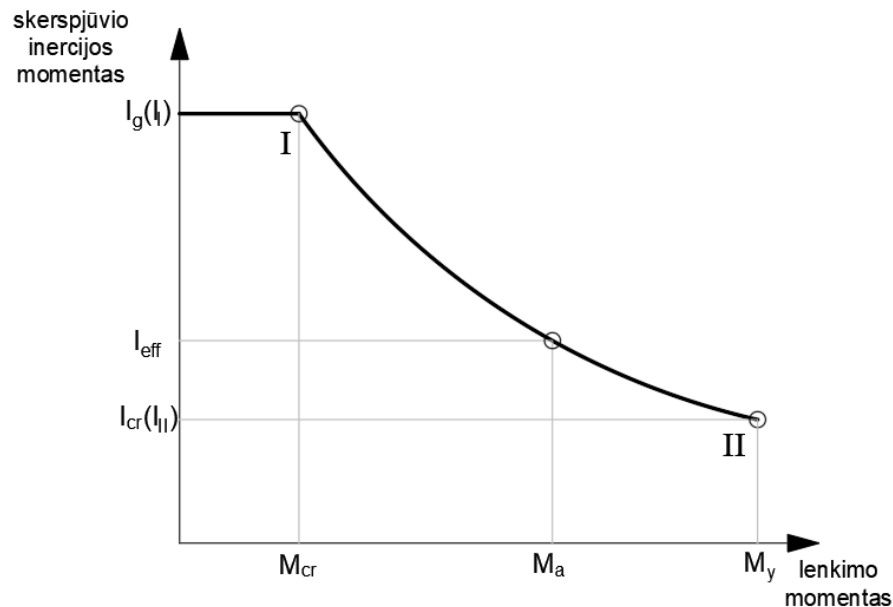
čia b – elemento plotis; x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; α_s – plieno tamprumo modulio ir betono tamprumo modulio santykis; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis.

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas:

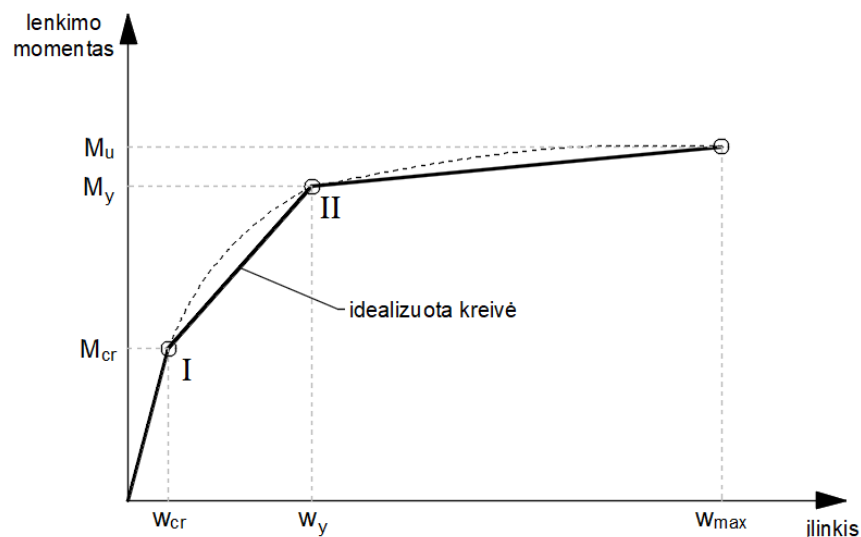
$$I_{II} = \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2, \quad (28)$$

čia b – elemento plotis; x_{II} – supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis; α_s – plieno tamprumo modulio ir betono tamprumo modulio santykis; A_{s1} – armatūros skerspjūvio plotas; d – skerspjūvio efektyvusis aukštis.

Lenkimo momentui pasiekus pleišėjimo momentą, sijoje pradeda rasti plyšiai. Šie plyšiai mažina skerspjūvio lenkiamąjį standumą EI , todėl supleišėjusiame skerspjūvyje vertinama tik gniuždomo betono ir armatūros įtaka (žr. 25 pav.).



25 pav. Skerspjūvio inercijos momento priklausomybė nuo lenkimo momento



26 pav. Įlinkio priklausomybė nuo lenkimo momento

Sijos darbas nagrinėjamas dviejose stadijose. I – oji stadija yra sijos darbas iki pleišėjimo pradžios, kai veikiantis momentas yra lygus pleišėjimo momentui M_{cr} (žr. 26 pav.). II – oji stadija yra sijos darbas, kai veikiantis momentas yra intervale nuo pleišėjimo momento M_{cr} iki momento sukeliančio armatūros tekėjimą M_y (Žiūrėti 26 pav.).

Eurokodas 2 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) apibrėžia, kad elementai, kurie neapkraunami tiek, kad bet kurioje elemento dalyje būtų viršytas betono tempiamasis stipris, laikomi nesupleišėjusiais. Elementai, kurie gali pleišėti, bet nėra visiškai supleišęję, turės tarpinę tarp nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio elemento elgseną.

Lenkimo, kaip pagrindinio poveikio, veikiamiems elementams galima apibrėžti tokią elgseną:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I, \quad (29)$$

čia α – nagrinėjamas deformacijos parametras; α_I , α_{II} – parametro reikšmės, apskaičiuotos atitinkamai nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjūvio stadijose; ζ – pasiskirstymo koeficientas (kurį taikant atsižvelgiama į skerspjūvio tempiamąjį standinimą), apskaičiuojamas taikant (31) lygtį:

Šiame darbe nagrinėjama deformacija yra kreivis. Apskaičiuojamas vidutinis kreivis II – oje sijos darbo stadijoje:

$$\frac{1}{r_m} = \zeta_{II} \frac{1}{r_{II}} + (1 - \zeta_{II}) \frac{1}{r_{I,II}}, \quad (30)$$

čia ζ_{II} – pasiskirstymo koeficientas visiško supleišėjimo sąlygomis, apskaičiuojamas pagal (31) formulę; $\frac{1}{r_{II}}$ – visiškai supleišėjusios sijos kreivis; $\frac{1}{r_{I,II}}$ – nesupleišėjusios sijos kreivis II stadijoje.

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II} = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{II}} \right)^2, \quad (31)$$

čia β – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką. Koeficientas vertinamas, kaip lygus 1,0, kadangi vertinama tik trumpalaikė apkrova; M_{cr} – pleišėjimą sukeliantis momentas; M_{II} – II stadijoje (nuo pleišėjimo momento iki momento, kai plienas pradeda tekėti) esanti momento reikšmė.

Nesupleišėjusios sijos kreivis I stadijoje:

$$\frac{1}{r_I} = \frac{M_I}{E_{cm} I_I}, \quad (32)$$

čia M_I – I stadijoje (iki pleišėjimo) esanti momento reikšmė; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis; I_I – nesupleišėjusios sijos inercijos momentas.

Nesupleišėjusios sijos kreivis II stadijoje:

$$\frac{1}{r_{I,II}} = \frac{M_{II}}{E_{cm}I_I}, \quad (33)$$

čia M_{II} – II stadijoje (nuo pleišėjimo momento iki momento, kai plienas pradeda tekėti) esanti momento reikšmė; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis; I_I – nesupleišėjusios sijos inercijos momentas.

Supleišėjusios sijos kreivis II stadijoje:

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{M_{II}}{E_{cm}I_{II}}, \quad (34)$$

čia M_{II} – II stadijoje (nuo pleišėjimo momento iki momento, kai plienas pradeda tekėti) esanti momento reikšmė; E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis; I_{II} – supleišėjusios sijos inercijos momentas.

Nesupleišėjusios sijos, apkrautos viena koncentruota apkrova, įlinkis:

$$w_I = k \cdot \frac{1}{r_I} \cdot L^2, \quad (35)$$

Čia k – koeficientas lygus $\frac{4}{48}$; $\frac{1}{r_I}$ – nesupleišėjusios sijos kreivis; L – sijos ilgis.

Pleišėjančios sijos, apkrautos viena koncentruota apkrova, įlinkis iki kol bus pasiektas takumas armatūroje:

$$w_{II} = k \cdot \frac{1}{r_m} \cdot L^2, \quad (36)$$

Čia k – koeficientas lygus $\frac{4}{48}$; $\frac{1}{r_m}$ – vidutinis sijos kreivis; L – sijos ilgis.

2.4 Laikomosios galios ir įlinkio apskaičiavimas pagal EC2 įtempių-deformacijų kreivę

Konstrukcijos laikomosios galios skaičiavimas taip pat yra atliekamas pagal Eurokode 2 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) nurodytą netiesinę įtempių ir deformacijų priklausomybę (žr. 27 pav.). Laikomajai galiai pagal EC2 apskaičiuoti reikalingos įtempių - deformacijų kreivės, tamprumo modulio, bei ribinių betono deformacijų reikšmės.

Netiesinė įtempių – deformacijų priklausomybė nusakoma tokia lygtimi, kur įtempiai betone lygūs:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (37)$$

čia η – reikšmės gaunamos pagal (38) formulę; k – reikšmė gaunama pagal (39) formulę.

(37) lygtis galioja, kai $0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|$, kur ε_{cu1} yra vardinė ribinė deformacija.

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}, \quad (38)$$

čia ε_c – gniuždomoji betono deformacija; ε_{c1} – deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cm} .

$$k = 1,05 E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}}, \quad (39)$$

čia E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis, nustatomas pagal (40) formulę; ε_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cm} .

Kirstinis betono tamprumo modulis:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}, \quad (40)$$

čia f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris, MPa.

Išsireiškus įtempius σ_c ir įstačius (38) formulę į (37) formulę, gaunama lygtis aprašanti kylančią kreivės dalį:

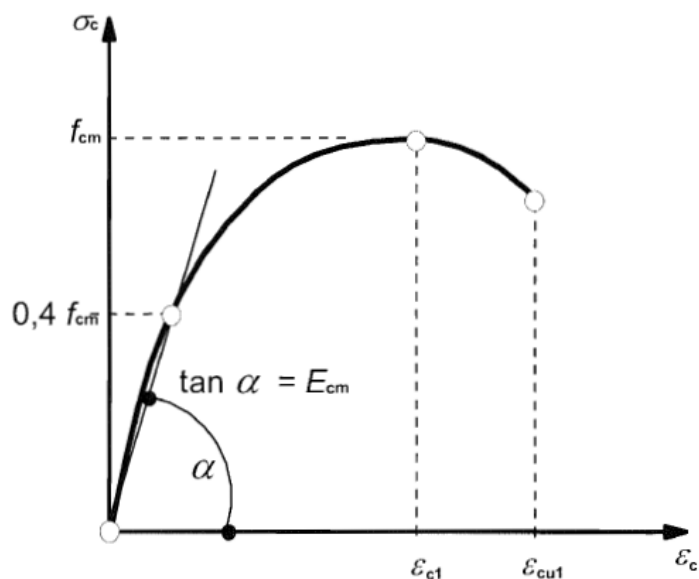
$$\sigma_{c.c1} = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k - 2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} , \quad (41)$$

čia f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; k – reikšmė gaunama pagal (39) formulę; ε_c – gniuždomoji betono deformacija; ε_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cm} .

Analogiškai gaunama ir krentančią kreivės dalį aprašanti lygtis:

$$\sigma_{c.c2} = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k - 2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} , \quad (42)$$

čia f_{cm} – vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris; k – reikšmė gaunama pagal (39) formulę; ε_{cu} – ribinė gniuždomoji betono deformacija; ε_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cm} .



27 pav. Konstrukcijų analizės įtempių ir deformacijų priklausomybės scheminis atvaizdas (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005)

Tolimesni laikomosios galios skaičiavimai atliekami naudojant (1-3) ir (5-9) formules.

Ilinkio skaičiavimai atliekami pagal 2.3 skyriuje nurodytą skaičiavimo metodiką, naudojant šiame skyriuje gautas reikšmes.

2.5 Laikomosios galios ir įlinkio apskaičiavimas pagal ACI-318-14 metodiką

Laikomoji galia apskaičiuojama vertinant nagrinėjamuose moksliniuose tyrimuose pateiktas įtempių – deformacijų kreives (jei tokios kreivės nepateiktos – vertinama EC2 kreivė) ir apribojant ribinę betono gniuždomąją deformaciją, pateiktą amerikiečių ACI-318 (American Concrete Institute., 2011) normose, iki $\varepsilon_c = 0,003$.

Pagal ACI – 318 apskaičiuojant pleišėjimo modulį ir tamprumo modulį, reikalingus laikomajai galiai apskaičiuoti, buvo naudojamos vidutinės gniuždomojo betono stiprio reikšmės.

Šios normos aprašo momentinio įlinkio skaičiavimų metodiką. Momentiniai įlinkiai turi būti skaičiuojami pagal tamprių įlinkių formules įvertinant pleišėjimo ir armavimo efektus elemento standumui.

Įlinkių vertinimui ACI-318 nurodo naudoti efektyviojo inercijos momento skaičiavimą, aprašytą šiose normose ir sukurtą mokslininko Branson (Branson, 1965). Šis inercijos momentas nurodo elemento būvį stadijoje, kai jau atsiranda plyšiai, tačiau elementas dar nėra laikomas visiškai supleišėjusiu.

Efektyviojo skerspjūvio inercijos momento skaičiavimas:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{cr}, \quad (43)$$

čia M_{cr} – pleišėjimo momentas; M_a – veikiantis lenkimo momentas; I_g – skerspjūvio inercijos momentas; I_{cr} – supleišėjusio skerspjūvio momentas.

Naudojant šią formulę turi būti laikomasi sąlygos, kad $I_e \leq I_g$.

Tamprumo modulis:

Normaliojo svorio betonui:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c},$$

f'_c - betono gniuždomasis stipris, MPa.

Plieno tamprumo modulis, naudojamas atliekant skaičiavimus pagal pirmą metodą, aprašytą 3 skyriuje, suprojektuotai sijai.:

$$E_s = 200GPa.$$

Pleišėjimo momento apskaičiavimas:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t}, \quad (44)$$

čia f_r – pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris); I_g – skerspjūvio inercijos momentas; y_t – atstumas nuo skerspjūvio neutralios ašies iki tempiamos elemento plokštumos.

Pleišėjimo modulis:

$$f_r = 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c}, \quad (45)$$

čia λ – koregavimo koeficientas priklausantis, nuo naudojamų užpildų kombinacijos betono mišinyje, $\lambda = 1$, kai betonas yra normalaus svorio; f'_c – charakteristinis betono gniuždomasis stipris, MPa.

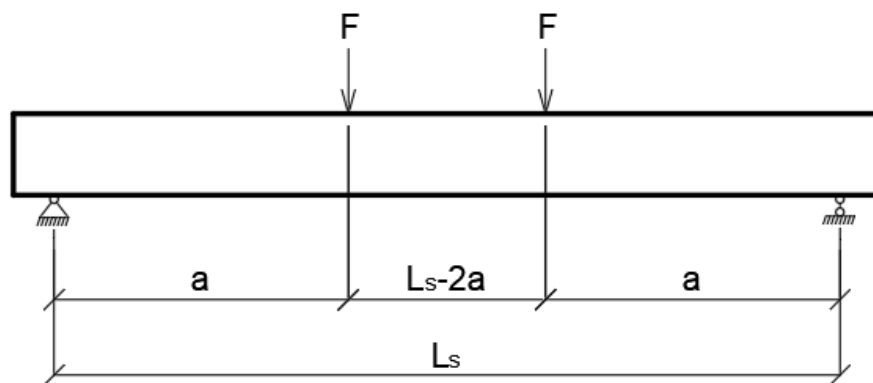
Skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (46)$$

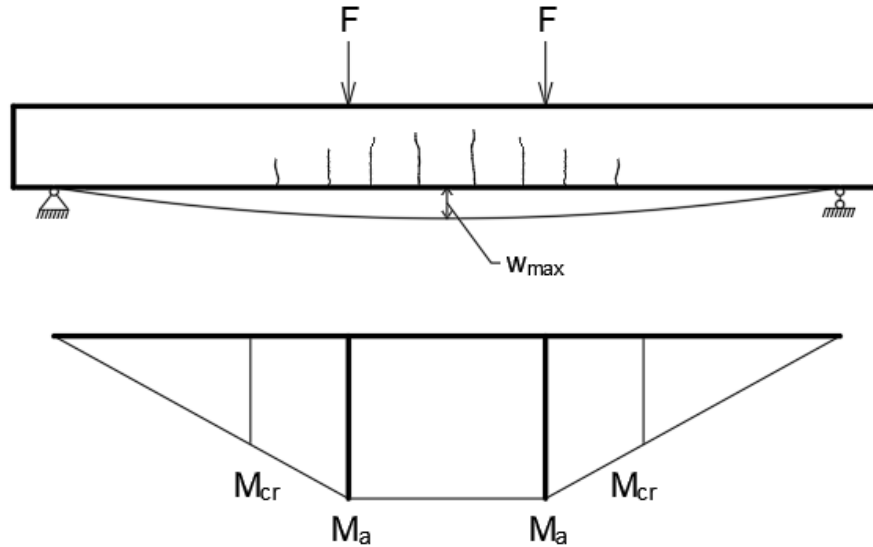
čia b – skerspjūvio plotis, h – skerspjūvio aukštis.

2.6 Įlinkio ir laikomosios galios apskaičiavimas sijoms, apkrautoms dviem koncentruotomis apkrovomis

Moksliniuose tyrimuose (Knaack & Kurama, 2015), (Hamad et al., 2018) atliekami eksperimentiniai tyrimai sijoms apkrautoms dviem koncentruotomis apkrovomis, kaip pavaizduota 28 pav. Dauguma taip apkrautų sijų laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimų atliekami pagal ankščiau nurodytą metodiką 2 skyriuje. Vienintelis skirtumas šiuose skaičiavimuose yra tai, kad naudojamos kitokios įlinkių formulės (47) ir (48).



28 pav. Dviem koncentruotomis apkrovomis apkrautos sijos schema



29 pav. Plyšių vystymosi, pasiekus ir viršijus pleišėjimo momentą, grafinis atvaizdavimas, siją apkrovus dviem koncentruotomis apkrovomis

Nesupleišėjusios sijos, apkrautos dviem koncentruotomis apkrovomis, įlinkis:

$$w_I = \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \frac{1}{r_I}, \quad (47)$$

čia $\frac{1}{r_I}$ – nesupleišėjusios sijos kreivis; L_s – tarpatramio ilgis; a – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėties ašies.

Pleišėjančios sijos, apkrautos dviem koncentruotomis apkrovomis, įlinkis iki kol bus pasiektas takumas armatūroje:

$$w_{II} = \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \frac{1}{r_m}, \quad (48)$$

čia $\frac{1}{r_m}$ – vidutinis sijos kreivis; L_s – tarpatramio ilgis; a – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėties ašies.

Skyriaus išvados

Šiame skyriuje galima daryti išvadas, kad:

1. Skaičiavimai pagal ACI-318 ir EC2 normas yra panašūs, skiriasi tik įlinkio skaičiavimas. ACI-318 įlinkiui apskaičiuoti nurodo naudoti efektyvųjį inercijos momentą, o EC2 – vidutinį kreivį.
2. Abiejų normų metodikos vertina tarpinę stadiją tarp nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjuvio būvio;
3. Laikomąją galią galima apskaičiuoti pagal EC2 arba moksliniuose tyrimuose pateiktus įtempių ir deformacijų grafikus;
4. Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas taip pat abiejose normose, skiriasi tik tempiamojo stiprio, naudojamo pleišėjimo momento formulėje, apskaičiavimas;
5. Gniuždomosios zonos aukštis apskaičiuojamas II stadijoje pagal EC2 skiriasi nuo ACI-318 dėl skirtingų tamprumo modulių.

3 SKAIČIAVIMŲ EIGA IR REZULTATŲ ANALIZĖ

3.1 Laikomosios galios ir įlinkio skaičiavimų eiga (2 metodai):

Laikomoji galia ir įlinkiai apskaičiuojami remiantis ACI-318 (American Concrete Institute. 2011) ir EC2 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) normatyviniais dokumentais

Pirmas metodas – iš mokslinių tyrimų, kuriuose yra pateiktos įtempių-deformacijų kreivės, apskaičiuoju laikomąją galią ir įlinkį. Laikomoji galia skaičiuojama sijai, kurios matmenys ir armavimas yra laisvai užsiduoti. Skaičiavimai pateikti A priede, skaičiavimų metodika pateikta 3 skyriuje.

Eiga: Įtempių-deformacijos kreivės gaunamos išmatavus tam tikrus taškus tyrimo grafike. Gautos reikšmės atidedamos naujame grafike, yra nubrėžiama kreivė einanti per šiuos taškus. Iš šios kreivės gaunama tendencijos linija su polinoline lygtimi ir regresijos koeficientu. Šios lygtys naudojamos laikomajai galiai apskaičiuoti. Įlinkiai apskaičiuojami trimis būdais: 1) pagal tyrimo įtempių-deformacijų kreivę ir EC2 įlinkio skaičiavimo metodiką; 2) pagal EC2 įtempių-deformacijų kreivę ir EC2 įlinkio skaičiavimo metodiką; 3) pagal tyrimo įtempių-deformacijų kreivę ir ACI-318 įlinkio skaičiavimo metodiką. Rezultatai pateikiami kaip lenkimo momento – įlinkio kreivės.

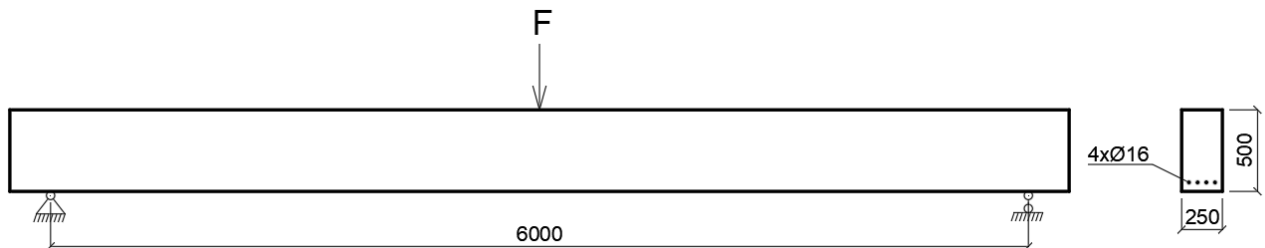
Antras metodas – iš mokslinių tyrimų, kuriuose įtempių-deformacijų kreivės nebuvo pateiktos, apskaičiuoju laikomąją galią ir įlinkį pritaikydama EC2 įtempių ir deformacijų kreivę. Laikomoji galia apskaičiuojama sijai, su moksliniuose tyrimuose nurodytais matmenimis, armavimu ir kitomis charakteristikomis. Skaičiavimai pateikti B priede, skaičiavimų metodika – 2 skyriuje.

Eiga: Laikomoji galia apskaičiuojama pritaikant EC2 įtempių-deformacijų kreivę. Įlinkiai apskaičiuojami dviem būdais: 1) pagal EC2 įtempių-deformacijų kreivę ir EC2 įlinkio skaičiavimo metodiką; 2) pagal EC2 įtempių-deformacijų lygtį ir ACI-318 įlinkio skaičiavimo metodiką. Brėžiami lenkimo momento-įlinkio grafikai. Šie grafikai palyginami su grafikais pateiktais moksliniuose tyrimuose.

Skaiciavimai pagal 1 metodą atliekami naudojant duomenis iš šių mokslininkų (Breccolotti et al., 2015), (Martínez-Lage et al., 2012), (Belén et al., 2010) tyrimų. Skaiciavimams naudojamos sijos modelis pavaizduotas 30 pav.

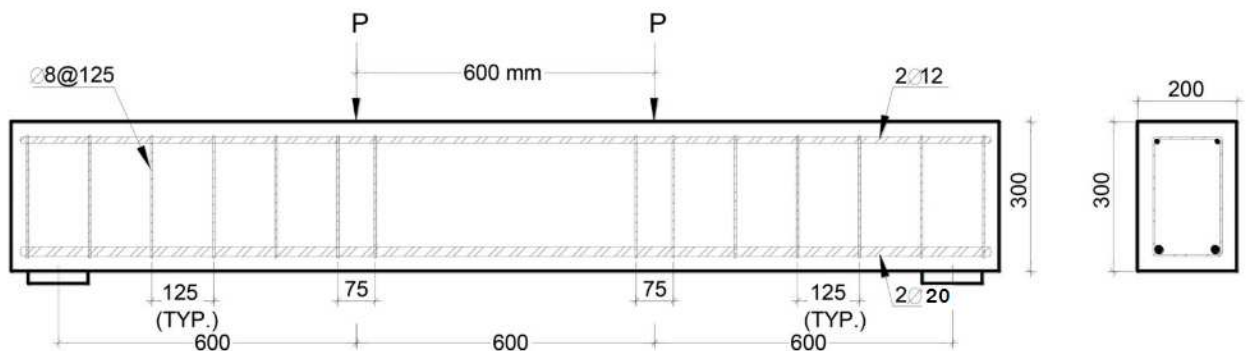
Skaiciavimai pagal 2 metodą atliekami naudojant duomenis iš šių mokslininkų (Knaack & Kurama, 2015), (Hamad et al., 2018) tyrimų. Skaiciavimams naudojamos sijos modelis pavaizduotas 30 pav.

Skaiciavimų, naudojant 1 metodą, nagrinėjamas lenkiamos sijos modelis:

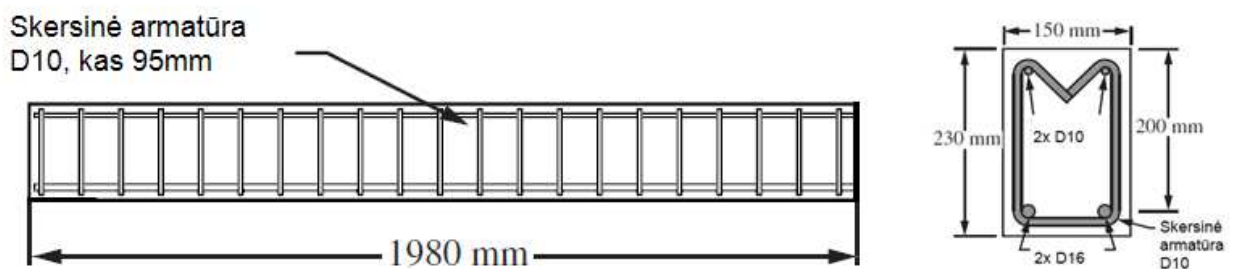


30 pav. Lenkiamos sijos modelis skaiciavimams 1 metodu.

Skaiciavimų, naudojant 2 metodą, metu nagrinėti sijų modeliai:



31 pav. Lenkiamos sijos bandinys (Hamad et al., 2018)



32 pav. Lenkiamos sijos bandinys su vienu sluoksniu armatūros (Knaack & Kurama, 2015)

3.2 Rezultatų analizė

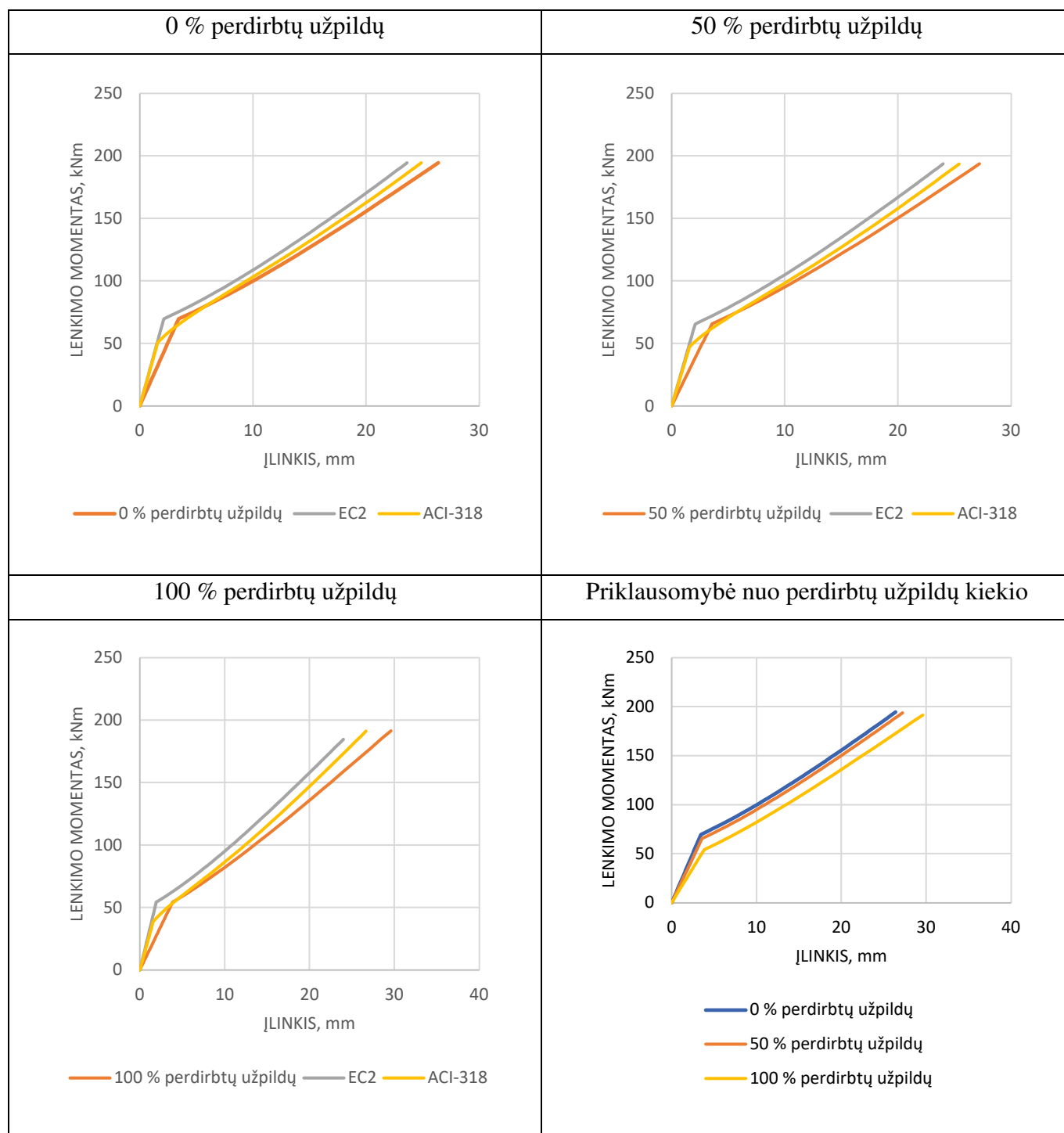
Lenkimo momento – įlinkio kreivių palyginimas

Pagal įtempių ir deformacijų kreives iš mokslinių tyrimų, suprojektuotos sijos, lenkimo momento – įlinkio grafiko kreivė žemėja ir slenkasi dešiniau. Tai reiškia, kad pleišėjimo momentas yra mažesnis, įlinkiai didesni prie tų pačių lenkimo momento reikšmių. Tokia tendencija matoma ir 3 – 8 lentelėje. Nagrinėtų 1 metodu (žr. 3 – 8 lenteles) tyrimų rezultatai rodo, kad lenkimo momento – įlinkių kreivės krenta tarp kreivių, apskaičiuotų pagal EC2 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005) ir ACI-318 (American Concrete Institute, 2011). Eurokodo lenkimo momento – įlinkio kreivė yra aukščiau tyrimų kreivės, o ACI-318 kreivė yra žemiau.

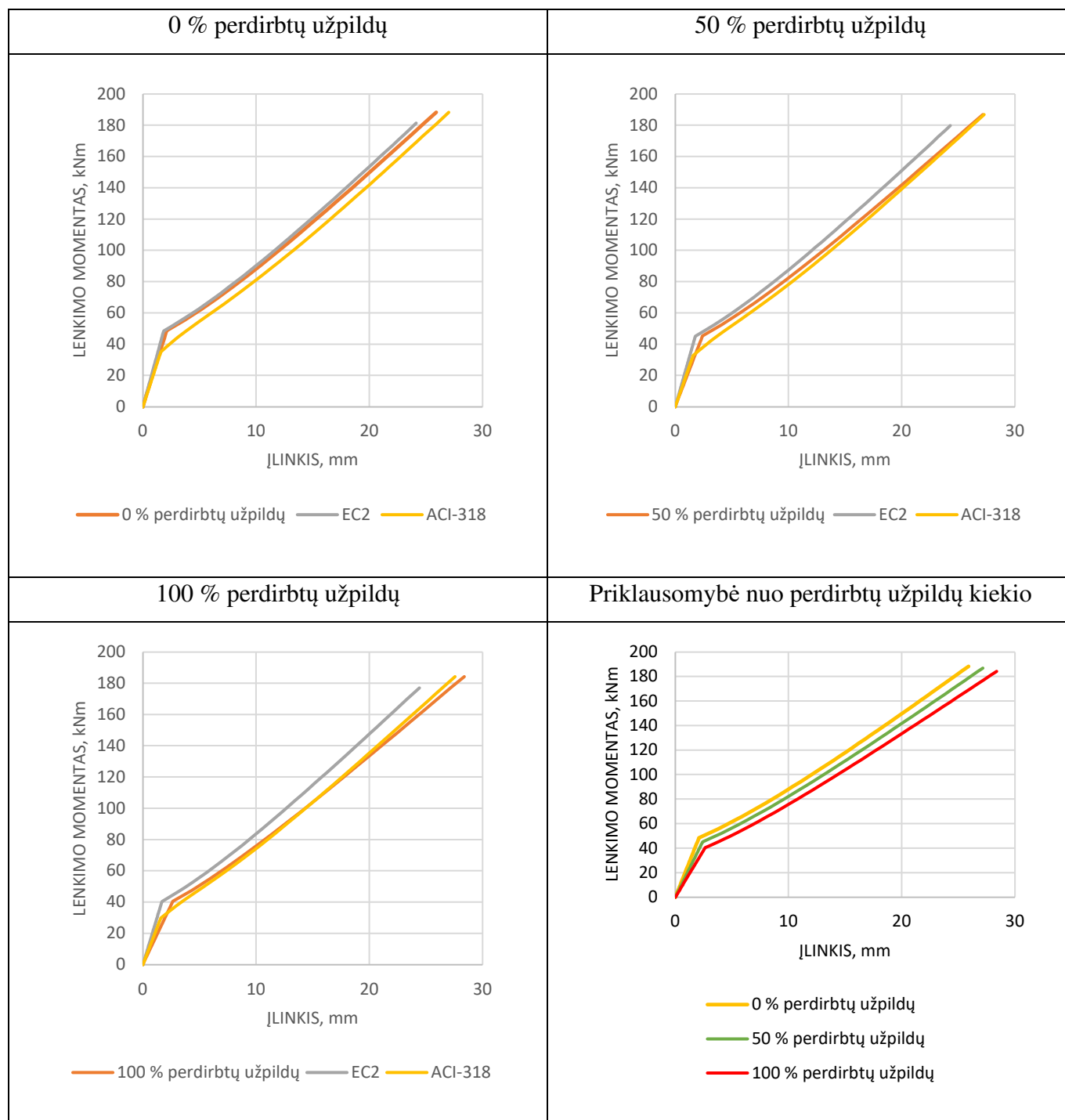
2 metodu sudarytų lenkimo momento ir įlinkių kreivės (žr. 9 lentelė ir 10 lentelė) taip pat rodo, kad didinant perdirbtų užpildų kiekį lenkimo momento ir įlinkio kreivė slenkasi žemyn ir į dešinę.

Toliau bus pateikti reikšmių konkrečiuose kreivės taškuose palyginimai.

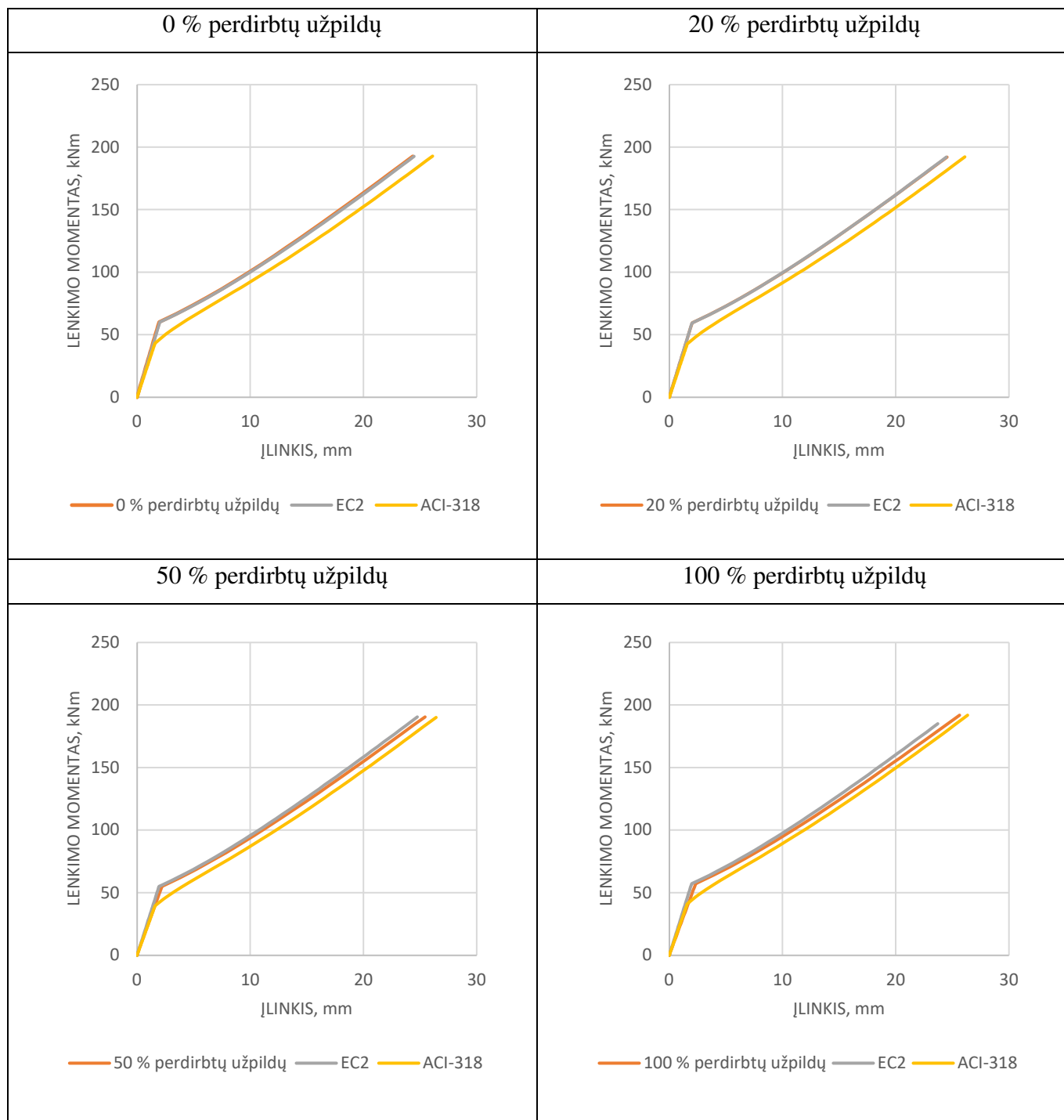
3 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Breccolotti et al., 2015)



4 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Martínez-Lage et al., 2012)

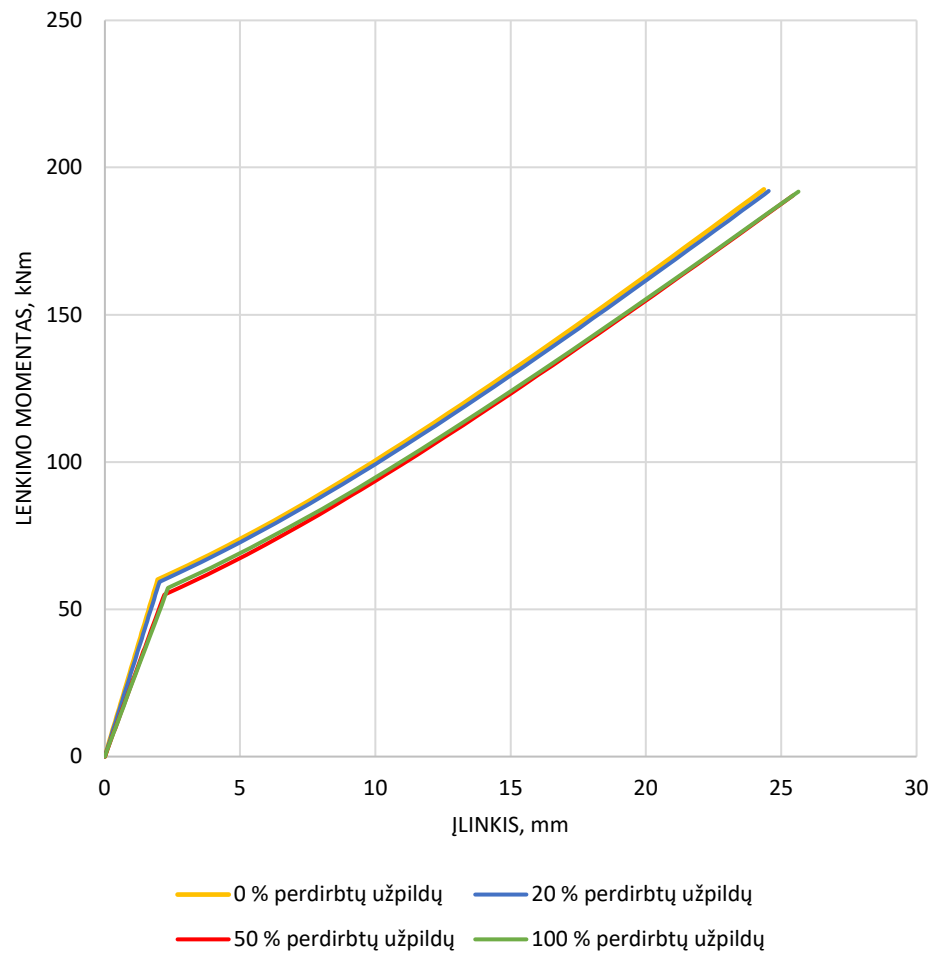


5 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (matavimas tenzodavikliais)

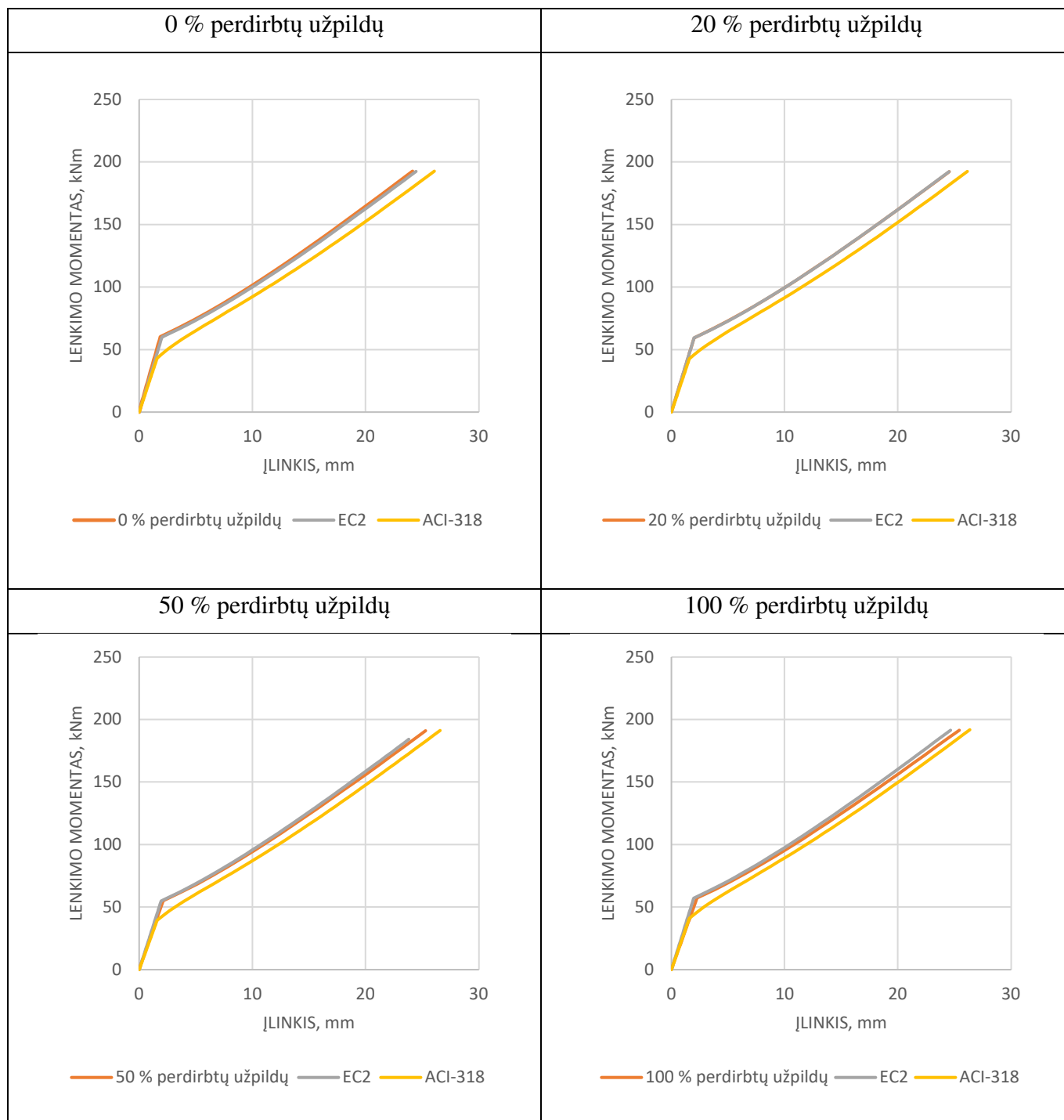


5 lentelės tęsinys

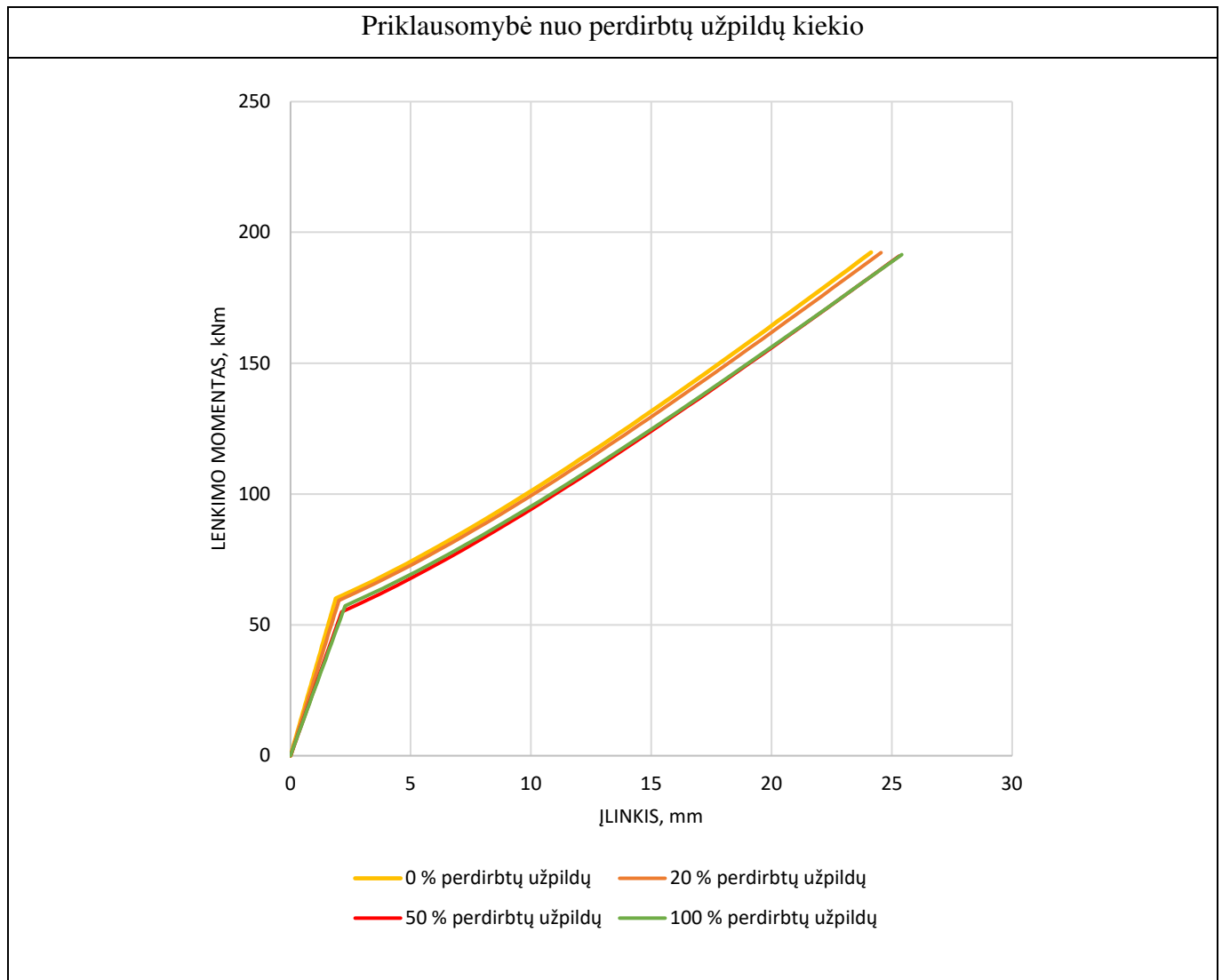
Priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



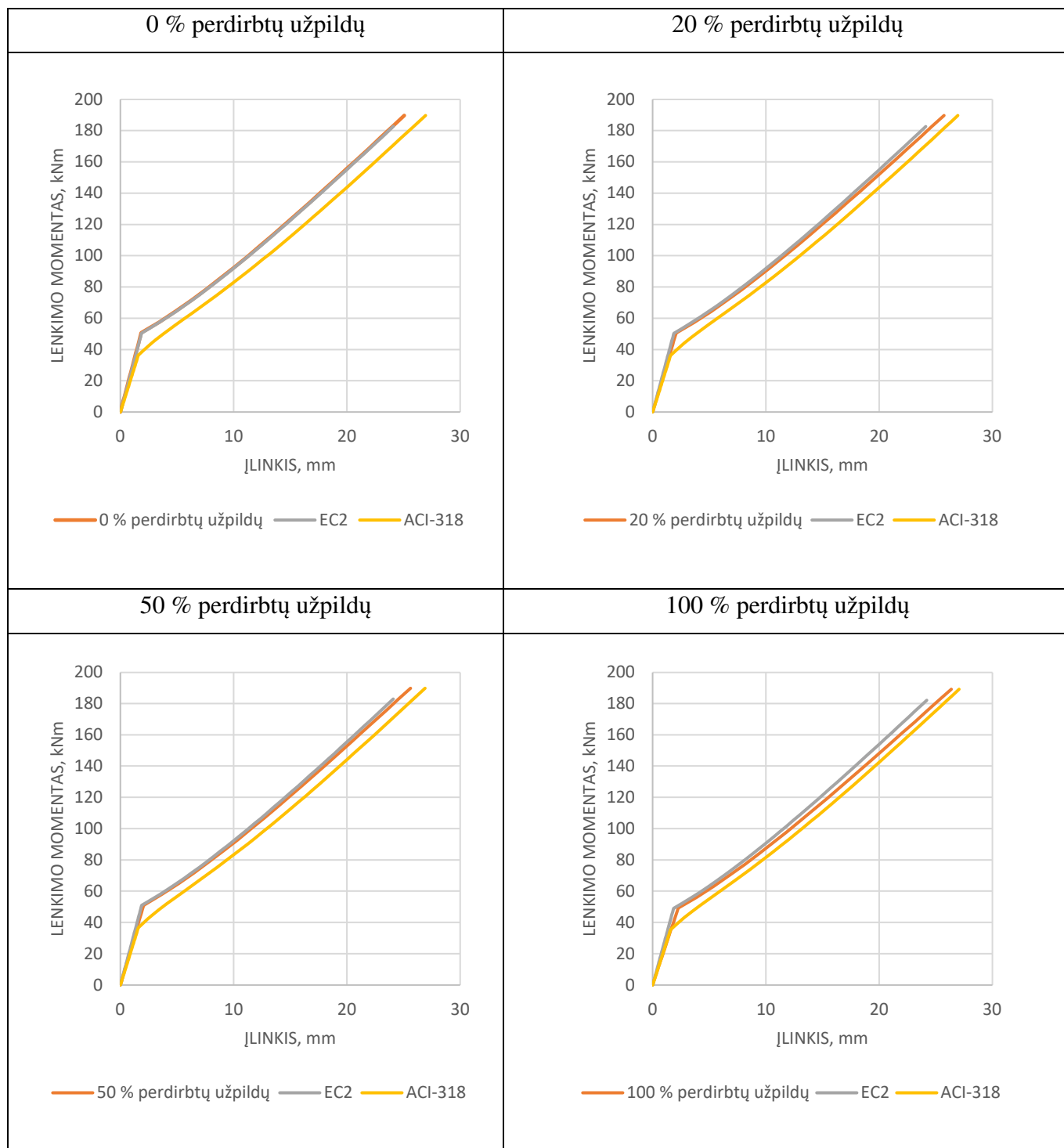
6 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (poslinkių jutikliais)



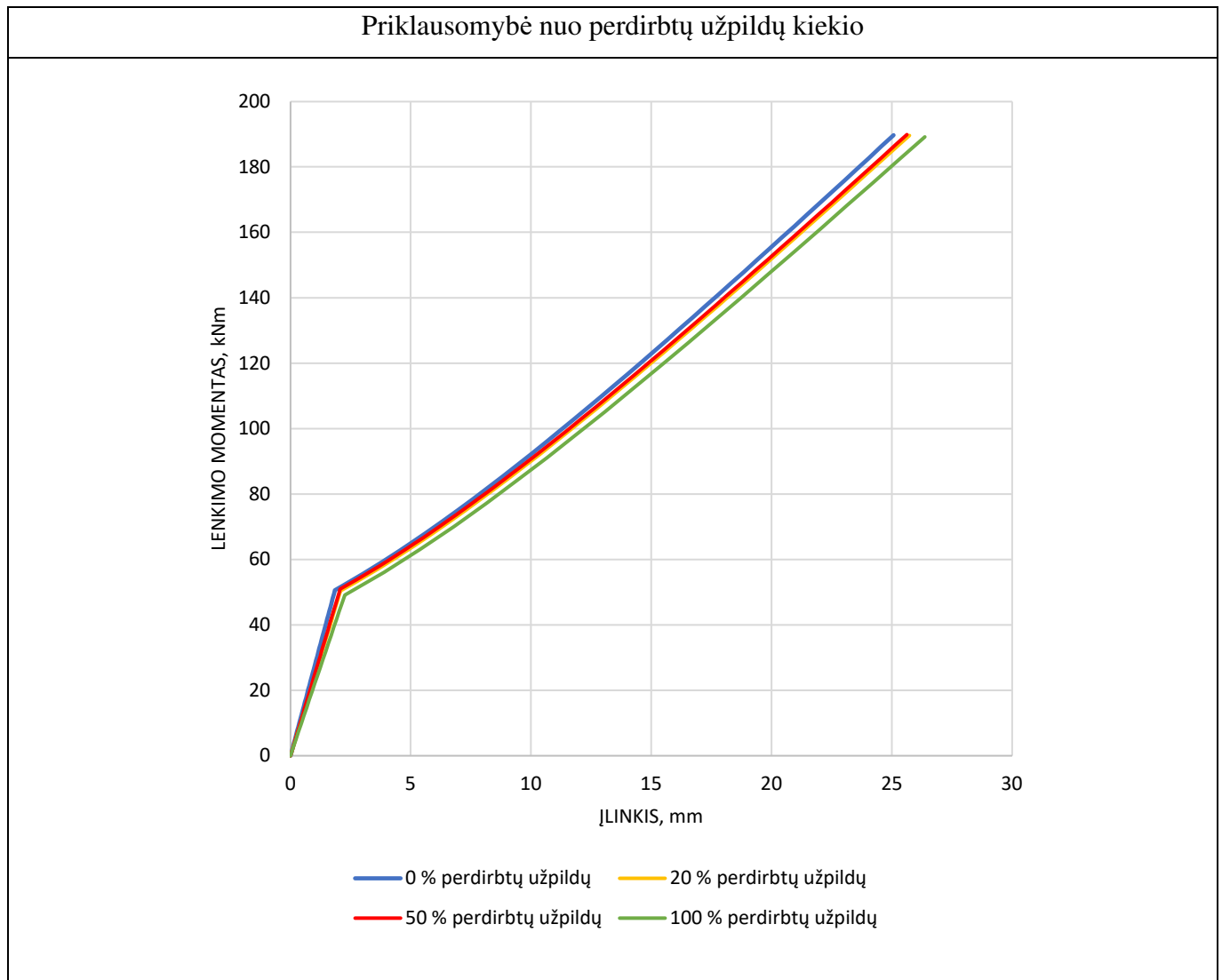
6 lentelės tęsinys



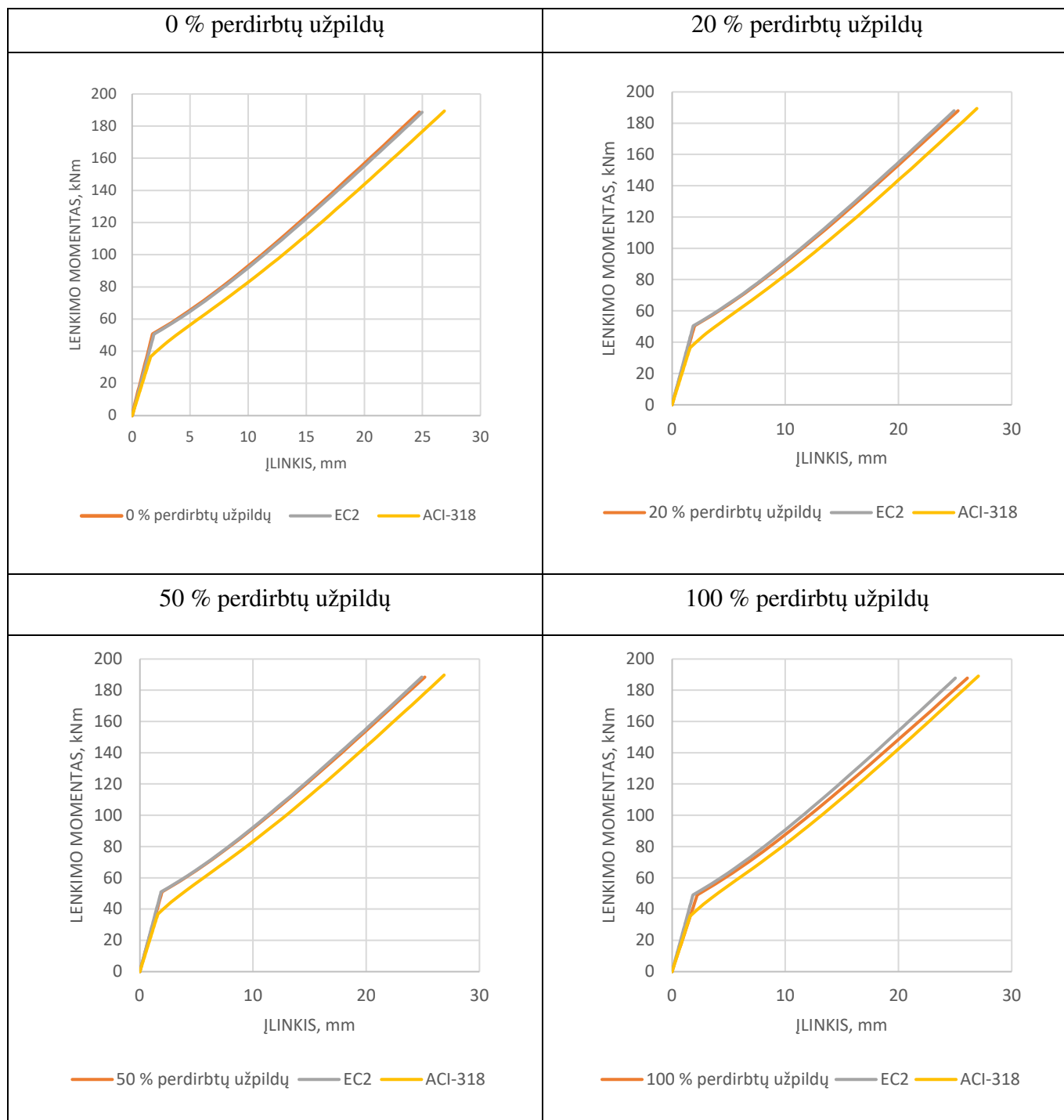
7 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (matavimas tenzodavikliais)



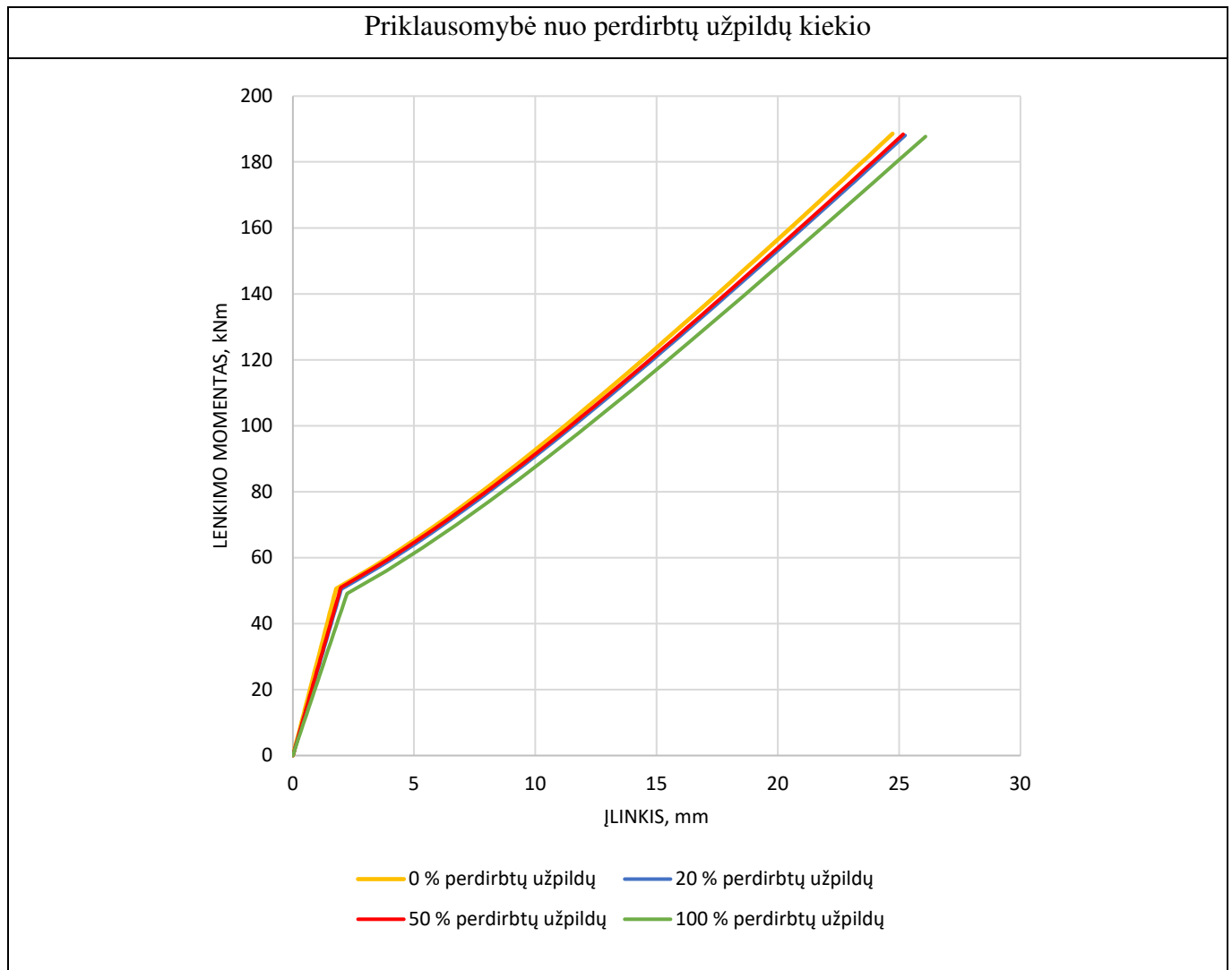
7 lentelės tęsinys



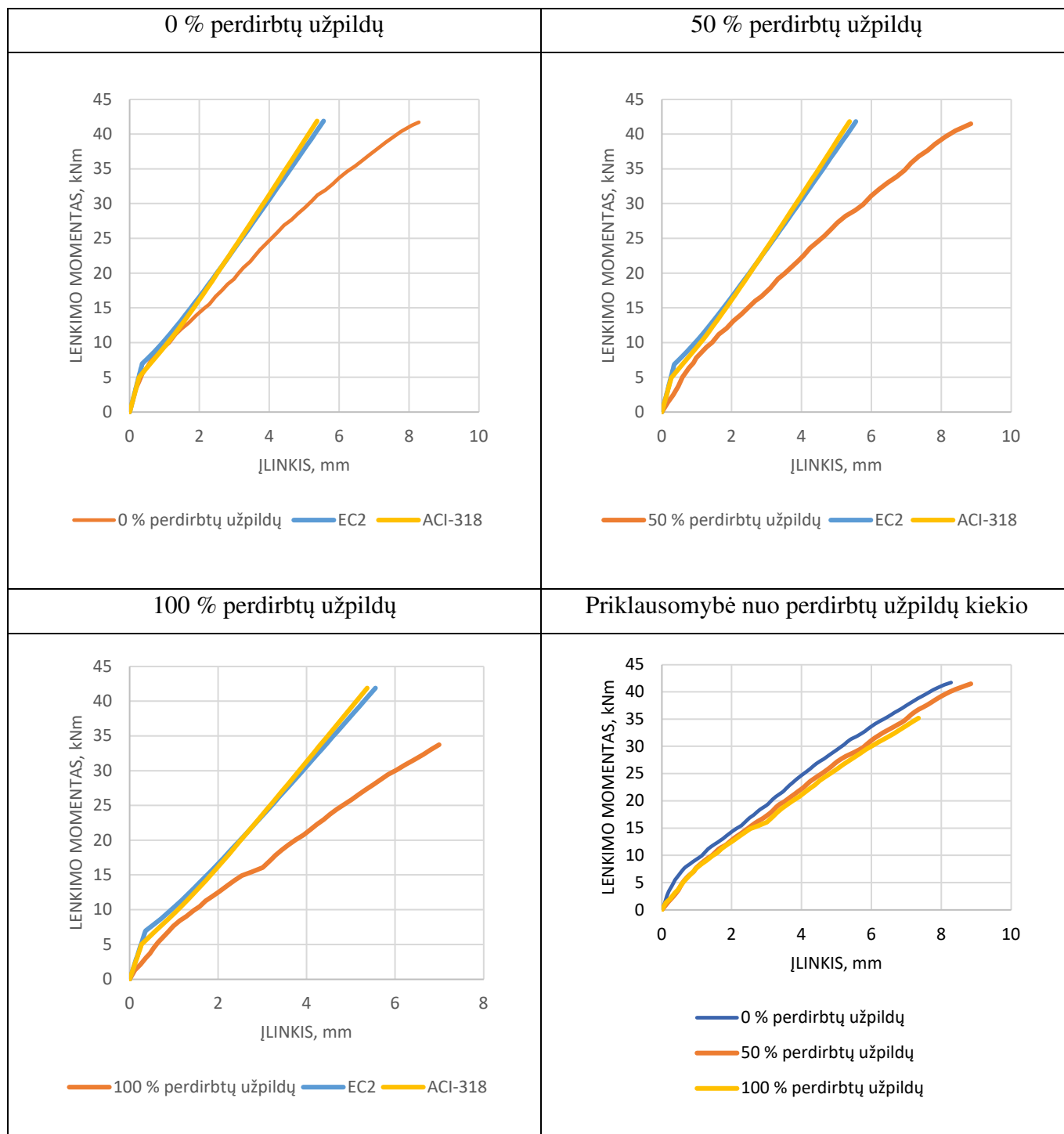
8 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (poslinkių jutikliais)



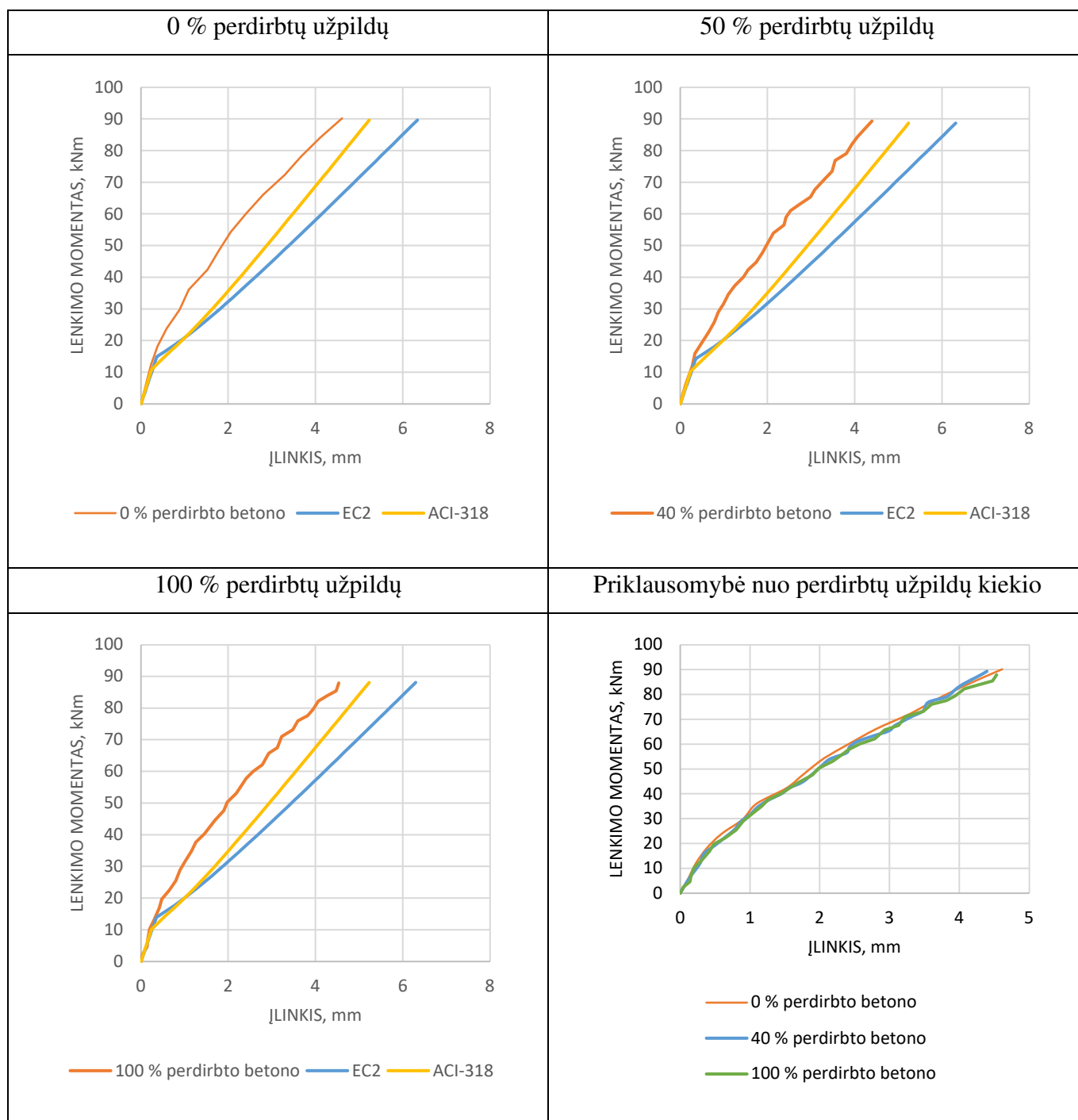
8 lentelės tęsinys



9 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (Knaack & Kurama, 2015)



10 lentelė. Lenkimo momento-įlinkio grafiko priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio (Hamad et al., 2018)



Lenkimo momento reikšmių palyginimas tam tikruose lenkimo momento – įlinkio kreivės taškuose

Atliekami lenkimo momentų palyginimai ties šiomis reikšmėmis: pleišėjimo momentu M_{cr} , 60 % takumo momento M_y ir 100 % takumo momento M_y .

Iš 11-14 lentelių galima matyti, kad pleišėjimo momento M_{cr} reikšmės, lyginant su eksperimentinėms, sutapo, o pagal ACI-318 yra 26 – 28 % mažesnės.

Skaiciuojant pagal EC2 reikšmės ties taškais $0.6M_y$ ir M_y buvo iki 4 % mažesnės nei eksperimentinės EC2 apskaičiuotų reikšmių skirtumas lėmė tai, kad buvo skaičiuojama naudojant EC2 tamprumo modulį ir EC2 įtempių ir deformacijų kreivę. Laikomoji galia (M_y), apskaičiuota naudojantis ACI-318 normomis, yra labai panaši į eksperimentinę (skirtumas nesiekia 1 %). Šis skirtumas yra dėl ACI-318 naudojamos ribinės gniuždomojo betono deformacijos, lygios 0,003. Pleišėjimo momentas, apskaičiuotas pagal ACI-318, yra mažesnis, nes jo skaičiavime yra vertinamas pleišėjimo modulis, kuris yra apskaičiuojamas kitaip nei tempiamasis stipris pagal EC2. Taip pat šiame skaičiavime yra naudojamos vidutinės gniuždomojo betono stiprio reikšmės.

Pakeitus perdirbtų betono užpildų kiekį iki 50 % iš 11 – 14 lentelių galime matyti, kad pleišėjimo momentas sumažėja 6 – 9 %, laikomoji galia sumažėja 0,4 – 1,0 % .

Pakeitus 100 % natūralių užpildų perdirbtais pleišėjimo momentas sumažėja 3 - 22 %, o laikomoji galia 0,3 – 2 % (žr. 11 lentelė– 14 lentelė).

Didinant perdirbtų užpildų kiekį, kai v/c santykis yra didelis, pleišėjimo ir takumo momentų reikšmės skiriasi labai mažai (žr. 13 lentelė – 14 lentelė). Pleišėjimo momentas mažėja 3 – 5 %, o takumo momentas 0,3 – 0,4 %.

11 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Breccolotti et al., 2015)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	69,686	116,723	194,538	Eksperim.
	69,686	116,723	194,538	EC2
	50,817	116,742	194,570	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	1,00	1,00	EC2
	0,73	1,00	1,00	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	65,590	116,221	193,702	Eksperim.
	65,590	116,221	193,702	EC2
	47,476	116,200	193,666	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	1,00	1,00	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	54,301	114,928	191,547	Eksperim.
	54,301	110,811	184,685	EC2
	39,029	114,739	191,231	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318

12 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Martínez-Lage et al., 2012)

0 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	48,523	113,008	188,347	Eksperim.
	48,523	108,814	181,356	EC2
	35,078	113,008	188,349	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	45,147	112,128	186,880	Eksperim.
	45,147	107,876	179,794	EC2
	32,868	112,143	186,905	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,73	1,00	1,00	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	40,417	110,550	184,250	Eksperim.
	40,417	106,235	177,058	EC2
	29,876	110,572	184,287	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,74	1,00	1,00	ACI-318

13 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c = 0.5$ (Belén et al., 2010)

0 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	60,093	115,552	192,586	Eksperim.
	60,093	115,552	192,586	EC2
	43,232	115,737	192,895	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	1,00	1,00	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
20 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	59,397	115,214	192,023	Eksperim.
	59,397	115,214	192,023	EC2
	42,713	115,411	192,352	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	1,00	1,00	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	55,000	114,323	190,539	Eksperim.
	55,000	114,323	190,539	EC2
	39,523	114,109	190,182	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	1,00	1,00	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{CR}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	57,228	115,115	191,859	Eksperim.
	57,228	111,076	185,127	EC2
	41,121	115,115	191,859	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318

14 lentelė. Lenkimo momento palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c = 0.65$ (Belén et al., 2010)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	50,623	113,857	189,762	Eksperim.
	50,623	109,683	182,805	EC2
	36,488	113,872	189,786	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
20 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	50,446	113,803	189,672	Eksperim.
	50,446	109,627	182,711	EC2
	36,368	113,803	189,672	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	50,984	113,943	189,905	Eksperim.
	50,984	109,775	182,959	EC2
	36,733	113,942	189,904	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Lenkimo momentas (kNm)	49,082	113,516	189,194	Eksperim.
	49,082	109,313	182,188	EC2
	35,450	113,515	189,192	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,00	0,96	0,96	EC2
	0,72	1,00	1,00	ACI-318

Įlinkio reikšmių palyginimas tam tikruose lenkimo momento – įlinkio kreivės taškuose

Atliekami įlinkio palyginimai ties šiomis kreivės reikšmėmis: pleišėjimo momentu M_{cr} , 60 % takumo momento M_y ir 100 % takumo momento M_y .

Įlinkių reikšmių skirtumai šiuose kreivių taškuose daug didesni (žr. 15 lentelė - 18 lentelė), negu skirtumai tarp lenkimo momentų reikšmių. Pagal EC2 apskaičiuojami įlinkiai ties pleišėjimo momentu yra 9-42 % mažesni, kai vertinama 50 % procentų perdirbtų užpildų. Pagal ACI-318 tomis pačiomis sąlygomis įlinkiai yra mažesni 23 – 56 %. Mažesnis skirtumas pastebimas prie takumo momento: EC2 - .

Didėjant perdirbtų užpildų kiekiui eksperimentiniai įlinkiai didėja. Prie pleišėjimo momento, kai naudojama 50 % perdirbtų užpildų, eksperimentiniai įlinkiai yra 1,04 – 1,15 karto didesni nei lyginant su 0 % perdirbtų užpildų, o kai naudojama 100 % perdirbtų užpildų šie įlinkiai padidėja 1,12 – 1,26 karto. Prie takumo momento pasireiškia ta pati tendencija. Čia naudojant 50 % perdirbtų užpildų eksperimentinis įlinkis padidėja 1,02 – 1,04 karto, o su 100 % užpildų 1,05 – 1,12 karto. To priežastis yra lenkiamojo standumo mažėjimas dėl mažesnio tamprumo modulio naudojant perdirbtus užpildus (EC2 ir ACI-318 normos to neįvertina).

15 lentelė. Įlinkio palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6M_y$, M_y (Breccolotti et al., 2015)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	3,439	13,187	26,382	Eksperim.
	2,112	11,382	23,619	EC2
	1,583	12,391	24,875	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,61	0,86	0,90	EC2
	0,46	0,94	0,94	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	3,566	14,012	27,199	Eksperim.
	2,070	11,920	23,989	EC2
	1,583	13,142	25,394	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,58	0,85	0,88	EC2
	0,44	0,94	0,93	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	3,865	16,264	29,597	Eksperim.
	1,928	12,623	23,975	EC2
	1,583	14,892	26,702	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,50	0,78	0,81	EC2
	0,41	0,92	0,90	ACI-318

16 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y (Martínez-Lage et al., 2012)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,100	14,195	25,905	Eksperim.
	1,837	13,060	24,138	EC2
	1,583	15,416	27,017	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,87	0,92	0,93	EC2
	0,75	1,09	1,04	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,416	15,159	27,158	Eksperim.
	1,777	13,334	24,285	EC2
	1,583	15,724	27,268	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,74	0,88	0,89	EC2
	0,66	1,04	1,00	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,651	16,155	28,377	Eksperim.
	1,684	13,640	24,408	EC2
	1,583	16,078	27,551	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,64	0,84	0,86	EC2
	0,60	1,00	0,97	ACI-318

17 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c = 0.5$ (Belén et al., 2010)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	1,959	12,537	24,353	Eksperim.
	2,007	12,613	24,471	EC2
	1,583	14,061	26,093	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,02	1,01	1,00	EC2
	0,81	1,12	1,07	ACI-318
20 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,024	12,686	24,536	Eksperim.
	1,998	12,644	24,470	EC2
	1,583	14,150	26,112	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,99	1,00	1,00	EC2
	0,78	1,12	1,06	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,200	13,526	25,431	Eksperim.
	1,938	13,100	24,758	EC2
	1,583	14,684	26,404	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,88	0,97	0,97	EC2
	0,72	1,09	1,04	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,344	13,522	25,631	Eksperim.
	1,969	12,272	23,704	EC2
	1,583	14,461	26,343	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,84	0,91	0,92	EC2
	0,68	1,07	1,03	ACI-318

18 lentelė. Įlinkių palyginimas taškuose M_{cr} , $0.6 M_y$, M_y , kai $v/c = 0.65$ (Belén et al., 2010)

0 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	1,846	13,565	25,071	Eksperim.
	1,871	12,931	24,115	EC2
	1,583	15,269	26,940	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	1,01	0,95	0,96	EC2
	0,86	1,13	1,07	ACI-318
20 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,080	13,982	25,728	Eksperim.
	1,869	12,939	24,121	EC2
	1,583	15,278	26,951	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,90	0,93	0,94	EC2
	0,76	1,09	1,05	ACI-318
50 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,062	13,881	25,625	Eksperim.
	1,877	12,901	24,097	EC2
	1,583	15,218	26,912	ACI-318
Normalizuotas įlinkis w/w_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,91	0,93	0,94	EC2
	0,77	1,10	1,05	ACI-318
100 % perdirbtų užpildų	M_{cr}	$0.6M_y$	M_y	
Įlinkis (mm)	2,260	14,460	26,371	Eksperim.
	1,846	13,067	24,198	EC2
	1,583	15,419	27,067	ACI-318
Normalizuotas lenkimo momentas M/M_{exp}	1,00	1,00	1,00	Eksperim.
	0,82	0,90	0,92	EC2
	0,70	1,07	1,03	ACI-318

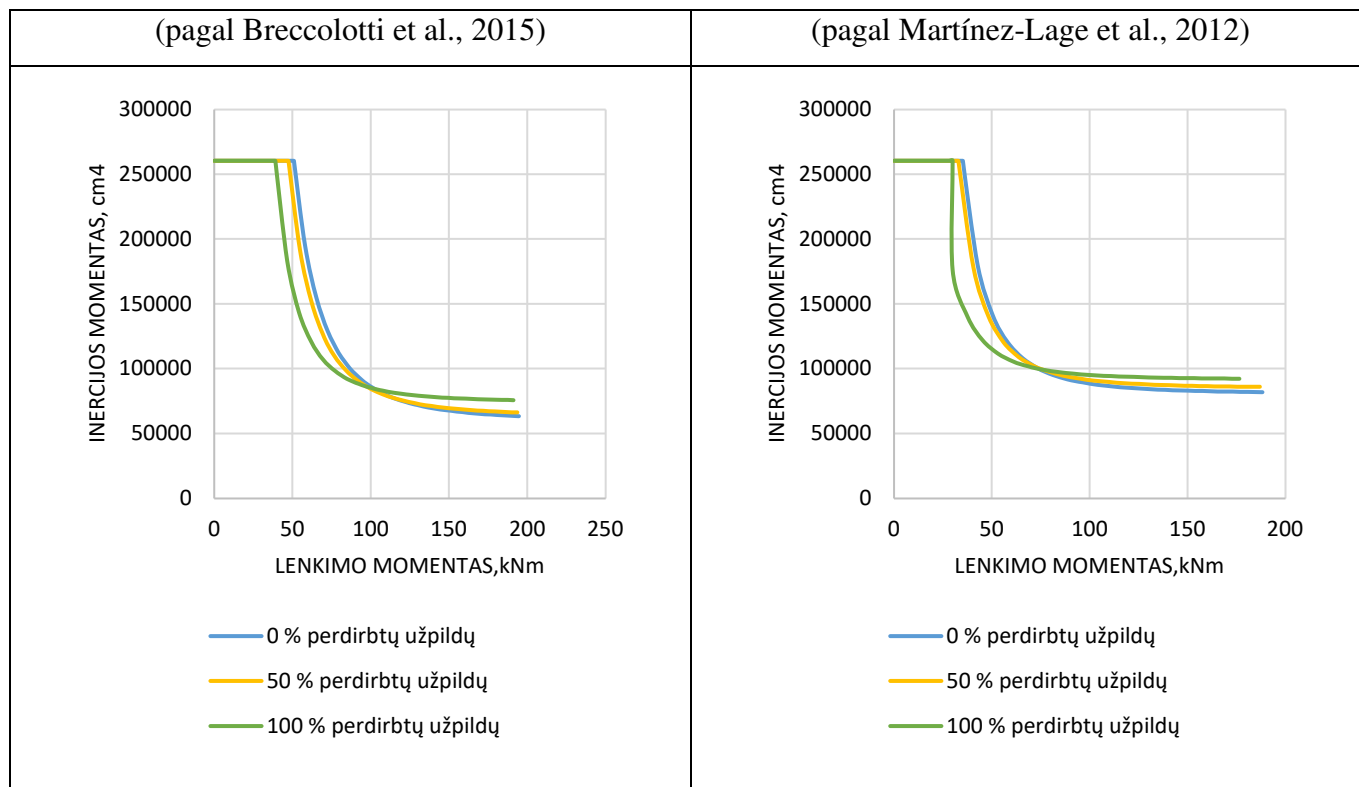
Inercijos momento – lenkimo momento kreivių palyginimas

Naudojantis mokslininkų tyrimų duomenis ir sija, su laisvai užsiduotais geometrijos ir armavimo parametrais, sudaryti inercijos momento – lenkimo momento grafikai (žr. 19 lentelė ir 20 lentelė).

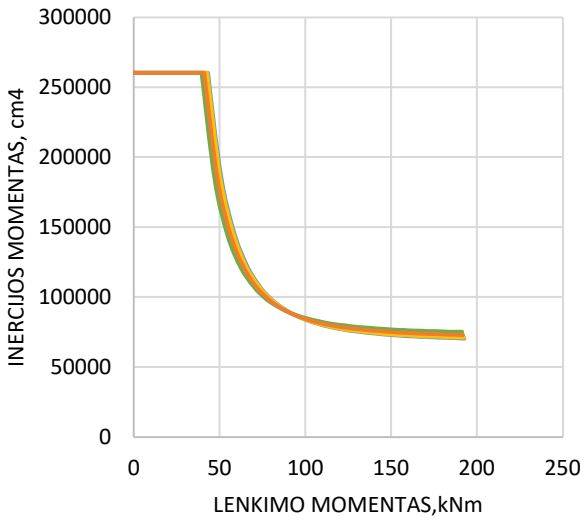
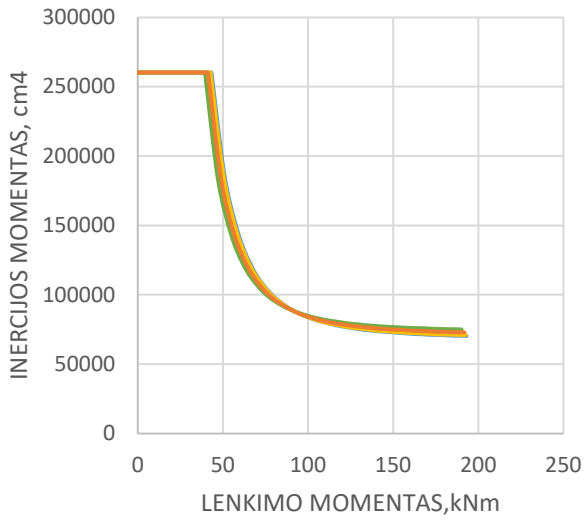
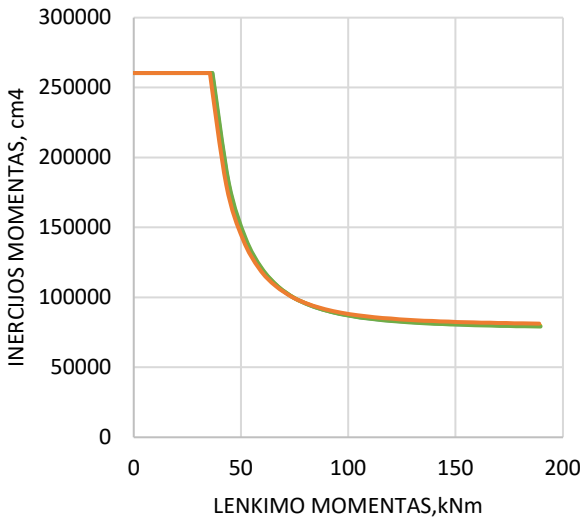
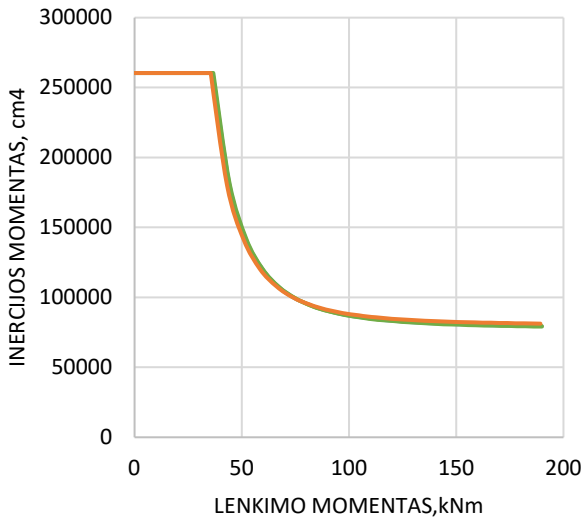
Iš grafikų, pateiktų 19 lentelėje, matoma, kad didėjant perdirbtų užpildų kiekiui pleišėjimo momentas yra mažesnis. Takumo momentas išlieka panašus, nepriklausomai nuo perdirbtų užpildų kiekio. Inercijos momentas staigiai mažėja sijose su 100 % perdirbtų užpildų, tačiau ties takumo momento reikšme inercijos momentas išlieka didesnis, nei sijose su 0 % ar 50 % perdirbtų užpildų. Inercijos momentas sijose su 50 % perdirbtų užpildų taip pat pradeda mažėti ankščiau, bet taip pat, kaip ir sijose su 100 % perdirbtų užpildų inercijos momentas ties takumo momentu yra didesnis nei sijose su 0 % perdirbtų užpildų.

20 lentelė galima matyti, kad inercijos momento – lenkimo momento grafikai, prie didesnio vandens/cemento santykio, darosi labai panašūs. Tai ypač akivaizdu, kai vandens/cemento santykis yra 0.65. Šiuose grafikuose, kaip ir pateiktuose 19 lentelėje, matomos panašios tendencijos. Sijos didėjant perdirbtų užpildų kiekiui pleišėjimo momentą pasiekia ankščiau. Pleišėjimą ankščiau, nei sijose be perdirbto užpildo, lemia tai, kad kinta neutraliosios ašies padėtis, dėl mažesnio tamprumo modulio sijose su daugiau perdirbto betono užpildų.

19 lentelė. Inercijos momentų - lenkimo momentų palyginimas (Breccolotti et al., 2015),(Martínez-Lage et al., 2012)



20 lentelė. Inercijos momentų - lenkimo momentų palyginimas (Belén et al., 2010)

(pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (matavimas poslinkių jutikliais)	(pagal Belén et al., 2010), kai $V/C=0.5$ (matavimas tenzodavikliais)
 INERCIJOS MOMENTAS, cm⁴ LENKIMO MOMENTAS, kNm 0 % perdirbtų užpildų 20 % perdirbtų užpildų 50 % perdirbtų užpildų 100 % perdirbtų užpildų	 INERCIJOS MOMENTAS, cm⁴ LENKIMO MOMENTAS, kNm 0 % perdirbtų užpildų 20 % perdirbtų užpildų 50 % perdirbtų užpildų 100 % perdirbtų užpildų
Pagal (Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (matavimas poslinkių jutikliais)	Pagal (Belén et al., 2010), kai $V/C=0.65$ (matavimas tenzodavikliais)
 INERCIJOS MOMENTAS, cm⁴ LENKIMO MOMENTAS, kNm 0 % perdirbtų užpildų 20 % perdirbtų užpildų 50 % perdirbtų užpildų 100 % perdirbtų užpildų	 INERCIJOS MOMENTAS, cm⁴ LENKIMO MOMENTAS, kNm 0 % perdirbtų užpildų 20 % perdirbtų užpildų 50 % perdirbtų užpildų 100 % perdirbtų užpildų

3.3 Skyriaus išvados

Atlikus skaičiavimus galima daryti tokias išvadas:

1. Didinant perdirbtų užpildų kiekį pleišėjimo momentas mažėja 6 – 9 % (50 % perdirbtų užpildų) ir 3 – 22 % (100 % perdirbtų užpildų), bet laikomoji galia išlieka beveik tokia pat: keičiant užpildų kiekį ji mažėja nuo 1 % (50 % perdirbtų užpildų) ir 2 % (100 % perdirbtų užpildų).
2. Lenkimo momentų reikšmių, apskaičiuotų pagal EC2, ACI-318 ir eksperimento duomenis, reikšmės yra panašios, išskyrus pleišėjimo momentą. Didžiausias skirtumas yra tarp pleišėjimo momento apskaičiuoto pagal ACI-318 ir pleišėjimo momentų apskaičiuotų pagal EC2 ir eksperimentinių reikšmių. Pleišėjimo momentas, apskaičiuotas pagal ACI-318, lyginant su eksperimentiniu yra iki 28 % mažesnis. Pagal EC2 apskaičiuotos pleišėjimo momento ir eksperimentinės reikšmės sutapo. Laikomosios galios, apskaičiuotos pagal EC2 ir ACI-318, atitinkamai yra mažesnės 0 – 4 % ir 1 %, nei eksperimentinės reikšmės
3. Didesnis skirtumas pastebimas lyginant įlinkių reikšmes. Eksperimentinės įlinkių reikšmės ties pleišėjimo momentu, lyginant su pagal EC2 ir ACI-318 apskaičiuotomis reikšmėmis (naudojant 50 % perdirbtų užpildų), atitinkamai yra 9 – 42 % ir 23 – 56 % didesnės.
4. Eksperimentiniai įlinkiai didėja didinant perdirbtų užpildų kiekį. Ties pleišėjimo momentu, eksperimentiniai įlinkiai yra 1,04 - 1,15 karto (50 % perdirbtų užpildų) ir 1,12 – 1,26 karto (100 % perdirbtų užpildų) didesni, nei sijose be perdirbtų užpildų. Prie takumo momento eksperimentiniai įlinkiai padidėja 1,02 – 1,04 karto (50 % perdirbtų užpildų) ir 1,05 – 1,15 karto (100 % užpildų). Eksperimentiniai įlinkiai yra didesni naudojant vis didesnę kiekį perdirbtų užpildų, nes lenkiamasis standumas mažėja dėl mažesnio tamprumo modulio naudojant perdirbtus užpildus.
5. Sijose su perdirbtu betonu mažesnę pleišėjimo momentą, nei sijose be perdirbto užpildo, lemia neutraliosios ašies padėties ir betono gniuždomojo stiprio kitimas kitimas. Šis pokytis yra dėl mažesnio tamprumo modulio sijose su daugiau perdirbto betono užpildų.
6. Kuo daugiau perdirbtų užpildų naudojama tuo inercijos momentas pradeda mažėti anksčiau, tokį elgesį nulemia neutralios ašies padėties pokytis, dėl mažesnio tamprumo modulio.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Naudojant vandens/cemento santykį galima reguliuoti betono su perdirbtais užpildais gniuždomąjį stiprį;
2. Perdirbtų užpildų betonas yra lengvesnis nei įprastų užpildų betonas, dėl mažesnio perdirbtų užpildų tankio;
3. Didinant perdirbtų užpildų kiekį lenkiamasis ir gniuždomasis stipris mažėja;
4. Betono, pagamintame iš perdirbtų betono užpildų, didinant vandens/cemento santykį mažėja mechaninės savybės (gniuždomasis ir tempiamasis stipris, tamprumo modulis) ir didėja slankumas;
5. Perdirbtų užpildų betonas gali pasiekti panašias savybes kaip betono su natūraliais užpildais, kai yra ribojamas perdirbtų užpildų kiekis;
6. Perdirbto betono bandiniuose didesnės deformacijos pasiekiamos prie tų pačių įtempių, lyginant su įprastojo betono bandiniais;
7. Galima suprojektuoti siją su perdirbtais užpildais, tenkinančią tinkamumo ribinio būvio sąlygas, kai ribiniai įlinkiai $1/250$;
8. Naudojant didesnę kiekį cemento betono su perdirbtais užpildais konstrukcija gali pasiekti tokį pat gniuždomąjį stiprį kaip ir įprasto betono konstrukcija;
9. Pleišėjimas nebuvo skaičiuojamas, tačiau pagal mokslininko Sato ir kt. (Sato et al., 2007) tyrimus perdirbto betono sijos plyšio plotis yra iki 1,15 - 1,37 karto didesnis nei įprastojo betono sijoje. .
10. Didėjant perdirbtų užpildų kiekiui betone pleišėjimo momentas mažėja 6 – 9 % (50 % perdirbtų užpildų) ir 3 – 22 % (100 % perdirbtų užpildų). Laikomosios galios sumažėjimas yra labai mažas - 1 % (50 % perdirbtų užpildų) ir 2 % (100 % perdirbtų užpildų).
11. Lenkimo momentų reikšmių, apskaičiuotų pagal EC2, ACI-318 ir eksperimento duomenis, skirtumai yra ganėtinai maži, išskyrus pleišėjimo momentą pagal ACI-318. Šis momentas yra iki 28 % mažesnis nei eksperimentinis. Pagal EC2 apskaičiuotos pleišėjimo momento reikšmės sutapo su eksperimentinėmis. Laikomosios galios, apskaičiuotos pagal EC2 ir ACI-318, atitinkamai yra mažesnės 0 – 4 % ir 1 %, nei eksperimentinės reikšmės.
12. Lyginant su pagal EC2 ir ACI-318 apskaičiuotomis reikšmėmis, eksperimentinės įlinkių reikšmės ties pleišėjimo momentu atitinkamai yra 9 – 42 % ir 23 – 56 % didesnės.
13. Eksperimentiniai įlinkiai didesni didėjant perdirbtų užpildų kiekiui, nes lenkiamasis standumas mažėja dėl mažesnio tamprumo modulio naudojant perdirbtus užpildus. Ties pleišėjimo momentu, eksperimentiniai įlinkiai yra 1,04 - 1,15 karto (50 % perdirbtų užpildų) ir 1,12 – 1,26 karto (100 % perdirbtų užpildų) didesni, nei sijose be perdirbtų užpildų. Prie takumo momento

eksperimentiniai įlinkiai padidėja 1,02 – 1,04 karto (50 % perdirbtų užpildų) ir 1,05 – 1,15 karto (100 % užpildų).

14. Mažesni, nei sijose be perdirbto užpildo, pleišėjimo momentą perdirbto betono sijose lemia neutraliosios ašies padėtis ir gniuždomojo betono stiprio kitimas. Šie parametrai kinta dėl to, kad naudojant daugiau perdirbtų užpildų mažėja betono tamprumo modulis.
15. Kuo daugiau perdirbtų užpildų naudojama tuo inercijos momentas pradeda ankščiau mažėti, tai nulemia neutralios ašies padėtis pokytis, dėl mažesnio tamprumo modulio.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ACI Committee 318., & American Concrete Institute. (2011). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary*. American Concrete Institute.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 49–92). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.003>
- Belén, G. F., Fernando, M. A., Diego, C. L., & Sindy, S. P. (2010). Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2335–2342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.031>
- Branson, D. E. (1965). *Instantaneous and Time-Dependent Deflections on Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams. HPR Report No.7*.
- Breccolotti, M., Roscini, F., & Federico Bonfigli, M. (2015). Investigation of stress-strain behavior of recycled aggregate concrete under cyclic loads. In *Environmental Engineering and Management Journal* (Vol. 14, Issue 7). <https://doi.org/10.30638/eemj.2015.166>
- da Rocha, C. G., & Sattler, M. A. (2009). A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(2), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.004>
- David Chipperfield Architects. (2008). *Kunsthau Zurich Zurich, Switzerland*. <https://davidchipperfield.com/projects/kunsthau-zurich>
- Eurostat. (2018a). *ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal ekonominės veiklos rūšį*.
- Eurostat. (2018b). *ES sukuriamų atliekų pasiskirstymas pagal jų rūšį*.
- Jian, S. M., Wu, B., & Hu, N. (2021). Environmental impacts of three waste concrete recycling strategies for prefabricated components through comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129463>
- Knaack, A. M., & Kurama, Y. C. (2015). Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *Journal of Structural Engineering*, 141(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001118](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001118)
- Lendager Group. (2015). *Pelican Self Storage Amager*. <https://dac.dk/en/knowledgebase/architecture/pelican-self-storage-amager-unites-concrete-and-sustainability/>
- Lendager group. (2018). *Upcycle studios*. <https://lendager.com/project/upcycle-studios/>

- Li, C., Liu, T., Fu, H., Zhang, X., Yang, Y., & Zhao, S. (2021). Test and evaluation of the flexural properties of reinforced concrete beams with 100 % recycled coarse aggregate and manufactured sand. *Buildings*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/buildings11090420>
- Li, X., Lv, X., Zhou, X., Meng, W., & Bao, Y. (2022). Upcycling of waste concrete in eco-friendly strain-hardening cementitious composites: Mixture design, structural performance, and life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129911>
- Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2022). *Valstybinis atliekų prevencijos ir tvarkymo 2021-2027 metų planas*. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.164386/asr>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2005). *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės (LST EN 1992-1-1:2005)*.
- Ma, Q. (1998). *Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide*. NASA/GISS. https://web.archive.org/web/20050112211604/http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/
- Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. In *Construction and Building Materials* (Vol. 37, pp. 171–176). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.045>
- Maruyama, I., Masaru, S., Sogabe, T., Sato, R., & Kawai, K. (2004). *Flexural properties of reinforced recycled concrete beams*. <https://www.researchgate.net/publication/237548433>
- NASA/GISS. (2022). *Global land-ocean temperature index*. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- Sato, R., Maruyama, I., Sogabe, T., & Sogo, M. (2007). Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 43–61. <https://doi.org/10.3151/jact.5.43>
- Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>
- Topçu, I. B., & Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307–1312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- Vintimilla, C., & Etxeberria, M. (2023). Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-type a used in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131273>
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y., & Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). In *Construction and Building Materials* (Vol. 31, pp. 364–383). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>

- Xiao, J., Wang, C., Ding, T., & Akbarnezhad, A. (2018a). A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 199, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>
- Xiao, J., Wang, C., Ding, T., & Akbarnezhad, A. (2018b). A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 199, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>