

<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	Armuto lengvojo betono elementų su plastiko atliekų užpildais tyrimai										
Autorius	Kipras Zinkevičius										
Vadovas	Darius Bačinskas										
<table><tr><td></td><td>Kalba: lietuvių</td></tr></table>			Kalba: lietuvių								
	Kalba: lietuvių										
Anotacija Tiriamajame darbe yra sudaromas lengvasis betonas su perdirbto plastiko užpildais, nagrinėjamos jo fizikinės ir mechaninės savybės lyginamos su įprastu lengvuju betonu ir kitu lengvuju betonu su perdirbtais užpildais. Atliktas skaičiavimų, atliktų su baigtinių elementų programa ATENA, rezultatų palyginimas su VILNIUS TECH mokslininkų atlikto eksperimento rezultatais. Suprojektuoti realios konstrukcijos normalinis ir įstrižasis pjūviai naudojant sudarytą mišinį, įvertinamas sudaryto mišinio tinkamumas projektuojant realias konstrukcijas.											
Prasminiai žodžiai: Gelžbetonis, lengvasis betonas, užpildas, ATENA, perdirbtos atliekos											

<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">Analysis of Lightweight Reinforced Concrete Elements with Plastic Waste Aggregates</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Kipras Zinkevičius</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Darius Bačinskas</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Analysis of Lightweight Reinforced Concrete Elements with Plastic Waste Aggregates			Author	Kipras Zinkevičius			Academic supervisor	Darius Bačinskas		
Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Analysis of Lightweight Reinforced Concrete Elements with Plastic Waste Aggregates																		
Author	Kipras Zinkevičius																		
Academic supervisor	Darius Bačinskas																		
			<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, a lightweight concrete with recycled plastic aggregate was made, its physical and mechanical properties are compared with normal lightweight concrete and other lightweight concrete with recycled aggregate. A comparison of the results of the calculations performed with the finite element program ATENA with the results of the experiment performed by VILNIUS TECH scientists was performed. The normal and diagonal sections of the real structure are designed using the prepared mixture, the suitability of the prepared mixture for the design of real structures is evaluated. </td> </tr> </table>				Annotation In this master's thesis, a lightweight concrete with recycled plastic aggregate was made, its physical and mechanical properties are compared with normal lightweight concrete and other lightweight concrete with recycled aggregate. A comparison of the results of the calculations performed with the finite element program ATENA with the results of the experiment performed by VILNIUS TECH scientists was performed. The normal and diagonal sections of the real structure are designed using the prepared mixture, the suitability of the prepared mixture for the design of real structures is evaluated.															
Annotation In this master's thesis, a lightweight concrete with recycled plastic aggregate was made, its physical and mechanical properties are compared with normal lightweight concrete and other lightweight concrete with recycled aggregate. A comparison of the results of the calculations performed with the finite element program ATENA with the results of the experiment performed by VILNIUS TECH scientists was performed. The normal and diagonal sections of the real structure are designed using the prepared mixture, the suitability of the prepared mixture for the design of real structures is evaluated.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: Reinforced concrete, lightweight concrete, aggregate, ATENA, recycled waste </td> </tr> </table>				Keywords: Reinforced concrete, lightweight concrete, aggregate, ATENA, recycled waste															
Keywords: Reinforced concrete, lightweight concrete, aggregate, ATENA, recycled waste																			



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Kipras Zinkevičius

**ARMUOTO LENGVOJO BETONO ELEMENTŲ SU PLASTIKO
ATLIEKŲ UŽPILDAIS TYRIMAI**

**ANALYSIS OF LIGHTWEIGHT REINFORCED CONCRETE
ELEMENTS WITH PLASTIC WASTE AGGREGATES**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

TURINYS

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS	3
ĮVADAS	6
1. PERDIRBTŲ UŽPILDŲ PANAUDOJIMO LENGVOJO BETONO MIŠINIAMS APŽVALGA	8
1.1. Lengvojo betono mišinių mechaninės ir fizikinės savybės	8
1.2. Užpildai ir jų taikymo sritys	11
1.2.1. Žemės ūkio atliekų užpildai	12
1.2.2. Komunalinių ir kietųjų atliekų užpildai	15
1.3. Atsparumas ugniai.....	19
1.4. Skyriaus apibendrinimas	23
2. LENGVOJO BETONO MIŠINIŲ RUOŠIMAS.....	25
2.1. Bendrosios žinios ir sudedamosios dalys	25
2.2. Bandymų metodika	25
2.3.1 Granuliometrinės sudėties nustatymas	25
2.3.2. Bleino bandymas	26
2.3.3. Mišinio be stambiojo užpildo sudėties kūrimas	28
2.3.4. Lengvojo betono mišinio sudarymas	31
2.3.5. Vandens įmirkio bandymai	32
2.3.6. Kalorimetrijos bandymai	32
2.4. Bandymų rezultatai	33
2.4.1 Granuliometrinė sudėtis	33
2.4.2. Bleino bandymas	35
2.4.3. Kalorimetrijos bandymas	36
2.4.4. Vandens įgeriamumo bandymas	37
2.4.5. Mišinio be lengvojo užpildo sudarymas	39
2.4.6. Lengvojo betono mišinio sudarymas	39
2.5. Skyriaus apibendrinimas	41
3. ARMUOTO LENGVOJO BETONO SIJŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪSENOS SKAITINIAI TYRIMAI	42
3.1. Skaitiniam modeliavimui naudojami duomenys.....	42
3.2. Modeliavimas baigtinių elementų programa ATENA	43
3.3. Modeliavimo rezultatai.....	45
3.3. Lengvojo betono mišinio taikymas rekonstruojamo viaduko perdangai.....	49
3.4. Skyriaus apibendrinimas	54
BENDROSIOS IŠVADOS	55
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	57

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Betono tankio klasių klasifikacija pagal LST EN 1992-1-1:2007	9
1.1 pav. Užpildo poveikis įtempių pasiskirstymui lengvajame ir įprastame betone (Bogas & Gomes, 2013).....	11
1.2 pav. Aliejinių palmių lukštai, likę po aliejaus gamybos (TBI, 2023)	12
1.3 pav. Lengvasis betonas su kokosu kaip stambiuoju užpildu (Gunasekaran & Pennaras, 2017).....	13
1.4 pav. Grikių lukštai (ComfyComfy, 2023)	13
1.5 pav. (I) kamštiena 0–4 mm; (II) kamštiena 4–8 mm; (III) kamštiena 8–16 mm; (IV) betonas su kamštienos užpildu (Junaid et al., 2022).....	14
1.6 pav. Alyvuogių atliekos (Olive Biomass, 2023).....	15
1.7 pav. Nuotekų dumblas („Sewage sludge“, 2014)	15
1.8 pav. Susmulkinti padangų trupiniai (Rao, 2018)	17
1.9 pav. Statybos ir griovimo atliekų užpildai (Mohammed et al., 2015).....	19
1.10 pav. Palyginimas tarp gniuždomųjų stiprių pagal įvairias skaičiavimo metodikas ir eksperimentus esant skirtingoms temperatūroms (Bastami et al., 2010)	20
1.11 pav. Palyginimas tarp gniuždomųjų stiprių pagal įvairias skaičiavimo metodikas ir eksperimentus esant skirtingoms temperatūroms (Bastami et al., 2010).....	21
1.12 pav. Lengvojo betono bandinių mechaninių savybių apžvalga po aukštos temperatūrinės apkrovos (Křížová et al. 2022)	21
1.13 pav. Gniuždomasis stipris esant skirtingoms temperatūroms (Powęzka et al., 2020)	23
2.1 pav. „Haver EML 200 digital T“ vibracinis sietas (Directindustry, 2023)	26
2.2 pav. „Cilas Particle Size Analyzer 1090“ lazerinis granulimetras (Directindustry, 2023)	26
2.3 pav. Bleino prietaisas (KTU, 2023)	27
2.4 pav. Automatizuota maišyklė (Intertechnika, 2023)	28
2.5 pav. 160x40x40 mm formos bandiniams (Controls-Group, 2023).....	29
2.6 pav. Hidraulinis presas „Tinius Olsen H200KU“ (Scribd, 2023).....	29
2.7 pav. Stovas lenkimo bandymui atlikti (Controls-Group, 2023).....	29
2.8 pav. Stovas gniuždymo bandymui atlikti (Controls-Group, 2023).....	30
2.9 pav. Sklidaus mišinio sklidumo bandymas.....	31
2.10 pav. Kalorimetras (Sholonchem, 2023).....	33
2.1 lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis	34

2.11 pav. Cemento granulimetrinė sudėtis	34
2.2 lentelė. Cemento granulimetrinė sudėtis	35
2.3 lentelė. Bleino bandymo rezultatai.....	35
2.4 lentelė. Kalorimetrijos bandymui naudotų mišinių sudėtis	36
2.12 pav. Tam tikru metu išsiskyrusios šilumos kiekis.....	36
2.13 pav. Bendras išsiskyrusios šilumos kiekis	37
2.5 lentelė. Vandens įgeriamumo bandymui naudoti mišiniai	37
2.14 pav. Vandens įgeriamumo bandymų rezultatai.....	38
2.6 lentelė. Dydžių paaiškinimas	38
2.7 lentelė. Mišinių be lengvojo užpildo sudėtis	39
2.15 pav. Gniuždomasis ir lenkiamasis stipris	39
2.8 lentelė. Mišinių su lengvuju užpildu sudėtis.....	40
2.16 pav. Bandinių lenkiamasis stipris po 7 ir po 28 parų	40
2.17 pav. Bandinių gniuždomasis stipri po 7 ir po 28 parų.....	40
3.1 lentelė. Skaitiniam modeliavimui naudoti parametrai	42
3.1 pav. Sijų geometrija ir armatūros išdėstymas	43
3.2 pav. Sijos apkrovimo schema	43
3.3 pav. D. Rumšio ir A. Sokolovo medžiagų modeliai (Rumšys, 2019), (Sokolov, 2010)	44
3.4 pav. Sijų baigtinių elementų modeliai.....	44
3.5 pav. Charakteringasis dydis	45
3.6 pav. CSPA sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu.....	45
3.7 pav. CSPA sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu.....	46
3.8 pav. CSKE sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu	46
3.9 pav. CSKE sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu	47
3.10 pav. CP sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu.....	47
3.11 pav. CP sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu.....	48
3.2 lentelė. Sijų kreivių palyginimas.....	48
3.12 pav. Skersinis intarpinės perdangos pjūvis.....	49

3.13 pav. Sijos geometrija	49
3.14 pav. Sijos parametrų suvedimo langas TILTAI 2000	50
3.15 pav. Skerpsjūvio armatūra ir geometrija	50
3.16 pav. Sumodeliuota sija programoje ATENA.....	51
3.17 pav. ATENA gauta momentų – įlinkių diagrama	51
3.18 pav. a) įlinkiai nuo nuolatinės charakteristinės apkrovos, b) įlinkiai nuo suminės charakteristinės apkrovos	52
3.19 pav. a) įtrūkiai nuo nuolatinės charakteristinės apkrovos, b) įtrūkiai nuo suminės charakteristinės apkrovos	53

IVADAS

Problemos formulavimas

Gelžbetonis, dėl ilgaamžiškumo ir sąlyginai mažos eksploatacijos ir statybos kainos yra viena populiariausių medžiagų statybose, o statyba yra vienas plačiausiai išvystytų sektorių visame pasaulyje. Dėl to reikalingas pagaminti gelžbetonio kiekis gali siekti net 30 milijardų tonų. Betono gamybai reikalingų medžiagų, daugiausia skaldos, kuri naudojama stambiesiems užpildams, ir cemento, kuris naudojamas kaip smulkusis užpildas, gavyba sugeneruoja milijonus tonų anglies dvideginio. Norint sumažinti betono gamybos sukuriamą žalą aplinkai, galima mažinti gaminamo betono kiekį, keičiant įprastąjį betoną į lengvąjį, taip mažinant reikalingą betono kiekį savajam svoriui atlaikyti, arba keičiant labiausiai aplinkai kenkiančius užpildus į ekologiškus lengvuosius užpildus.

Darbo aktualumas

Žmonės pasaulyje sugeneruoja apie 2 milijardus tonų atliekų, šis skaičius kasmet išauga apie 5 procentus. Apie 40 procentų visų šių atliekų yra neperdirbama ir kaupiama sąvartynuose, kas yra laikoma pačiu neekologiškiausiu atliekų apdirbimu. Jei betono stambiuosius užpildus pakeistume perdirbtomis atliekomis, o smulkiuosius – po atliekų deginimo likusiais pelenais, būtų sutaupoma išlaidų akmens skaldos ir cemento gavybai bei sumažinamas nerūšiuojamų atliekų kiekis.

Tyrimo objektas

Darbe nagrinėjamas lengvasis betonas su perdirbtais užpildais. Tyrinėjama betono sudėtis. Atliktas armuotų lengvojo betono sijų skaitinis modeliavimas ir palyginimas su eksperimentiniais tyrimais.

Darbo tikslas

Pagrindinis tyrimų tikslas – pasiūlyti konstrukciniam taikymui tinkamas lengvojo betono su perdirbto plastiko užpildais sudėtis bei atlikti iš šio betono pagamintų armuotų sijų įtempių ir deformacijų būsenos skaitinę analizę.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo suformuluoti tokie uždaviniai:

- 1) Atlikti lengvųjų užpildų ir lengvojo betono mechaninių bei fizikinių savybių apžvalgą.

- 2) Sukurti lengvojo betono su plastiko užpildais mišinio sudėtį ir atlikti jo savybių eksperimentinius tyrimus.
- 3) Gautų mišinių savybes palyginti su kitų lengvojo betono mišinių savybėmis.
- 4) Gautus mišinius panaudoti armuotų lenkiamųjų elementų įtempių ir deformacijų būsenos skaitinėje analizėje, gautus rezultatus palyginti su eksperimentiniais tyrimais gautais rezultatais.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti eksperimentiniai, analitiniai ir skaitiniai metodai.

Darbo praktinė reikšmė

Tyrimų metu buvo sukurta lengvojo betono sudėtis ir atlikti skaitiniai tyrimai. Ateityje atlikus išsamesnius tyrimus, sukurti lengvojo betono mišiniai galės būti taikomi realioms konstrukcijoms projektuoti.

Darbo aprobavimas

Atliktų tyrimų rezultatai apibendrinti 1 publikacijoje bei pristatyta jaunųjų mokslininkų konferencijoje:

1. Zinkevičius, K., Rumšys, D., Bačinskas, D., Spudulis, E., & Malaiškienė, J. (2022). Lengvojo betono su perdirbto polietileno ir pūsto molio užpildais savybių palyginimas. Inžinerinės ir Edukacinės Technologijos, 2022, Nr. 1, p. 10-17. Kaunas: Kauno technikos kolegija.
2. Zinkevičius, K. 2023. Lengvojo betono su plastiko užpildais savybių tyrimai. 26-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija "Mokslas - Lietuvos ateitis", 2023 m. balandžio 24 d. VILNIUS TECH Statybos fakultetas.

Padėka

Magistro darbo autorius dėkoja Statybinių medžiagų mokslo instituto mokslo darbuotojui Edmundui Spuduliui ir vyresniajai mokslo darbuotojai Jurgitai Malaiškienei už konsultacijas ir pagalbą rengiant magistro darbą. Autorius taip pat dėkoja VILNIUS TECH Statinių ir tiltų konstrukcijų instituto vyresniajam mokslo darbuotojui Aleksandr Sokolov už pagalbą rengiant magistro darbą.

1. PERDIRBTŲ UŽPILDŲ PANAUDOJIMO LENGVOJO BETONO MIŠINIAMS APŽVALGA

Didžioji dalis visų transporto tinklų infrastruktūros statinių yra gelžbetoniniai. Gelžbetonis plačiai taikomas infrastruktūros statinių statyboje nes tai sąlyginai pigi, ilgaamžiška ir patvari medžiaga. Vis dėlto gelžbetoninės konstrukcijos pasižymi dideliu savuoju svoriu, kuris sudaro didžiąją dalį statinių nuolatinių apkrovų, kas padidina eksploatacijos ir statybos kainas. Statybos sektorius yra vienas labiausiai išvystytų sektorių visame pasaulyje, o gelžbetonis – plačiausiai statybose naudojama medžiaga, kurios kasmet pagaminama milijardai tonų. Tačiau, betono gamybos ir jo sudedamųjų dalių gavybos metu išskiriamas CO₂ kiekis beveik prilygsta pagaminto betono kiekiui, kas kelia didelę grėsmę žemės ekologijai. Vienas galimų būdų sumažinti betono gamybos keliamą grėsmę žemės ekologijai ir sumažinti konstrukcijų kainą yra naudoti lengvąjį betoną, kuris dėl savo mažesnio tankio, sumažina reikalingą betono kiekį tokios pačios laikomosios galios elementams pagaminti. Kitas būdas sumažinti stambiųjų ir smulkiųjų užpildų gavybos metu išskiriamą CO₂ kiekį – pakeisti įprastus užpildus į iš perdirbtų atliekų pagamintus taip pašalinant įprastų užpildų gavybos poreikį.

Visame pasaulyje kasmet sugeneruojama apie 2 milijardus tonų atliekų, šis kiekis kasmet išauga apie 5 % ir 33 % visų atliekų yra neperdirbamos, kaupiamos sąvartynuose. Apie 12 % visų atliekų sudaro plastikas, 5 % stiklas, 2 % guma ir oda ir 44 % maisto ir augalų atliekos, visos šios sritys sudaro 63 % visų atliekų. (Kaza et al., 2018)

Dalį neperdirbamų atliekų panaudojus tokio milžiniško masto sektoriuje kaip statyba sumažintų gelžbetonio sukuriamą ekologinę žalą ir palengvintų sąvartynų našą. Taip pat perdirbtų atliekų panaudojimas vietoje užpildų sumažintų gelžbetonio kainą.

1.1. Lengvojo betono mišinių mechaninės ir fizikinės savybės

Tankis, stipris, valkšnumas, susitraukimas, ilgaamžiškumas, tampriosios lengvojo užpildo savybės, apdirbamumas ir vandens įgeriamumas yra svarbios betono mechaninės ir fizikinės savybės, nuo kurių priklauso ar betonas yra priimtinas kaip konstrukcinė medžiaga.

Tankis

Po apdirbimo, medžiagos tankis ir stiprumas yra dvi savybės, geriausiai apibūdinančios konstrukcinį lengvąjį betoną. Visada norima pasiekti didžiausią stiprio ir tankio santykį. Normose nurodomas didžiausias leistinas betono tankis (2000 kg/m³), kuriam esant betonas dar būtų laikomas lengvučiu. Apatinės tankio ribos nėra, todėl labai porėti lengvieji betonai tenkina

tankio reikalavimą, bet gali netenkinti minimalaus lengvojo betono stiprio reikalavimo (17 MPa) po 28 parų kietėjimo.

Smėlio kiekio reguliavimas padeda padidinti gniuždomąjį stiprį, tačiau tai gali padidinti betono tankį ir sumažinti apdirbamumą dėl didesnio reikalingo vandens kiekio. 1.1 lentelėje pateiktos lengvojo betono tankio klasės, aprašytos LST EN 1992-1-1:2007 normose.

1.1 lentelė. Betono tankio klasių klasifikacija pagal LST EN 1992-1-1:2007

Tankio klasė		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Tankis (kg/m ³)		801 – 1000	1001 – 1200	1201 – 1400	1401 – 1600	1601 – 1800	1801 – 2000
Tankis (kg/m ³)	Nearmuotasis betonas	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Gelžbetonis	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Gniuždomasis ir tempiamasis stipris

Įprastas projektinis lengvojo betono gniuždymo stipris po 28 dienų yra 20–35 MPa. Taip pat naudojant aukštos klasės cemento mišinį ir aukštos kokybės smulkius lengvuosius užpildus (didžiausias dalelės dydis 9–13 mm) galima pagaminti betoną, kurio stiprumas nuo 40 iki 50 MPa. Kontroliuojant mikroporingumą, naudojant lengvąjį užpildą galima pagaminti 70–75 MPa gniuždomojo stiprio betoną, kurio tankis nuo 1840 iki 2000 kg/m³.

Didinant gniuždomąjį stiprį tiek įprasto, tiek lengvojo betono tempiamasis stipris mažėja, betonas tampa trapesnis. Išdžiovintų bandinių bandymai parodė, kad betono savybės labai priklauso nuo drėgmės, taip pat, kitaip nei įprastam betone, lengvojo betono silpniausia vieta dažniausiai yra užpildas, kai įprastame betone – terpė tarp užpildo ir skiedinio.

Lengvojo betono stipris gniuždant nustatomas taip pat kaip ir paprasto betono – gniuždant standartinius 150×150×150 mm kubus ir Ø150×300 mm cilindrų. Lengvojo betono tempiamasis stipris apskaičiuojamas taip pat kaip įprasto betono, bet dauginama iš koeficiento η_1 , kuris priklauso nuo betono tankio. Formulės nurodytos LST EN 1992-1-1:2007:

$$f_{lctm} = f_{ctm}\eta_1; \quad (1.1)$$

čia

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{lck}^{(2/3)}, \text{ kai betonas } \leq \text{LC50/55}, \quad (1.2)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln[1 + (f_{lcm}/10)], \text{ kai betonas } > \text{LC50/55}, \quad (1.3)$$

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200. \quad (1.4)$$

ρ – lengvojo betono tankis, kg/m³.

$$f_{lcm} = f_{lck} + 8 \quad (1.5)$$

Valkšnumas ir susitraukimas

Lengvajame betone palyginus su įprastu betonu, vanduo cirkuliuoja lengviau, todėl betonui kietėjant padidėja susitraukimas džiūstant ir daug didesnis valkšnumas. Tai rodo, kad mažesnio stiprumo ir mažesnio tamprumo modulio betoną labiau veikia valkšnumo deformacija nei susitraukimas betono kietėjimo metu.

Dėl palyginti mažo lengvojo betono tempiamojo stiprio (2–3 MPa), betonui džiūstant jame gali atsirasti įtrūkių. Šią tendenciją iš dalies atsveria mažesnis tamprumo modulis ir didesnis valkšnumas, dėl kurio lengvasis betonas geriau deformuojasi (tempiasi). Be to, betono valkšnumas ir susitraukimas tiek lengvo, tiek normalaus svorio betonams tikrose konstrukcijose yra daug mažesnis nei laboratorinių tyrimų metu gautos vertės. Pavyzdžiui, projektuojant tiltus naudojant lengvąjį betoną, susitraukimo ir valkšnumo vertės, gautos laboratorijoje, sumažėja dėl konstrukcinio elemento dydžio, dėl aplinkos drėgmės ir dėl konstrukcijos įtvirtinimo.

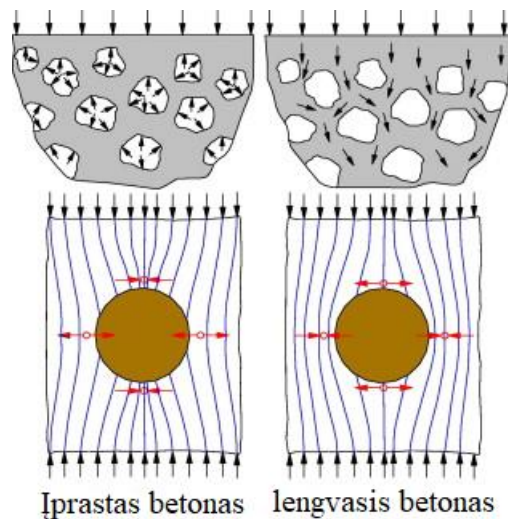
Ilgamžiškumas

Lengvojo betono atsparumas užšalimo/atšilimo ciklams yra panašus į normalaus svorio betono atsparumą. Oro tarpai betone yra naudingi, kai užpildai yra prisotinti vandeniu. Hidraulinis slėgis, atsirandantis dėl vandens išstūmimo iš užpildų, gali palengvinti oro judėjimą cemento skiedinyje, o tai padeda išvengti betono pažeidimo. Nepaisant lengvojo betono palyginti mažo drėgmės įgeriamumo jo ilgamžiškumas agresyvioje cheminėje aplinkoje yra pakankamas. Pagrindinė lengvojo betono mažo pralaidumo ir puikaus patvarumo priežastis yra ta, kad jis yra atsparus mikroįtrūkimų formavimuisi jungtyse tarp lengvojo užpildo ir cemento skiedinio. Taip yra todėl, kad šios medžiagos turi panašius tamprumo modulius. Pereinamoji zona paprastai yra tanki ir stipri.

Lengvi užpildai yra porėti ir trapesni nei įprastos uolienos ir mineralai. Dėl šios priežasties betonas, sudarytas iš lengvųjų užpildų, lengviau nusidėvi. Natūralaus smėlio pakeitimas smulkiu lengvu užpildu pagerina atsparumą dilimui. Lengvasis betonas geriau išlaiko šilumą nei įprastas betonas. Taip yra dėl mažesnio betono užpildų tankio, be to, atsparumas ugniai yra daug geresnis.

Tamprosios lengvojo užpildo savybės

Dėl gero lengvųjų užpildų ir rišamosios medžiagos sukibimo, terpėje tarp užpildo ir skiedinio neatsiranda ankstyvų mikroįtrūkimų (žr. 1.1 pav.). Taip yra dėl tiesinės įtempių ir deformacijų priklausomybės.



1.1 pav. Užpildo poveikis įtempių pasiskirstymui lengvajame ir įprastame betone (Bogas & Gomes, 2013)

Lengvojo betono tamprumo modulis gali būti išreikštas kaip priklausomybė nuo gniuždomojo stiprio (žr. (1.5) ir (1.6) formules). Tačiau dėl gero sukibimo su užpildais lengvasis betonas vientisesnis. Užpildo tamprumo modulis turi didesnę įtaką betono tamprumo moduliui lyginant su normalaus svorio betonu. Kadangi lengvojo užpildo tamprumą veikia užpilduose esančios tuštumos ir tiksliai apibrėžtas medžiagos tankis, lengvojo užpildo betono tamprumo modulis gali būti išreikštas betono tankio ir gniuždymo stiprio funkcija. LST EN 1992-1-1:2007 pateikta lengvojo betono tamprumo modulio skaičiavimo formulė:

$$E_{lcm} = 22 \cdot (f_{lcm}/10)^{0,3} \cdot (\rho/2200)^2, \quad (1.5)$$

čia

f_{lcm} – vidutinis gniuždomasis cilindrinis stipris, MPa,

ρ – betono tankis, kg/m³.

Vandens įgeriamumas

Lengvasis betonas sugeria daugiau vandens nei įprastas betonas. Taip yra dėl porų lengvuosiuose užpilduose. Lengvasis užpildas po įmaišymo į betono mišinį ilgą laiką sugeria vandenį. Kartais dėl didelio įgerto vandens kiekio susilpnėja betono medžiagų sukibimas, o tai sumažina betono gniuždomąjį stiprį. Tokiu atveju lengvąjį užpildą reikia sudrėkinti prieš maišant į betoną.

1.2. Užpildai ir jų taikymo sritys

Įvairios perdirbtos atliekos gali būti panaudotos lengvojo betono gamyboje kaip stambus arba smulkus užpildas. Dažnai atliekų apdirbimas ir paruošimas naudojimui betono gamyboje nėra toks brangus kaip įprastų užpildų gavyba, o dėl mažo tankio ir didelio poringumo, šios perdirbtos atliekos puikiai tinka lengvojo betono gamybai.

1.2.1. Žemės ūkio atliekų užpildai

Aliejinės palmės lukštas

Tropinio klimato regionuose dideliais mastais gaminamas palmių aliejus, po kurio gamybos lieka daug atliekų (žr. 1.2 pav.), beveik 90 % viso pasaulyje pagaminamo palmių aliejaus yra gaminama Malaizijoje ir Indonezijoje, 2018 metais šios dvi šalys kartu pagamino apie 60 milijonų tonų palmių aliejaus. (Roser et al. 2021) Panaudojus aliejinių palmių lukštus kaip stambųjį užpildą gauto betono kerpamasis stipris gaunamas apie 30 MPa, o tankis 1850 kg/m^3 , kas yra apie 30 % mažiau, nei įprasto betono (Alengaram et al., 2011). Panaudojus susmulkintus palmių lukštus kaip smulkųjį užpildą gautas betonas lengvesnis už įprastą nuo 21 % iki 27 % priklausomai nuo naudotų smėlio ir smulkintų palmių lukštų proporcijų. Šiame straipsnyje naudotos proporcijos yra 50 %, 37,5 %, 25 % ir 12,5 %. Kuo daugiau smėlio buvo pakeista palmių lukštais, tuo lengvesnis betonas gavosi, ir verta paminėti, kad 37,5 % proporcijų mišinio gniuždomasis stipris už įprasto betono buvo mažesnis tik apie 10 %, kas parodo, kad galimybė masiškai naudoti aliejinių palmių atliekas lengvojo betono gamyboje yra įmanoma. (Shafigh et al., 2011)



1.2 pav. Aliejinių palmių lukštai, likę po aliejaus gamybos (TBI, 2023)

Kokoso lukštas

Be aliejinių palmių lukštų, didelį kiekį atliekų sudaro ir kokosų pramonė. Kokosų pramonės atliekos yra kietas kokoso lukštas, kuris gali būti naudojamas kaip stambus užpildas. Ištirtos lengvojo betono su kokoso kevalais kaip stambiuoju užpildu (žr. 1.3 pav.) mechaninės savybės įskaitant gniuždymo stiprumą ir atsparumą smūgiams. Pastebėta, kad lengvasis betonas naudojant kokoso kevalus gali iš esmės patenkinti lengvojo betono stiprumo reikalavimus ir gali būti plačiai naudojamas konstrukcijoms. Gunasekarano ir kt. straipsnyje buvo ištirtas kokoso kevalo sukibimas su skiediniu po 3, 7 ir 28 parų. Nustatyta, kad ilgėjant kietėjimo laikui,

plyšio tarp cemento pastos ir kokoso riešuto kevalo plotis susitraukia nuo maždaug 69 μm iki 19 μm . (Gunasekaran et al., 2011)



1.3 pav. Lengvasis betonas su kokosu kaip stambiuoju užpildu (Gunasekaran & Pennaras, 2017)

Grikių lukštas

Vaickelionis ir Valančienė (2016) nustatė galimybę gaminti lengvąjį betoną, derinant opoką (Lietuvoje randamas natūralus pucolanas) ir grikių lukštų liekanas kaip stambųjį užpildą. Taip pat buvo nustatyta, kad grikių lukštų atliekos už gana priimtina kainą gali būti naudojamos kaip užpildas, daugiausia lengvojo betono plokštėse ir sienų blokeliuose. Rezultatai parodė, kad su grikių lukštais pagaminto lengvojo betono gniuždymo stipris svyravo nuo 3,0 iki 17 MPa, o tūrinis sausas tankis svyravo nuo 800 kg/m^3 iki 1400 kg/m^3 . Geresnės lengvojo betono su grikių lukštais mechaninės savybės gaunamos, kai 33 % cemento pakeičiama opoka.



1.4 pav. Grikių lukštai (ComfyComfy, 2023)

Kamštienos atliekos

Kamštienos pramonė taip pat sukuria didelius žemės ūkio atliekų kiekius, kuriuos būtų galima ištirti ir panaudoti statybos sektoriuje. Pavyzdžiui, kamštienos naudojimas, kaip

lengvojo užpildo betone gali veiksmingai sumažinti gamtos išteklių energijos poreikį ir gali būti ekonomiškesnis, palyginti su pūstu perlitu ar vermikulitu. Be to, kamštiena turi porėtą struktūrą, kuri naudinga kamštieną naudojant kaip lengvąjį užpildą dėl didesnės įgeriamumo vertės, palengvinančios betono kietėjimą (Tedjditi et al., 2020). 1.5 pav. pavaizduotos skirtingų dydžių kamštienos atliekos kaip užpildai; (I) kamštiena 0–4 mm; (II) kamštiena 4–8 mm; (III) kamštiena 8–16 mm. Be to, kamštienos įmaišymas į skiedinį pagerina atsparumą vandeniui ir trapumą, taip pat pagerina ciklinę įtempių ir deformacijų reakciją. Tai siejama su kietumo ir maksimalaus atlaikomojo įtempio padidėjimu, taip pat sumažėjusiu stiprumu ir tampriuoju standumu. Kadangi betono įtempių ir deformacijų reakcija, veikiant ciklinei apkrovai, tiesiogiai lemia betoninių konstrukcijų plastišką ir histeretinę elgseną, veikiant sprogstamosioms, nuovargio ir seisminėms apkrovoms. (Prusty et al., 2016).



1.5 pav. (I) kamštiena 0–4 mm; (II) kamštiena 4–8 mm; (III) kamštiena 8–16 mm; (IV) betonas su kamštienos užpildu (Junaid et al., 2022)

Alyvuogių atliekos

Įvairūs tyrinėtojai taip pat nustatė, kad alyvuogių atliekos yra geras betono sudedamųjų dalių pakaitalas. Pavyzdžiui, al-Akhras (2009) ištyrė pelenų, susidarantių deginant alyvuogių atliekas ir išspaudas, kaip dalinio cemento pakaitalo, įtaką betono, veikiamo padidėjusios šarminio silicio dioksido reakcijos, patvarumui. Lengvasis betonas su alyvuogių atliekom pasirodė esąs atsparesnis šarminio silicio dioksido reakcijai nei paprastas betonas (~5 %). Taip pat buvo ištirtas alyvuogių atliekų poveikis lengvojo betono elgsenai, veikiant aukštai temperatūrai (iki 600 °C). Nustatyta, kad lengvojo betono su alyvuogių atliekomis efektyvumas aukštoje temperatūroje yra pakankamas. Mėginys, kurio alyvuogių atliekų kiekis buvo 22 %, o vandens ir cemento santykis 0,5, pasižymėjo geriausiomis savybėmis - parodė didesnę atsparumą ir mažiau įtrūkių betono paviršiuje nei kiti mėginiai. Belkharchouche ir Chaker (2016) tyrė lengvojo betono, kuriame alyvuogių atliekos buvo panaudotos kaip stambus 5–10 mm dydžio užpildas (žr. 1.6 pav.), šilumos laidumą ir stiprumą gniuždant. Šilumos laidumas šiek tiek sumažėjo (~ 6 %), didėjant alyvuogių atliekų kiekiui.



1.6 pav. Alyvuogių atliekos (Olive Biomass, 2023)

1.2.2. Komunalinių ir kietųjų atliekų užpildai

Nuotekų dumblas

Dėl nuolatinės industrializacijos ir gerėjančio gyvenimo lygio visame pasaulyje susidaro didelis kiekis nuotekų dumblo (žr. 1.7 pav.), o tai kelia rimtą problemą vietos savivaldybėms dėl saugaus ir efektyvaus jų šalinimo. Pavyzdžiui, pranešama, kad Ispanijoje kasmet pagaminama 1,2 milijono tonų nuotekų dumblo, o Malaizijoje per metus pagaminama apie 3 milijonus tonų nuotekų dumblo. JAV ir ES šalyse bendras sugeneruotas nuotekų dumblo kiekis sudaro apie 17,1 milijono tonų komunalinių atliekų kasmet. Veiksmingo nuotekų dumblo atliekų valdymo išlaidos gali siekti beveik 0,34 milijardo JAV dolerių per metus, tai didžiulė ekonominė našta įmonėms, atsakingoms už nuotekų valymą. (Gherghel et al., 2019)



1.7 pav. Nuotekų dumblas („Sewage sludge“, 2014)

Pastaruoju metu buvo atlikta daugybė tyrimų, siekiant nustatyti nuotekų dumblo, kaip pagrindinio statybinių medžiagų komponento, panaudojimo galimybes. Iš įvairių tyrimų galima daryti išvadą, kad nuotekų dumblas yra vertinga medžiaga, kurią galima panaudoti statybų sektoriuje įvairioms reikmėms. Nuotekų dumblo panaudojimas energiją taupančių lengvojo betono blokų gamyboje laikomas vienu iš veiksmingų aplinkosaugos problemų mažinimo būdų (Palmieri et al., 2018). Molis buvo sumaišytas su neapdorotu komunaliniu nuotekų dumbliu, o vėliau bandymų gamykloje tiršinamas. Pagamintas nuotekų dumblas buvo išdžiovintas iki 45 % kietųjų dalelių ir sumaišytas su sausu moliu. Sukurto lengvojo užpildo savybės susijusios su priešgaisrine apsauga ir šilumos laidumu, patvirtino jų galimą panaudojimą lengvajame betone. Nustatyta, kad po 28 parų lengvojo betono, pagaminto su užpildu iš nuotekų dumblo, gniuždymo stipris yra panašus į kitų panašių lengvųjų betonų. Tay et al. (1991) padarė išvadą, kad šviežio lengvojo betono, pagaminto naudojant degtą su moliu sumaišytą nuotekų dumblą ir stambius užpildus, apdirbamumas svyruoja nuo vidutinio iki gero. Didinant molio kiekį didėja mišinio slankumas ir gniuždomasis stipris po 28 parų.

Taip pat buvo nustatytas išdžiovintų lengvojo betono mišinių tankis ($1702\text{--}2016\text{ kg/m}^3$), susitraukimas džiūstant ($1,2\text{--}1,6\text{ mm/m}^1$), vandens įgeriamumas ($5,02\text{--}9,74\%$). Taip pat buvo pastebėta, kad nuotekų dumblas sumažino vidutinį tankį 7 % ir padidino bendrą lengvojo betono poringumą maždaug 12,85 %, lyginant su įprastu lengvuju betonu. Verta paminėti, kad lengvojo betono su nuotekų dumblo priedais šilumos laidumo koeficientas sumažėjo apie 7–10 %, o atsparumas šalčiui sumažėjo apie 4 %. (Elkins et al., 1985)

Plastikas ir guma

Plastikai sudaro didžiulę kietųjų atliekų dalį, kuri yra rimta pasaulinė visuomenės sveikatos ir aplinkos problema. Plastikai kasdien naudojami įvairiose srityse: būsto, sveikatos, apsaugos sistemų, pakavimo, konservavimo, žemės ūkio ir pramonės srityse. Dėl to plastikai sukelia nuolat didėjantį kietųjų atliekų srautą (Babayemi et al., 2019). Plastiko atliekos sukėlė rimtus staigius potvynius, nes buvo užblokuotas sklandus vandens kelių, kanalizacijos ir drenažo sistemų tekėjimas, daugiausia dėl nesisteminio šalinimo. Plastiko atliekos yra didelis pavojingų junginių šaltinis ir tapo grėsme tiek sausumos, tiek jūros aplinkai. 2010 m. vandens telkinius pavyko pasiekti apie 5,5–14,3 milijono tonų plastiko atliekų. (Olofinnade et al., 2021)

Kaip dauguma kitų dažnai pasitaikančių atliekų, plastiko atliekos gali būti efektyviai perdirbamos arba sumalamos, kad būtų galima panaudoti kaip sudedamąsias medžiagas gaminant lengvąjį betoną. Jis gali būti naudojamas kaip statybinė medžiaga, betono užpildas arba užpildo komponentas. Daugelis mokslininkų ištyrė vertingą perdirbtų plastikinių atliekų panaudojimą gaminant lengvąjį betoną įvairioms reikmėms. Lengvojo betono gamybai buvo panaudotos kelios kitos plastiko atliekos, pvz., padangų guma, polivinilas ir polipropilenas.

Šios plastiko atliekos dažnai naudojamos kaip smulkūs užpildai lengvajame betone, kurie gali būti visiškai arba iš dalies pakeisti kitus smulkius užpildus (betono tankis 600–2000 kg/m³, kai gniuždymo stipris svyruoja nuo 1 iki 16 MPa). Pastebėta, kad lengvojo betono gniuždymo stipris yra daugiau nei dvigubai didesnis nei kontrolinio betono, kai 30 % smulkių užpildų buvo pakeičiami susmulkintomis polivinilo atliekomis (Raji & Adeoye, 2017). Kita vertus, naudojant tokį patį apdorotos padangų gumos (0,9–2,5 mm) kiekį gniuždymo stipris siekė tik 50 % kontrolinio betono. Kitame tyrime naudotos penkios skirtingos padangų gumos (žr 1.8 pav.) trupinių apdorojimo metodikos. Trijuose metoduose dvi valandas mirkoma natrio hidrokside (10 % masės), sieros rūgštyje (10 % masės) ir kalio permanganate (5 % masės), o likusiu metodu silicio dioksido dūmai buvo naudojami gumos trupiniams padengti (vandens ir silicio dioksido dūmų santykis 0,4), o vėliau dengiama cementu. Išanalizuota, kad apdorojimo metodai padidino lengvojo betono gniuždomąjį stiprumą apie 25–55 %, o pagrindinė šio pagerėjimo priežastis – geresnis cemento-gumos matricos sukibimas (Kashani et al., 2017). Kiti tyrimai parodė, kad smulkių užpildų naudojimas lengvojo betono plokščių bandiniuose, daugiausia sudarytuose iš polivinilo atliekų, gali padidinti lenkimo stiprį ir sumažinti įlinkį. Dėl didesnio smėlio tūrio, pakeisto polivinilo atliekomis, betonas tapo standesnis, todėl atsparumas lenkimui buvo daug geresnis, o vėliau buvo nežymus deformavimas. Į lengvąjį betoną pridėjus skirtingas gumos miltelių atliekų proporcijas (0, 3, 6 ir 9 %) cemento, gniuždymo stipris pagerėjo nuo 12,6 MPa iki 28,2 MPa (Chandni & Anand, 2018).



1.8 pav. Susmulkinti padangų trupiniai (Rao, 2018)

Statybų pramonės atliekos

Statybos ir griovimo atliekos buvo plačiai naudojamos statybos pramonėje nuo Antrojo pasaulinio karo, atsižvelgiant į didžiulį šiukšlių kiekį ir norą patenkinti didėjančią tinkamų statybinių medžiagų poreikį (Coelho & Brito, 2012). ES šalyse perdirbama maždaug 50 % visų statybinių atliekų, o iki 2020 m. buvo numatoma pakartotinai panaudoti apie 70 % visų statybinių atliekų kiekio. JAV statybos ir griovimo darbų metu susidarė beveik 136,1 milijonų

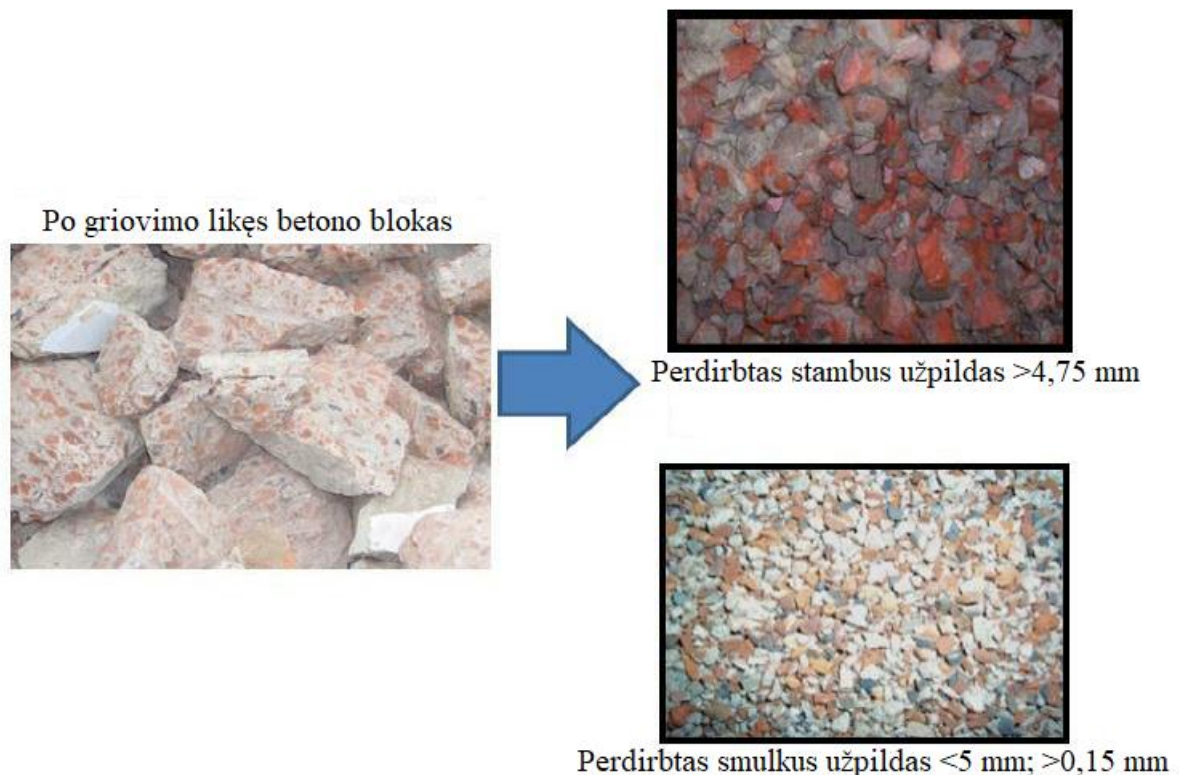
tonų atliekų, tačiau tik 28 % buvo perdirbta. Tačiau Kinijoje perdirbama vos 10 % statybos ir griovimo atliekų, likusi dalis tiesiog išvežta į sąvartynus. Brazilijoje statybos ir griovimo atliekos sudaro daugiau nei 40 % komunalinių kietųjų atliekų (Kumar, 2017).

Apskaičiuota, kad pasaulinė statybos sektoriaus agregatų paklausa 2019 m. siekė 51 milijardą tonų. Norint patenkinti šį poreikį, galima naudoti statybos ir griovimo atliekas kaip užpildą betono gamyboje. Statybos ir griovimo atliekos, įskaitant molio, plytų ir betono likučius, nuolat didėja, nes šios didelių gabaritų atliekos dažniausiai susidaro griauinant senas konstrukcijas, atsikratant perteklinio ir išbandyto betono. Šios atliekos kelia rimtą pavojų aplinkai, todėl labai svarbu jas perdirbti ir panaudoti kaip užpildus betono gamybai, kad būtų sumažintas poveikis aplinkai ir ekonomikai (Safiuddin et al., 2012). Lengvojo betono su putomis gamyboje naudojamos molio plytos ir smulkus perdirbto betono užpildas (Sharipudin & Ridzuan, 2012). Apskritai lengvasis betonas su putomis pagamintas su užpildais iš statybos ir griovimo atliekų, gali pasiekti iki 7 MPa gniuždymo stiprumą, o išdžiovintų badinių tankis svyruoja nuo 600 kg/m³ iki 1600 kg/m³. Pastebėta, kad lengvasis betonas su putomis, pagamintas maišant statybos ir griovimo atliekas su stambesnio dydžio užpildais (1,18 – 4,75 mm), gniuždymo stipris buvo didesnis nei maišant su smulkaus (<0,6 mm) ir vidutinio (0,6–1,18 mm) dydžio užpildais dėl padidėjusio vandens kiekio. Iš statybos ir griovimo atliekų pagaminti stambieji ir smulkieji užpildai pavaizduoti 1.9 paveiksle. Be to, pastebėta, kad tiek putų kiekis, tiek statybos ir griovimo atliekų dydis turi įtakos lengvojo betono su putomis oro tuštumų kiekiui (Favaretto et al., 2017).

Gniuždymo stipris pagerėjo iki 20 %, kai 10 % smulkaus užpildo buvo pakeistas smulkiu perdirbto betono užpildu. Geras sukibimas tarp smulkaus perdirbto betono užpildo ir cemento pastos padidina gniuždomąjį stiprį (Sharipudin & Ridzuan, 2012). Lengvojo betono su putomis gniuždymo stipris sumažėjo 35 % ir 75 %, kai molinių plytų atliekos buvo naudojamos kaip smulkus ir stambus užpildas. Kadangi molio plytų užpildo struktūra yra porėta, garso slopinimo koeficientas (0,22 dB/mm) gali sumažėti maždaug 35 %, nes visiškai pakeitus užpildą molio plyta, poringumas padidėjo maždaug 10 %. Taip pat ištirta, kad lengvojo betono su putomis optimalus smulkaus perdirbto betono užpildo kiekis yra 10 %, o molinių plytų užpildo kiekis yra 25 % (Aliabdo et al., 2014).

Statybos ir griovimo atliekos taip pat yra naudojamos kaip lengvasis užpildas lengvajame betone. Pavyzdžiui, Nguyen et al., (2020) panaudojo perdirbtą lengvąjį užpildą, gautą iš statybos ir griovimo atliekų, kad pagamintų lengvąjį betoną, kurio 28 dienų gniuždymo stipris siekė 25 MPa ir tankis neviršijo 1800 kg/m³. Buvo padaryta išvada, kad lengvasis užpildas reikšmingai paveikė lengvojo betono mechanines savybes. Naudojant 31 % ir 26 % lengvojo užpildo betono gniuždymo stipris gali viršyti 20 MPa. Tačiau, kai perdirbto lengvojo

užpildo kiekis buvo sumažintas iki 23 %, buvo pastebėtas reikšmingas gniuždymo stiprio pagerėjimas, tai yra po 90 dienų viršijo 30 MPa.



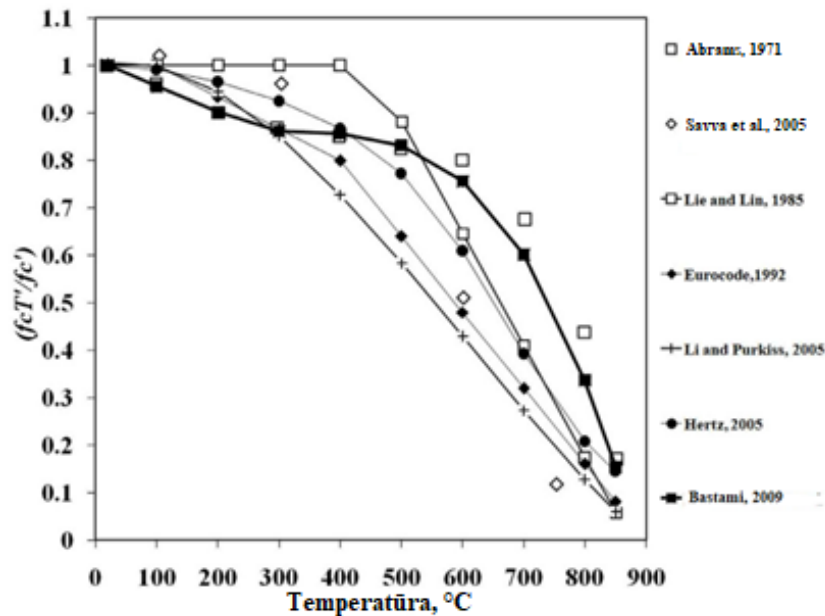
1.9 pav. Statybos ir griovimo atliekų užpildai (Mohammed et al., 2015)

1.3. Atsparumas ugniai

Gaisras pastatuose – neišvengiama problema. Projektuojant privaloma užtikrinti visas priešgaisrines priemones, kaip dūmų detektoriai, avariniai išėjimai ar laiptinės, priešgaisriniai vartai ar užuolaidos. Taip pat svarbu užtikrinti, kad jei gaisro išvengti nepavyktų konstrukcijos atlaikytų aukštą temperatūrą ir nesugriūtų pakankamai ilgai, kad visi pastate esantys žmonės spėtų evakuotis. Betono elgsena skiriasi priklausomai nuo skirtingų apkrovimo variantų dėl progresinio mikroplyšių atsiradimo terpėje tarp skiedinio ir užpildo. Dažnai didelio masto pastatuose konstrukcijas renkamosi daryti iš gelžbetonio ir dažnai jų atsparumas ugniai yra nustatomas iš anksto nustatytais, standartiniais metodais arba empirinėmis formulėmis. Šie metodai neretai yra netikslūs ir jais naudojantis gaunami netikslūs priešgaisrinės saugos parametrai (Kodur et al., 2008). Gniuždomasis stipris, tempiamasis stipris, plyšių atsiradimo deformacijos, tamprumo modulis ir šilumos laidumas yra vienos pagrindinių savybių apsprendžiančių betono elgseną. Visos jos turi netiesinę priklausomybę nuo temperatūros. Taip pat didelę įtaką betono elgsenai turi jo užpildai, jų temperatūrinio plėtimosi koeficientas ir kiti nuo temperatūros priklausantys parametrai (Bouniol, 2001).

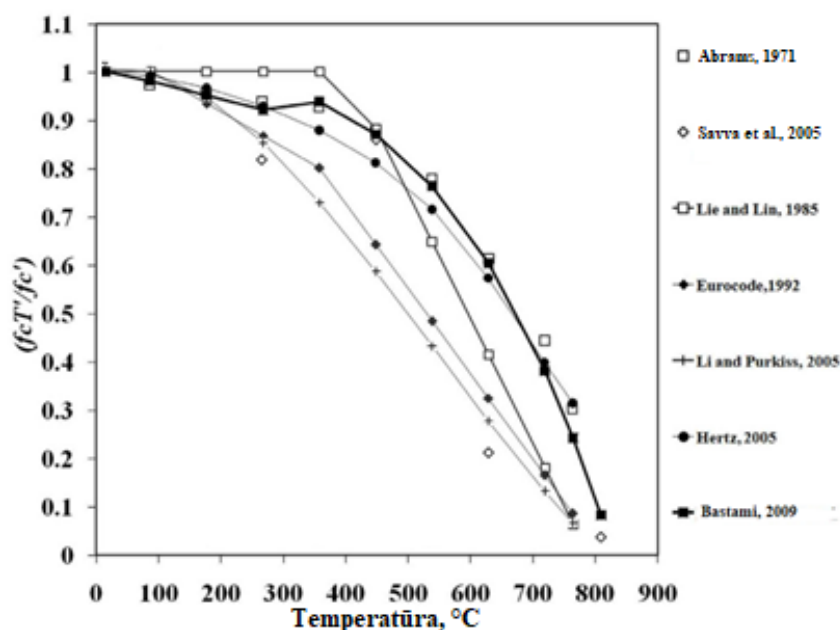
Betono elgsena gaisro metu

Buvo atlikta daug eksperimentų ir išvesta daug formulių betono elgsenai aukštoje temperatūroje nustatyti. Didžioji dalis bandymų koncentravosi į gniuždomąją galią. 1.10 paveiksle parodyta kaip skirtingos metodikos ir eksperimentai lyginami tarpusavyje. Betonai tipiškai praranda nuo 10 % iki 20 % laikomosios galios, kai pasiekia 300 °C, ir apie 60–75 %, kai pasiekia 600 °C.



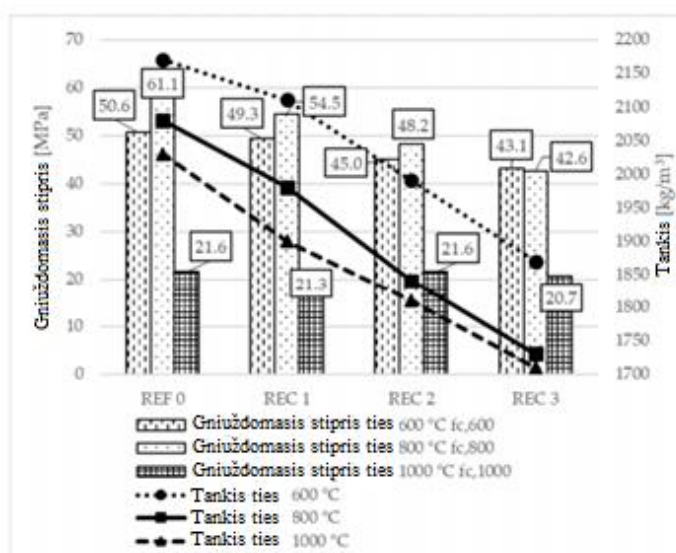
1.10 pav. Palyginimas tarp gniuždomųjų stiprių pagal įvairias skaičiavimo metodikas ir eksperimentus esant skirtingoms temperatūroms (Bastami et al., 2010)

Tos pačios skaičiavimo metodikos buvo pritaikytos ir lengvojo betono elgsenai aukštoje temperatūroje nustatyti. 1.11 paveiksle parodyta, kaip skirtingos metodikos ir eksperimentai lyginami tarpusavyje. Lengvasis betonas pasiekęs aukštą temperatūrą patyrė mažesnius gniuždomosios galios nuostolius nei įprastas betonai.



1.11 pav. Palyginimas tarp gniuždomųjų stiprių pagal įvairias skaičiavimo metodikas ir eksperimentus esant skirtingoms temperatūroms (Bastami et al., 2010)

Křížová et al. (2022) atliko bandymus su lengvojo betono mišiniais su užpildu iš sukepintų po komunalinių atliekų deginimo likusių pelenų. Bandymai buvo atlikti su keturiais skirtingais mišiniais, kurių sudėtis skyrėsi natūralaus užpildo procentu, čia nurodomas natūralaus užpildo procentas: REF0 – 100 %, REC1 – 82 %, REC2 – 60 % ir REC3 – 33 %. Gauti mėginiai dedami į krosnį, kuri per 105 min palaipsniui įkaista iki 1000 °C temperatūros. Tada mėginiai išimami, paliekami atvėsti 24 val. ir tada atliekami gniuždymo bandymai (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Lengvojo betono bandinių mechaninių savybių apžvalga po aukštos temperatūrinės apkrovos (Křížová et al. 2022)

Visų bandinių tankis sumažėjo dėl išgaravusio vandens maždaug proporcingai. Gniuždomojo stiprio pasikeitimo tendencijos irgi panašios. Visų, išskyrus REC3, bandinių

gniuždomasis stipris išaugo esant 800 °C temperatūrai, nes betono bandiniuose buvo mikrosilikatų, kurie prie tokios temperatūros suformuoja volastonitą ir taip padidina stiprumą.

Lindgardas ir Hammeris (1998) teigia, kad lengvasis betonas turi didesnę atsparumą ugniai nei įprastas betonas, dėl mažesnio laidumo šilumai, ko rezultatas – mažesnis poveikis armatūrai. Nors lengvojo betono šiluminis laidumas ir mažesnis nei įprasto betono, jo paviršius įprastai labiau suskilinėja dėl šių priežasčių:

- Dėl mažesnio šiluminio laidumo atsiradusio žymesnio temperatūrų gradiento (didesnis temperatūrų skirtumas tarp sluoksnių);
- Dėl mažesnio tempiamojo stiprio (esant panašiam vandens/rišamosios medžiagos santykiui).

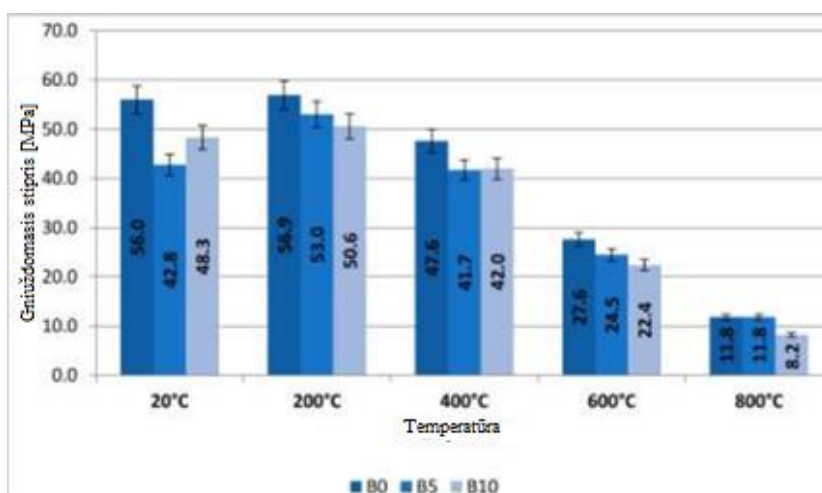
Sprendimo būdai

Nors betonas ir nėra degi medžiaga, tačiau aukštoje temperatūroje jo elgsena skiriasi nuo elgsenos normaliomis aplinkybėmis. Užpildai sudaro svarbią betono savybių dalį. Užpildo savybių skirtumai reikšmingai įtakoja betono eksploatacines savybes kaitinant. Dėl šių savybių skirtumų taip pat atsiranda įtrūkimų ir lūžimų kai kuriose betono dalyse ir prarandamas sukibimas tarp betono ir armatūros. Todėl būtina ištirti betono elgseną aukštoje temperatūroje.

Norint sumažinti aukštos temperatūros poveikį betonui, reikia mažinti paviršiaus skilinėjimo, armatūros apsauginio sluoksnio nubyrėjimo riziką. Tai galima padaryti impregnuojant lengvuosius užpildus, taip sumažinant vandens įgeriamumą sandėliavimo metu arba įmaišius į šlapią betoną, tokiu būdu sumažinant bendrą vandens kiekį išdžiūvusiam betonui gaminyje (Lindgard & Hammer, 1998). Norint pagerinti vandens išgaravimo galimybę buvo atlikta keletas testų įmaišant polipropileno pluošto. Polipropileno pluošto išsilydimas tariamai sukuria vandens garų išleidimo latakus (Jensen, et al., 1995).

Demirboğa ir Gül (2003) testavo temperatūrinio laidumo koeficientus mišinių, kuriuose buvo naudojamas pūstas perlitas ir pemza. Taip pat temperatūrinio laidumo bandymai atlikti su mišiniais, kuriuose dalis (10 %, 20 % ir 30 %) cemento buvo pakeista arba į C klasės lakiuosius pelenus arba į silicio dioksidą (ang. *silica fume*). Didžiausias terminis laidumas – 0,3178 W/mK, buvo pasiektas su pemzos užpildu ir 100 % cemento. Didinant lakiųjų pelenų ir silicio dioksido kiekį mažėjo temperatūrinio laidumo koeficientas. Mažiausias pasiektas temperatūrinis laidumas – 0,1472 W/mK buvo pasiektas naudojant tik pūstą perlitą, kaip stambų užpildą ir vietoje 30 % cemento naudojant C klasės lakiuosius pelenus. Taip pat buvo atliekami tyrimai su betonu, kurio stambųjį užpildą arba pilnai, arba dalinai pakeitė perdirbtas plastikas. Beveik visos mechaninės betono savybės suprastėjo, laikomoji galia, tamprumo modulis, tačiau sumažėjo betono tankis ir sumažėjo šiluminis laidumas nuo 35 % iki 70 % (Ali et al., 2018).

Powężka et al. (2020) atliko bandymą su mėginiais, kuriuose buvo naudojamas perdirbtas stiklas vietoj 5 % stambiojo užpildo (B5) ir vietoj 10 % stambiojo užpildo (B10). Baziniame mėginyje (B0) nebuvo naudojamas stiklas. Atlikti gniuždomojo stiprio bandymai esant skirtingoms temperatūroms (20, 200, 400, 600 ir 800 °C). Bazinių mėginių, bei tų, kurie buvo pašildyti iki 200 °C temperatūros, vidinė struktūra nepakito. Tai patvirtina jų didelį gniuždomąjį stiprį. B5 ir B10 serijų mėginių, įkaitintų iki 200 °C, gniuždymo stipris padidėjo, kitaip nei bazinių mėginių, nes sustiprėjo tarp užpildo ir betono. Kaitinant mėginius iki 400 °C temperatūros, susidaro poros ir mikroįtrūkimai. Padidinus mėginių temperatūrą iki 600 °C ir 800 °C padidėja porų dydis ir įtrūkimai, ypač tarp stiklo užpildo ir betono. Minėtų veiksnių poveikis yra betono morfologijos pasikeitimas ir, kylant temperatūrai, laipsniškas betono ryšių susilpnėjimas. 1.13 paveiksle pavaizduota, kad didžiausias stiprumas užfiksuotas pakaitinus mėginius iki 200 °C temperatūros po 180 dienų kietėjimo, t.y. 56,9 MPa B0 mėginiams, 53,0 MPa B5 mėginiams ir 50,6 MPa B10 mėginiams. Gniuždymo stipris sumažėjo atitinkamai 6,85 % ir 11,07 %. Nustatyta, kad bandiniai su stiklo užpildu, kaitinami aukštesnėje temperatūroje, t.y. 400, 600 ir 800 °C, turi mažesnę gniuždymo stiprio sumažėjimą, palyginti su bandiniais, pagamintais iš kontrolinio betono.



1.13 pav. Gniuždomasis stipris esant skirtingoms temperatūroms (Powężka et al., 2020)

1.4 Skyriaus apibendrinimas

Transporto tinklų infrastruktūroje, daugumoje pasaulio šalių dominuoja gelžbetonis. Dėl mažų eksploatacijos išlaidų, sąlyginai mažos kainos ir ilgo eksploatacijos laiko šio tipo konstrukcijos yra itin plačiai naudojamos. Didelis šių konstrukcijų svoris neretai lemia didesnes, nei pageidaujama kainas, o sudedamųjų betono dalių gavyba yra tiek neekonomiška, tiek neekologiška.

Viena galimybė sumažinti gavybos ir gamybos išlaidas gelžbetonyje yra lengvojo betono su perdirbtų atliekų užpildais taikymas. Dabartinės technologijos pakankamai pažengusios, kad lengvosios gelžbetonio konstrukcijos su perdirbtais užpildais savo mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis prilygsta įprasto betono konstrukcijoms, bet pranoksta jas savo mažu svoriu. Dėl mažesnio konstrukcijų svorio dažnai tiltų rekonstrukcijų metu perdangos gaminamos iš lengvojo betono, nes siekiama nepadidinti atramų perimamų apkrovų dėl intensyvesnio transporto srauto, ką kompensuoja kartais net 30 % mažesnis lengvojo betono tankis.

Daug straipsnių parašyta apie skirtingas lengvojo betono sudėtis naudojant perdirbtas komunalines atliekas. Juose aptariamos mechaninės ir fizikinės gautų mišinių savybės lyginant su įprastu betonu. Įprastai gaunamas mažesnis gniuždomasis stipris ir ženkliai mažesnis tūrinis tankis. Keletu atveju gautas lengvasis betonas pasižymėjo geresnėmis savybėmis esant aukštai temperatūrai – gaisro metu.

Perdirbto plastiko granulės nėra plačiai naudotos literatūroje paskelbtuose tyrimuose. Kitų autorių atliktuose tyrimuose nustatyta, kad pakeitus dalį smėlio užpildo pakeitus polietileno ir polistireno atliekomis, betono gniuždymo stipris buvo žymiai mažesnis, palyginus su įprastu betonu. Tai galima paaiškinti sumažėjusiu sukibimo stiprumu tarp plastiko atliekų paviršiaus ir cementinio skiedinio. Šiame darbe atlikti pirminiai tyrimai susiję su plastiko užpildo paviršiaus apdorojimo (dangos) sukūrimu, polimerinių medžiagų sukibimo ir ilgalaikio veikimo užtikrinimu cemento matricos didelio šarmingumo aplinkoje.

Atlikus literatūros apžvalgą iškeltas toks darbo tikslas: sudaryti betono mišinį su perdirbtomis atliekomis ir atlikti skaitinę analizę.

Tikslui pasiekti suformuluoti tokie uždaviniai:

- 1) Atlikti lengvųjų užpildų ir lengvojo betono mechaninių bei fizinių savybių apžvalgą.
- 2) Laboratorijoje sukurti lengvojo betono mišinio sudėtį ir atlikti jo savybių eksperimentinius tyrimus.
- 3) Gautų mišinių savybes palyginti su kitų lengvojo betono mišinių savybėmis.
- 4) Gautų mišinių savybes panaudoti skaitiniame modelyje, palyginti gautus rezultatus su eksperimentu.

2. LENGVOJO BETONO MIŠINIŲ RUOŠIMAS

2.1. Bendrosios žinios ir sudedamosios dalys

Šiame skyriuje atlikti lengvojo betono mišinių tyrimai. Lengvojo betono sudėties parinkimas pradėtas nuo jo sudedamųjų dalių savybių nustatymo (granuliometrijos, cemento savitojo paviršiaus ploto nustatymo Bleino metodu (LST EN 196-6), kalorimetrijos tyrimo). Kuriant lengvojo betono mišinį buvo išbandyta po 8 skirtingus mišinius su ir be lengvojo užpildo. Iš šių mišinių parinkti du tinkamiausi, kurie naudoti tolimesniems tyrimams.

Lengvojo betono mišinys susideda iš stambaus ir smulkaus užpildo, rišamosios medžiagos ir priedų. Tyrimams atlikti kaip stambus lengvas užpildas buvo naudojamas keramzitas arba plastiko granulės. Kaip smulkus užpildas buvo naudojamas smėlis. Kaip rišamoji medžiaga buvo naudojamas Akmenės cementas CEM I 42,5R. Kaip priedai buvo naudojami plastikliai ir stireno akrilo emulsija.

2.2. Bandymų metodika

Sudarant lengvojo betono mišinio sudėtį, pirmiausia buvo atliekami mišinio sudedamųjų medžiagų tyrimai. Buvo nustatoma šių medžiagų granuliometrinė sudėtis, nustatomas savitasis paviršius cementui Bleino metodu. Šiame poskyryje aprašyta tyrimų metodika ir įranga.

2.3.1 Granuliometrinės sudėties nustatymas

Granuliometrinė sudėtis nustatyta pagal standartą LST EN 933-1:2012 „Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas“. Cemento granuliometrinė sudėtis nustatyta naudojant lazerinį granuliometrą.

Granuliometrijos tyrimai buvo atlikti šioms medžiagoms:

- smėliui,
- cementui.

Įranga

Smėliui tirti buvo naudojamas vibracinis sietas „Haver EML 200 digital T“ (žr. 2.1 pav.) su standartiniais sietais. Cemento granuliometrinės sudėties tyrimui naudotas lazerinis granuliometras „Cilas Particle Size Analyzer 1090“ (žr. 2.2 pav.) ir svarstyklės, kurių svėrimo tikslumas 0,001 g.



2.1 pav. „Haver EML 200 digital T“ vibracinis sietas (Directindustry, 2023)



2.2 pav. „Cilas Particle Size Analyzer 1090“ lazerinis granuliometras (Directindustry, 2023)

Bandymo metodika

Smėlio granulometrijai nustatyti naudotas vibracinis sietas, sijojant 200 g per skirtingo skersmens sietus 10 minučių. Tada buvo pasveriami ant kiekvieno sieto likusi medžiagos dalis.

Cementui buvo naudojamas kitas granulometrijos tyrimo būdas, kadangi prieš tai aprašytas šioms dalelėms netinka dėl sietuose esančių per didelio skersmens skylių. Šis tyrimas buvo atliekamas naudojant lazerinį granuliometrą „Cilas Particle Size Analyzer 1090“. Prietaiso veikimo principas toks: lazerio šviesa praleidžiama pro tiriamos medžiagos suspensiją ir pagal šviesos išsiskaidymą nustatomas dalelių skersmenų pasiskirstymas. Tokie tyrimai buvo atlikti Akmenės cementui CEM I 42,5R.

2.3.2. Bleino bandymas

Bleino bandymas atliekamas cementui pagal LST EN 196-6:1996 „Cementas. Bandymo metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas“. Cemento smulkumas išreiškiamas savituoju paviršiumi. Oro srauto intensyvumas priklauso nuo porų dydžio, kurios tiesiogiai susijusios su miltelių dalelių stambumu. Savitasis miltelių pavidalo medžiagos – cemento paviršius apskaičiuojamas, nustatius žinomo oro perėjimo trukmę t per žinomo poringumo miltelių sluoksnį.

Įranga

Bleino bandymui atlikti reikalingas Bleino aparatas su cilindrine tūta (žr. 2.3 pav.), svarstyklės, kuriomis galima sverti cementą 1 mg tikslumu, ir termometras.



2.3 pav. Bleino prietaisas (KTU, 2023)

Bandymo metodika

Ant į tūtą įdėto perforuoto diskelio uždedamas filtro skritulėlis. Sausu švariu strypeliu filtras visu plotu prispaudžiamas prie perforuoto diskelio. Pasvertasis cementas atsargiai, be nuostolių suberiamas į tūtą. Cementas tūtoje, atsargiai pastuksenant, išlyginamas ir ant jo paviršiaus uždedamas filtro skritulėlis. Į tūtą įstatomas tūtos plunžeris ir atsargiai spaudžiant tol, kol jo galvutės apačioje esantis ribotuvas pasieks tūtos briauną ir į ją atsirems. Po to plunžeris atsargiai patraukiamas į viršų apie 5 mm, pasukamas 90° kampu ir vėl atsargiai įspaudžiamas iki atramos. Plunžeris ištraukiamas. Gaunamas žinomo poringumo cemento sluoksnelis, pagal kurio pralaidumą orui apskaičiuojamas savitasis paviršius. Atsargiai, nesuardant suformuoto cemento sluoksnelio, tūtos kūgiškasis galas įkišamas į tepalu pateptą aparato manometro vamzdelio specialiąją angą ir stebima, ar kinta skysčio lygis. Jei lygis krenta, iš naujo tepalu sandarinama tūtos ir manometro jungtis. Po to vėl tikrinamas skysčio lygio pastovumas manometre. Kai skysčio lygis pastovus, įjungiamas prietaisas. Per tą patį cemento sluoksnį oras perleidžiamas dar kartą, užrašant trukmę ir temperatūrą. Apskaičiuojamas gautų trukmių vidurkis.

Po to paruošiamas antras bandinys – žinomo poringumo cemento sluoksnis – ir (kaip ir pirmojo bandinio) tris kartus nustatomas jo pralaidumas, užrašant trukmes ir temperatūras, apskaičiuojant vidurkius. Apskaičiuojamas savitasis paviršius pagal formulę:

$$S = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1 - e}, \quad (2.1)$$

čia

K – prietaiso konstanta,

e – sluoksnio poringumas,

t – matavimo trukmė, s,

ρ – savitasis cemento tankis, g/cm³,

η – oro klampa (Pa·s) bandymo temperatūroje.

2.3.3. Mišinio be stambiojo užpildo sudėties kūrimas

Iš viso buvo suformuota 8 skirtingų mišinio sudėčių (iš viso 15 bandinių) ir jos išbandytos pagal standartą LST EN 196-1:2007 „Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas.“

Įranga

Bandinių gamybai, išlaikymui ir mechaninių savybių nustatymui naudota ši įranga: automatizuota maišyklė (žr. 2.4 pav.), bandinių 160×40×40 mm formos (žr. 2.5 pav.), hidraulinis presas „Tinius Olsen H200KU“ (žr. 2.6 pav.), stovas lenkimo bandymui atlikti (žr. 2.7 pav.) ir stovas gniuždymo bandymui atlikti (žr. 2.8 pav.).



2.4 pav. Automatizuota maišyklė (Intertechnika, 2023)



2.5 pav. 160x40x40 mm formos bandiniamas (Controls-Group, 2023)



2.6 pav. Hidraulinis presas „Tinius Olsen H200KU“ (Scribd, 2023)



2.7 pav. Stovas lenkimo bandymui atlikti (Controls-Group, 2023)



2.8 pav. Stovas gniuždymo bandymui atlikti (Controls-Group, 2023)

Bandymo metodika

Visi mišiniai buvo maišomi pagal standarte LST EN 196-1:2007 pateiktą metodiką automatizuota maišykle (žr. 2.4 pav.). Visų pirma buvo pasveriamos visos reikiamos medžiagos. Tada į maišymo indą supilamos sausos medžiagos ir maišomos 30 sekundžių, per 15 sekundžių supilamas vanduo ir po to dar 15 sekundžių maišoma. Minutę mišinys paliekamas pastovėti ir tada supilama akrilo emulsija ir mišinys maišomas dar minutę.

Sumaišytam mišiniui atliekamas sklidumo bandymas. Jei mišinys nėra labai sklidus, kūginė formelė yra padedama ant smūginio vibratoriaus paviršiaus, ir pripildoma mišinio iki viršaus. Tada formelė patraukiama ir smūginis vibratorius 10 kartų per 10 sekundžių mišinį suvibruoja. Tada mišinio suformuoto apskritimo skersmuo išmatuojamas dviem kryptimis ir gaunamas mišinio sklidumas. Jei mišinys labai sklidus – jo sklidumas didesnis nei smūginio vibratoriaus stiklinio paviršiaus skersmuo, kūgio formelė patalpinama ant stiklinio paviršiaus, pripildoma, nuimama ir mišiniui leidžiama laisvai sklisti 10 sekundžių (žr. 2.9 pav.). Tada išmatuojamas mišinio suformuoto apskritimo skersmuo dviem kryptimis ir randamas mišinio sklidumas.



2.9 pav. Sklidaus mišinio sklidumo bandymas

Sumaišytas mišinys klojamas į standartines 40×40×160 mm dydžio formas. Sutankinamas kelis kartus pastuksenant formą į stalą, apdengiamas plėvele ir paliekamas kietėti. Po to bandiniai išimami iš formų ir sužymimi. Bandiniai buvo bandomi po 7 ir 28 kietėjimo parų. Lenkiamasis stipris nustatomas veikiant bandinį viena koncentruota jėga (žr. 2.7 pav.), o po lenkimo bandymo, prizmių puselės bandomos gniuždomajam stipriui nustatyti (žr. 2.8 pav.). Lenkiamasis ir gniuždomasis stipris gautas bandant bandinius „Tinius Olsen H200KU“ presu.

2.3.4. Lengvojo betono mišinio sudarymas

Sudarius mišinio be stambųjų užpildų sudėtį, buvo sudaroma lengvojo betono mišinio sudėtis ir stebimos mechaninės ir technologinės savybės.

Įranga

Lengvojo betono mišinio kūrimui naudota automatinė maišyklė, bandinių formos 40×40×160 mm, svarstyklės, slankmatis, kamera, kurioje palaikoma pastovi ($20 \pm 1,0$)°C temperatūra ir hidraulinis „Tinius Olsen H200KU“ presas.

Bandymo metodika

Lengvojo betono mišiniams kurti imama tokia pat medžiagų sudėtis, kaip ir mišinių be lengvojo užpildo, tik papildomai pridedama lengvojo užpildo – keramzito arba plastiko granulių. Tada stebima mišinio konsistencija ir pagal ją reguliuojamas vandens, plastiklio ir akrilo emulsijos kiekis. Matricos mišinys išmaišomas pagal LST EN 196-1:2007 „Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas“ 6 skyrių „Skiedinio paruošimas“. Gautą mišinį klojame į 40×40×160 mm formas švelniai tankindami rankiniu būdu. Stebime ar mišinyje atsiskiria vanduo ir ar vyksta išsisluoksniavimas. Po to formose esančius bandinius uždengiame

plėvele ir laikome 1–2 paras. Suformuojame prizmes, stebime sukietėjusio kubelio išsisluoksniavimą. Po to bandinius sudedame į maišelius ir juos dedame į kamerą, palaikančią pastovią ($20 \pm 1,0$) °C temperatūrą, tolesniam kietėjimui. Praėjus 7 ir 28 kietėjimo paroms, bandiniai ištraukiami iš kameros, nustatomi matmenys, pasveriami ir išbandomi hidraulinio „Tinius Olsen H200KU“ presu gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio nustatymui.

2.3.5. Vandens įmirkio bandymai

Sudarius visus bandinius buvo suformuoti dar keturi mišiniai vandens įgeriamumo bandymui atlikti.

Įranga

Mišiniams sudaryti naudota automatinė maišyklė, bandinių formos 70×70×70 mm, svarstyklės, slankmatis, kamera, kurioje palaikoma pastovi ($20 \pm 1,0$)°C temperatūra, vakuumavimo indas, hidraulinis „Tinius Olsen H200KU“ presas.

Bandymo metodika

Vandens įgeriamumo bandymams skirtiems mišiniams imama tokia pati sudėtis kaip ir mišinių su lengvuju užpildu. Gautą mišinį klojame į 70×70×70 mm formas švelniai tankindami rankiniu būdu. Po 28 parų bandiniai pasverti ir išmatuoti. Tada visi bandiniai džiovinami krosnyje 65°C temperatūroje kol pasiekiamas pastovus svoris. Dalis bandinių mirkomi vandens vonioje 2 paras ir tada pasveriami, kita dalis bandinių dedami į vakuumavimo indą, kuris tada pripildomas vandeniu tiek, kad apsemtų bandinius. Tada per 3 minutes sukuriamas vienos atmosferos vakuumas, tuomet per 3 minutes leidžiama inde vėl prisikaupti oro, tada vėl sukuriamas vienos atmosferos vakuumas ir tada vėl leidžiama prisikaupti oro. Po bandymo bandiniai vėl sveriami. Bandiniai prieš ir po mirkymo yra skeliami, fiksuojamas jų skeliamasis stipris.

2.3.6. Kalorimetrijos bandymai

Keičiant mišinių sudėtį reikia išsiaiškinti, kokią įtaką mišinio hidratacijai, jos trukmei ir jos metu išskiriamai šilumai turi skirtingi komponentai ir jų kiekis.

Įranga

Kalorimetras (žr. 2.10 pav.)



2.10 pav. Kalorimetras (Sholonchem, 2023)

Bandymo metodika

Kalorimetre patalpinamas mažas kiekis mišinio. Kalorimetras atsižvelgdamas į mišinio kiekį gramais fiksuoja per laiką išskiriamos šilumos kiekį Džauliais. Taip pat kalorimetras pateikia atliekamo darbo kiekį Vatais (Džauliai per sekundę) kilogramui medžiagos.

2.4. Bandymų rezultatai

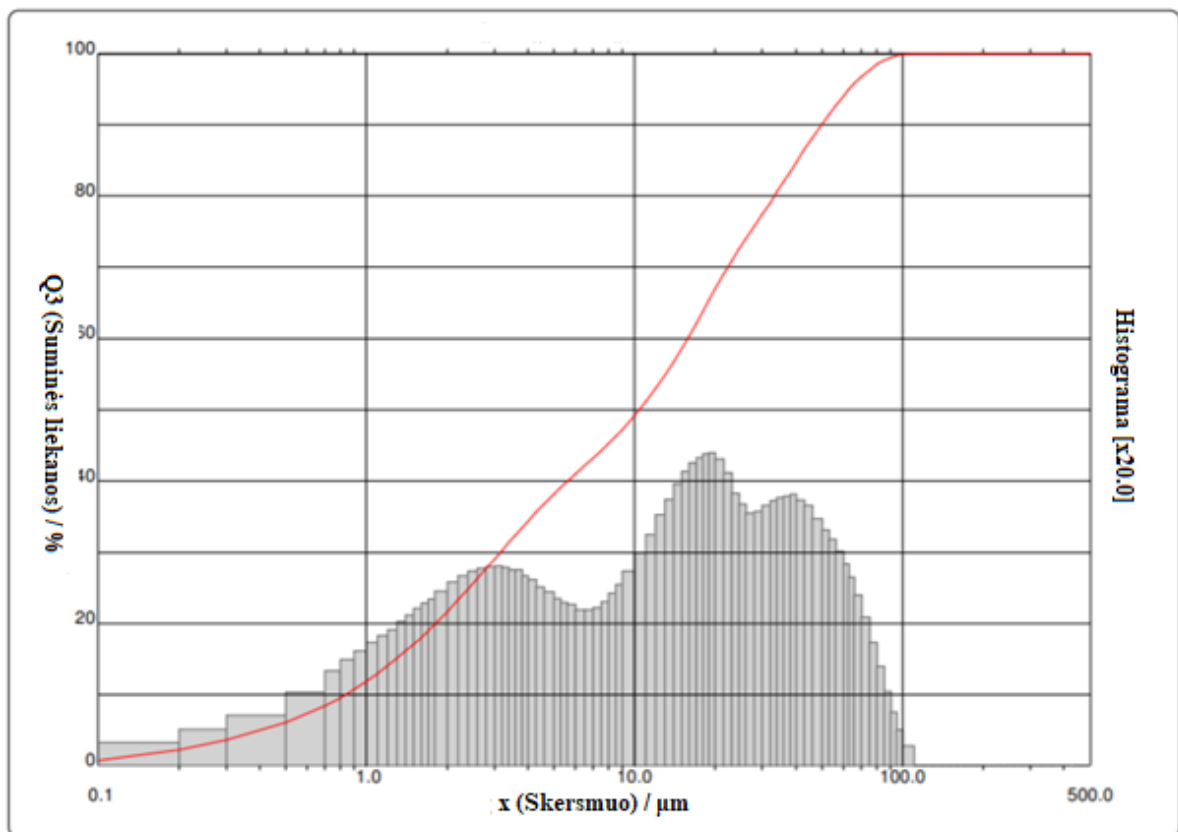
Šiame skyriuje pateikiami visi bandymų rezultatai: granuliometrijos sudėties, Bleino bandymo, kalorimetrijos bandymo, bandinių vandens įgeriamumo, mišinio be užpildų sudėties sudarymo ir lengvojo betono mišinio kūrimo.

2.4.1 Granuliometrinė sudėtis

Atliktų granuliometrinės sudėties tyrimų rezultatai pateikiami 2.1 ir 2.2 lentelėse ir 2.11 paveiksle.

2.1 lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis

Sieto akutės dydis, mm	Smėlio liekana ant sieto, g	Dalinė liekana ant sieto, %	Suminės liekanos, %
2,800	0,1	0,05	0,05
2,000	1,4	0,7	0,75
1,400	8,1	4,05	4,8
1,000	10,2	5,1	9,9
0,710	41,6	20,8	30,7
0,500	47,3	23,65	54,35
0,355	24,4	12,2	66,55
0,250	25,3	12,65	79,2
0,180	18,9	9,45	88,65
0,125	11,7	5,85	94,5
0,090	5,1	2,55	97,05
0,063	2,4	1,2	98,25
0,000	3,9	1,95	100,2
Iš viso:	200,4		



2.11 pav. Cemento granulimetrinė sudėtis

2.2 lentelė. Cemento granulimetrinė sudėtis

x	0.10	0.20	0.30	0.50	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Q3	0.82	2.29	3.66	6.07	8.40	9.59	10.77	11.91	13.02	14.09
q3	0.04	0.16	0.25	0.35	0.51	0.66	0.74	0.80	0.86	0.91
x	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60
Q3	15.12	16.13	17.11	18.07	19.00	19.90	21.64	23.30	24.86	26.33
q3	0.95	1.01	1.05	1.10	1.13	1.16	1.22	1.29	1.32	1.36
x	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30	4.60	5.00
Q3	27.71	29.01	30.23	31.37	32.43	33.43	34.35	35.62	36.76	38.13
q3	1.38	1.39	1.40	1.39	1.37	1.37	1.32	1.30	1.25	1.21
x	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	10.00
Q3	39.05	39.90	40.95	42.13	43.22	44.25	45.25	46.24	47.22	49.16
q3	1.17	1.14	1.12	1.09	1.09	1.10	1.14	1.21	1.27	1.36
x	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00
Q3	51.08	52.98	54.88	56.75	58.59	60.39	62.13	63.80	65.40	66.92
q3	1.49	1.61	1.75	1.86	1.97	2.06	2.12	2.16	2.19	2.19
x	21.50	23.00	24.50	26.00	28.00	30.00	32.00	34.00	36.00	38.00
Q3	69.02	70.89	72.52	73.99	75.76	77.42	79.01	80.53	81.98	83.36
q3	2.14	2.05	1.91	1.83	1.76	1.78	1.82	1.85	1.87	1.88
x	40.00	43.00	46.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00	66.00	70.00
Q3	84.68	86.50	88.16	90.11	91.41	92.59	93.99	94.92	95.75	96.70
q3	1.90	1.86	1.82	1.73	1.65	1.58	1.50	1.41	1.32	1.19
x	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0
Q3	97.67	98.42	98.99	99.39	99.66	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.04	0.86	0.69	0.52	0.37	0.24	0.13	0.00	0.00	0.00
x	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	240.0	260.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	280.0	300.0	330.0	360.0	400.0	430.0	460.0	470.0	490.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2.4.2. Bleino bandymas

Atlikus Bleino bandymą (rezultatai 2.3 lentelėje) Akmenės cementui CEM I 42,5R nustatytas jo savitasis paviršius, kuris apibūdina cemento smulkumą.

2.3 lentelė. Bleino bandymo rezultatai

Eil. Nr.	Temperatūra T, °C	laikas t, s
1	19,8	104,577
2	19,6	105,293
3	19,5	105,471
	Vidurkis	105,114
1	19,4	104,483
2	19,4	105,172
3	19,5	104,565
	Vidurkis	104,74

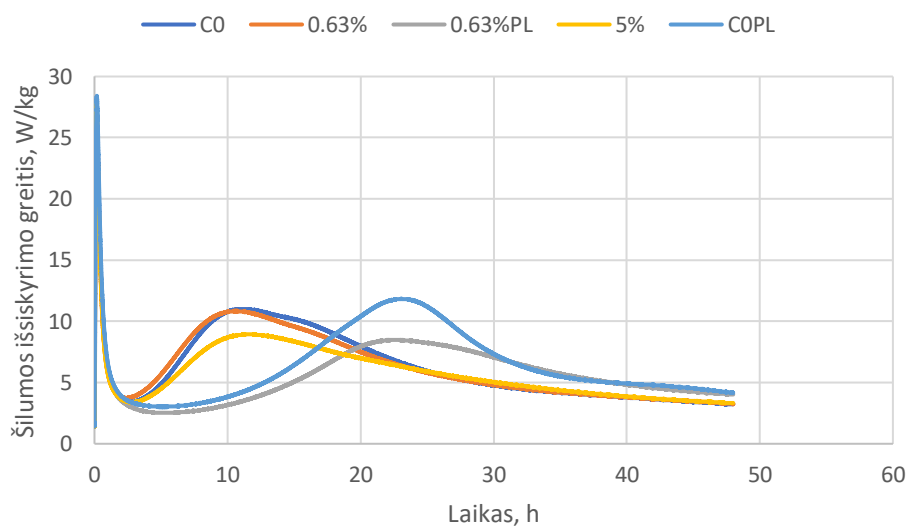
Apskaičiuotas vidutinis cemento savitasis paviršius – $3785,2859 \frac{m^2}{kg}$.

2.4.3. Kalorimetrijos bandymas

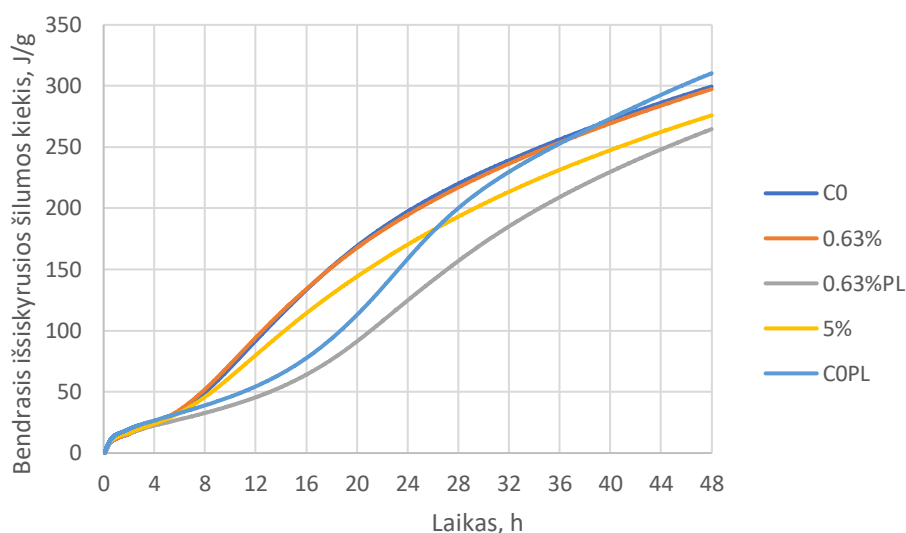
Kalorimetrijos bandymas atliekamas su penkiais mišinių variantais (žr. 2.4 lentelė.) tam, kad būtų nustatomas skirtingų medžiagų poveikis mišinio hidratacijos proceso trukmei, tam tikru hidratacijos metu išsiskyrusiam šilumos kiekiui (žr. 2.12 pav.) ir bendram hidratacijos metu išsiskyrusios šilumos kiekiui (žr. 2.13 pav.).

2.4 lentelė. Kalorimetrijos bandymui naudotų mišinių sudėtis

	Smėlis, %	Cementas, %	Vanduo, %	Stireno akrilas, %	Plastiklis, %	Sklidumas, mm
C0	75	25	12,25	-	-	131
5%	75	25	10,7	5,0	-	113
0,63%	67	33	14,7	0,63	-	183
C0PL	67	33	11,4	-	0,6	275
0,63%PL	67	33	11,4	0,63	0,6	274



2.12 pav. Tam tikru metu išsiskyrusios šilumos kiekis



2.13 pav. Bendras išsiskyrusios šilumos kiekis

Stireno akrilo priedas, nenaudojant plastiklio, nekeičia cemento hidratacijos greičio. Mažesnis kiekis (0,63 %) šio priedo neturi įtakos ir išsiskyrusios šilumos kiekiui cemento hidratacijos metu, tačiau didesnis 5 % stireno akrilo kiekis dėl sumažinto cemento kiekio mišinyje, sumažina išsiskyrusios šilumos kiekį apie 8 %, kai nenaudojamas plastiklis. Į mišinį pridėjus plastiklio cemento hidratacija sulėtėja dėl plastiklio poveikio, tačiau šiuo atveju ir nedidelis kiekis stireno akrilo pagreitina cemento hidrataciją, nors išsiskyrusios šilumos kiekis sumažėja apie 10 %.

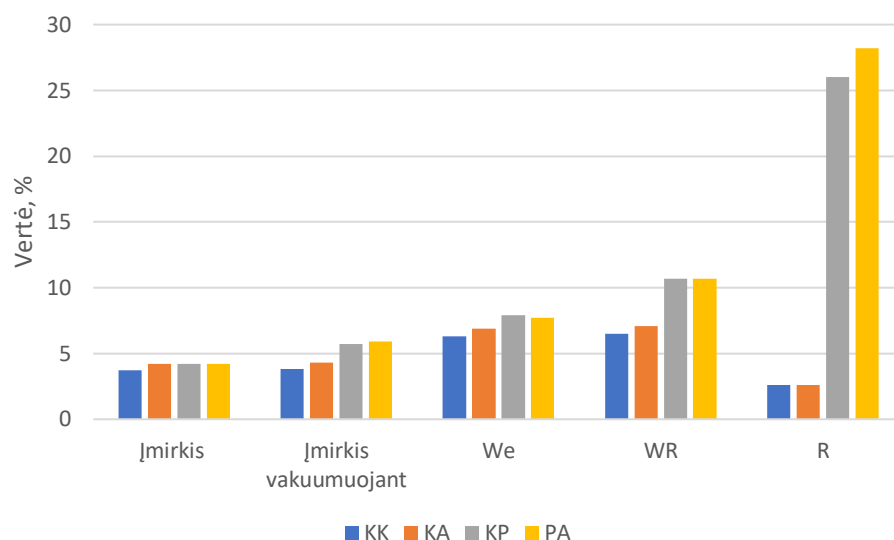
2.4.4. Vandens įgeriamumo bandymas

Vandens įgeriamumas nusako mišinio gebėjimą sugerti ir savyje išlaikyti vandenį. Taip pat tai nusako mišinio atsparumą šalčiui. Buvo bandomi keturi mišiniai (žr. lentelė. 2.5).

2.5 lentelė. Vandens įgeriamumo bandymui naudoti mišiniai

	Smėlis, %	Cementas, %	Vanduo, %	Stireno akrilas, %	Plastiklis, %	Keramzitas, %	Plastiko granulės, %
KK	58	29	11,7	-	0,18	13	-
KP	58	29	10,7	-	0,18	-	13
KA	58	29	12,3	0,63	0,18	13	-
PA	58	29	10,2	0,63	0,18	-	13

Atliktų bandymų rezultatai pateikti 2.14 pav. Rezultatų reikšmės paaiškintos 2.6 lentelėje



2.14 pav. Vandens įgeriamumo bandymų rezultatai

2.6 lentelė. Dydžių paaiškinimas

Vandens įmirkis W_h , %	Vandens įmirkis – tai savybė įgerti skystį ir jį įgertą sulaikyti. Įmirkis yra nusakomas įgerto skystio kiekiu medžiagos tūryje arba masėje.	$W_h = \frac{m_1 - m}{m} 100$	m – išdžiovint o iki pastovios masės bandinio masė, g; m_1 – įmirkyto bandinio masė, g.
Bendrasis atviras bandinio poringumas W_R , %	Bendrojo atvirojo poringumo rodiklis charakterizuoja visą atvirąją susisiekiančią bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros aspektu.	$W_R = \rho \frac{m_2 - m}{m} 100$	m – išdžiovinto iki pastovios masės bandinio masė, g; m_2 – įmirkyto vakuume bandinio masė ore, g. ρ – bandinio tankis, g/cm ³ .
Bandinio efektyvusis poringumas W_e , %	Bandinio efektyvusis poringumas parodo efektyviai dirbančių porų ir kapiliarų procentinį kiekį bandinyje.	$W_e = \rho \frac{m_1 - m}{m} 100$	m – išdžiovint o iki pastovios masės bandinio masė, g; m_1 – įmirkyto bandinio masė, g. ρ – bandinio tankis, g/cm ³ .
Poringos rezervas R_p , %	Poringos erdvės rezervas lemia tą bandinio poringosios erdvės dalį, kuri iš pradžių nėra užpildyta vandeniu, bet pamažu užsipildo ciklinių bandymų metu. Tada joje (šaldomame paviršiuje) pasireiškia jėgos impulsas. Kuo didesnis poringos erdvės rezervas, tuo paprastai bus didesnis eksploatacinis atsparumas šalčiui.	$R_p \equiv \left(1 - \frac{W_e}{W_R} \right) 100$	W_e – efektyvusis poringumas pagal vandens įmirkį po 72 h, %. W_R – bendrasis atviras poringumas pagal vandens įmirkį vakuumuojant (specialiu režimu), %.

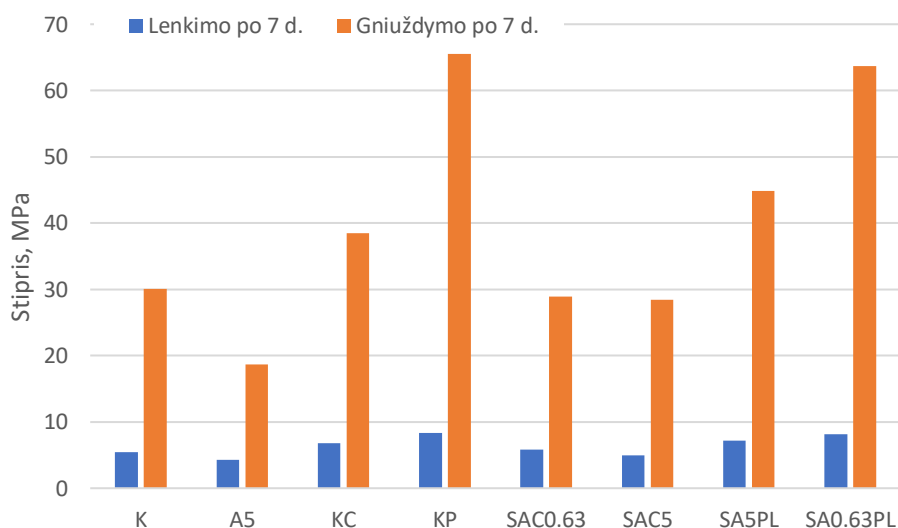
Įvertinus bandinių vandens įgeriamumą buvo atliktas skėlimo bandymas, gautas stiprumo santykis prieš ir po įmirkymo. KK 0,57; KA 0,55; KP 0,58; PA 0,61.

2.4.5. Mišinio be lengvojo užpildo sudarymas

Iš viso buvo suformuotą 8 skirtingi mišiniai (žr. 2.7 lentelę) ir nustatytas jų gniuždomasis ir lenkiamasis stipris po 7 ir 28 parų (žr. 2.15 pav.). Sudarant lengvojo betono mišinius buvo atsižvelgta į suformuotų mišinių be lengvojo užpildo savybes ir jų pagrindu buvo sudaromi mišiniai su lengvuju užpildu.

2.7 lentelė. Mišinių be lengvojo užpildo sudėtis

	Smėlis, %	Cementas, %	Vanduo, %	Stireno akrilas, %	Plastiklis, %
C	75	25	12,25	-	-
A5	75	25	10,7	5,0	-
KC	67	33	15,0	-	-
SAC0,63	67	33	14,7	0,63	-
SAC5	67	33	15,0	5,0	-
KP	67	33	11,4	-	0,6
SA5PL	67	33	11,7	5,0	1,9
SA0,63PL	67	33	11,4	0,63	0,6



2.15 pav. Gniuždomasis ir lenkiamasis stipris

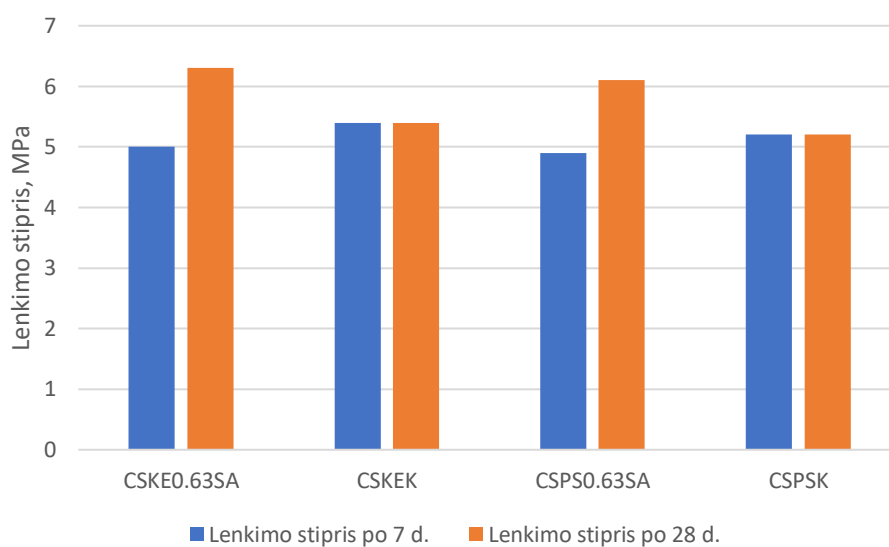
2.4.6. Lengvojo betono mišinio sudarymas

Lengvojo betono mišinio suformavimas pradėtas pasirenkant optimalią mišinio sudėtį. Pirmiausia buvo pasirinktas fiksuotas plastiklio kiekis. Mišiniai tarpusavy skyrėsi stireno akrilo kiekiu ir naudojamu užpildu (žr. 2.8 lentelę). Maišant mišinius buvo pastebėta, kad keramzitas dalį vandens sugeria, todėl mišiniuose su keramzitu vandens yra daugiau, nei mišiniuose su plastiko granulėmis.

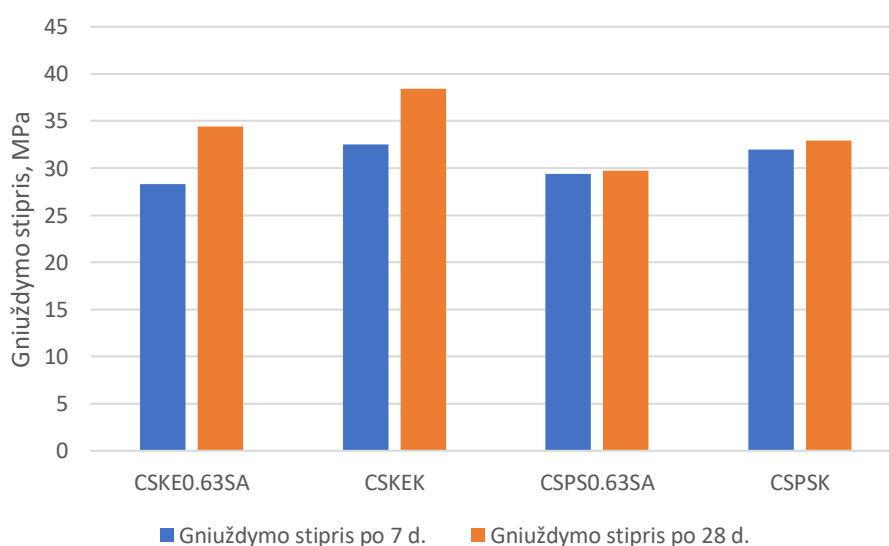
2.8 lentelė. Mišinių su lengvuoju užpildu sudėtis

	Smėlis, %	Cementas, %	Vanduo, %	Stireno akrilas, %	Plastiklis, %	Keramzitas, %	Plastiko granulės, %
CSKE0,63SA	58	29	11	0,63	0,18	13	-
CSPS0,63SA	58	29	10	0,63	0,18	-	13
CSKEK	58	29	11	-	0,18	13	-
CSPSK	58	29	10	-	0,18	-	13

Visi iš mišinių pagaminti bandiniai buvo bandomi po 7 ir 28 parų. Buvo bandomi gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai (žr. 2.16 pav. ir 2.17 pav.).



2.16 pav. Bandinių lenkiamasis stipris po 7 ir po 28 parų



2.17 pav. Bandinių gniuždomasis stipris po 7 ir po 28 parų

Dėl geresnių technologinių savybių tolimesniems tyrimams buvo pasirinkta naudoti CSKE0,63SA ir CSPS0,63SA mišiniai.

2.5. Skyriaus apibendrinimas

Darbe atliktas lengvojo betono mišinio parinkimas. Atlikti smulkiųjų užpildu granulometrijos tyrimai (smėlio – vibraciniu sietu, cemento – lazeriniu granulimetru). Bleino bandymu rastas cemento savitasis paviršiaus plotas – $3785 \frac{m^2}{kg}$. Nustatyta akrilo emulsijos ir plastiklio įtaka hidratacijos procesui kalorimetru, stireno akrilo priedas, nenaudojant plastiklio, nekeičia cemento hidratacijos greičio, pridėjus plastiklio cemento hidratacija sulėtėja. Suformuotus bandinius patalpinus į vakuumavimo indą rastas vandens įgeriamumo bandymas, mišinys, kuriame buvo naudojamas stireno akrilas ir perdirbto plastiko užpildais parodė geriausius rezultatus ir poringos erdvės rezervas siekė beveik 30 %, kai tuo tarpu mišinio su keramzitu šis dydis siekė vos 2,5 %. Taip pat atliktas triašio lenkimo ir centrinio gniuždymo bandymai. Atlikus didelės apimties bandymų programą (iš viso išbandyta 16 mišinių – 8 skirtingi mišiniai be lengvojo užpildo ir 8 skirtingi lengvojo betono mišiniai) tolesniems tyrimams pasirinktos dvi betono sudėtys, kurių parametrai po 28 kietėjimo parų: $f_{cm.cube} = 30$ MPa, o tankis $\rho \leq 1882 \text{ kg/m}^3$ (stipris f_{cm} nustatytas bandant $40 \times 40 \times 40$ mm kubelius, kuris apytiksliai būtų 26,43 MPa bandant standartinius $150 \times 150 \times 150$ mm kubelius) ir $f_{cm.cube} = 34$ MPa, o tankis $\rho \leq 1710 \text{ kg/m}^3$ (stipris f_{cm} nustatytas bandant $40 \times 40 \times 40$ mm kubelius, kuris apytiksliai būtų 30,4 MPa bandant standartinius $150 \times 150 \times 150$ mm kubelius).

3. ARMUOTO LENGVOJO BETONO SIJŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪSENOS SKAITINIAI TYRIMAI

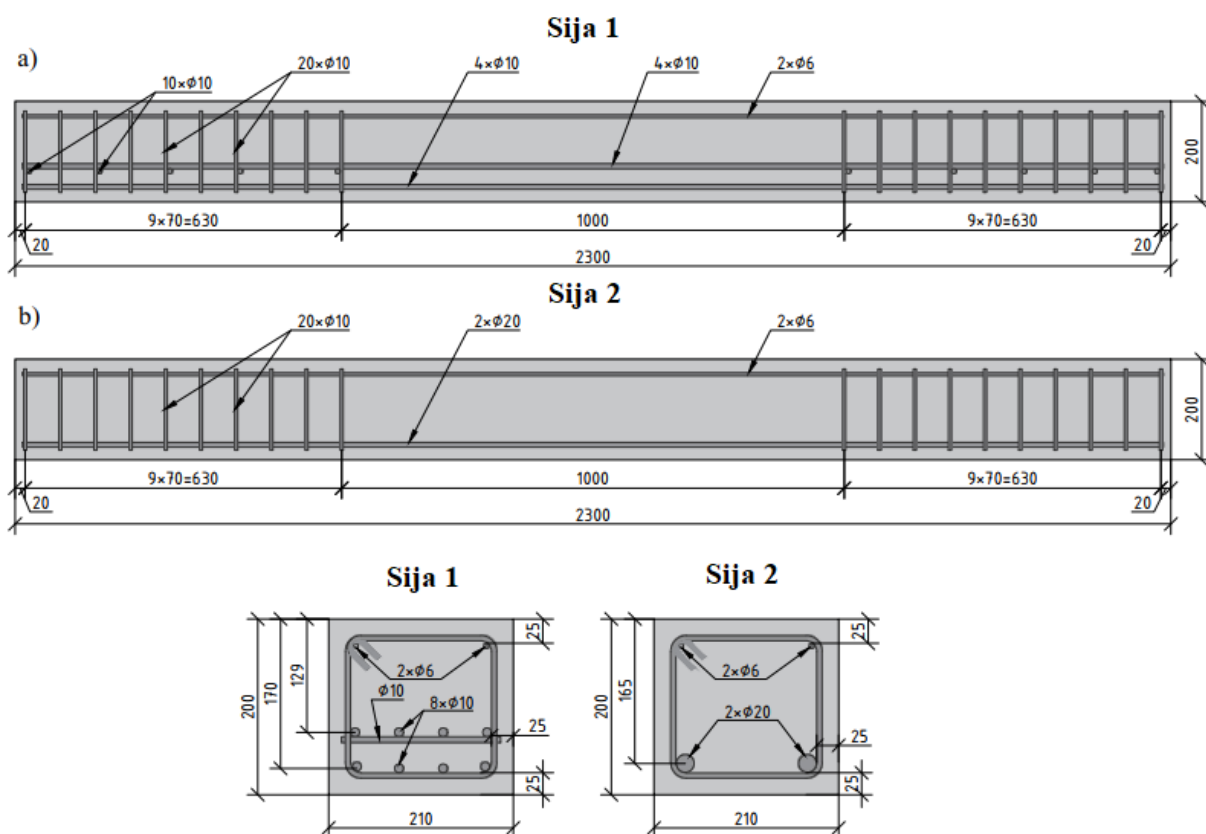
3.1. Skaitiniam modeliavimui naudojami duomenys

Atlikus stiprumo bandymus su lengvojo betono bandiniais pagamintais iš mišinių CSPS ir CSKE gautas bandinių gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai. Pagal LST EN 1992-1-1 „Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1 dalis.“ 3 ir 11 skyriuose pateiktas formules buvo nustatytas mišinių vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris, vidutinis ašinis tempiamasis stipris, charakteristinis ašinis tempiamasis stipris, betono tamprumo modulis ir betono deformacijos. Modeliavimui naudoti parametrai pateikti 3.1 lentelėje. CSPS – betono mišinys su plastiko granulėmis, CSKE – betono mišinys su keramzitu, CP – betono mišinys su pelenais, LW – parametrai skaičiuoti pagal lengvojo betono formules, NW – parametrai skaičiuoti pagal įprasto betono formules.

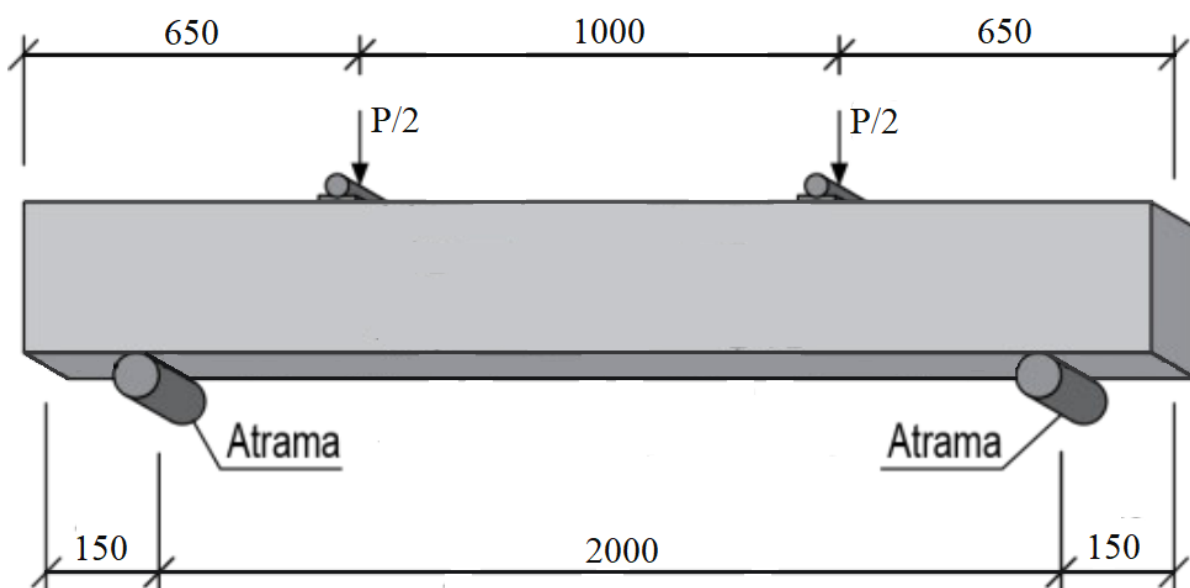
3.1 lentelė. Skaitiniam modeliavimui naudoti parametrai

Bandinio pavadinimas	Vidutinis gniuždomasis stipris [MPa]	Vidutinis tankis [kg/m ³]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	$f_{ctk0.05}$ [MPa]	$f_{ctk0.95}$ [MPa]	E_{cm} [GPa]
CSPS LW	26,4	1882,5	34,4	2,4	22,0	40,9	23,3
CSKE LW	30,4	1709,7	38,4	2,5	23,3	43,2	19,9
CP LW	28,6	1899,0	36,6	2,6	23,5	43,7	24,2
CSPS NW	26,4	1882,5	34,4	2,7	24,1	44,8	31,9
CSKE NW	30,4	1709,7	38,4	2,9	26,8	49,9	32,9
CP NW	28,6	1899,0	36,6	2,8	25,7	47,6	32,5

Bandymuose naudotas VILNIUS TECH sukurtas mišinys, kuriame dalis smulčiojo užpildo buvo pakeista po komunalinių atliekų deginimo likusiais pelenais. Su šiuo mišiniu anksčiau buvo atliktas eksperimentas ir eksperimento duomenys buvo naudojami palyginimui su skaitiniu metodu gautais rezultatais. Kiekvienam betono mišinio variantui modeliuojama po dvi sijas (žr. 3.1 pav.). Abiejų sijų armavimo procentas vienodas, tačiau pirmo sijos efektyvusis skerspjūvio aukštis 15 mm mažesnis, nei antros sijos ir pirmoje sijoje naudojami aštuoni 10 mm skerspjūvio strypai, o antroje du 20 mm skerspjūvio strypai. Abiejų sijų išorinė geometrija vienoda, skerspjūvio aukštis – 200 mm, plotis – 210 mm, ilgis – 2,3 m. Eksperimento metu buvo atliekami lenkiamojo stiprio bandymai pridėdant dvi koncentruotas jėgas 650 mm atstumu nuo kraštų ir atremiant sijas 150 mm atstumu nuo krašto. Apkrovimo schema pateikta 3.2 paveiksle. Gauti rezultatai panaudoti palyginimui su teoriškai apskaičiuotų sijų su programiniu paketu ATENA rezultatais.



3.1 pav. Sijų geometrija ir armatūros išdėstymas

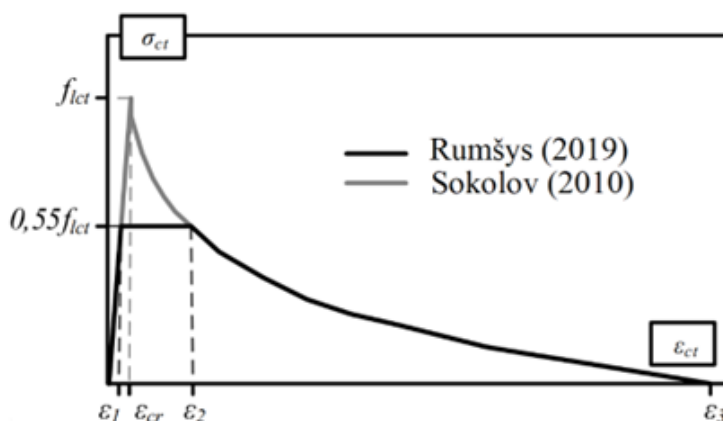


3.2 pav. Sijos apkrovimo schema

3.2. Modeliavimas baigtinių elementų programa ATENA

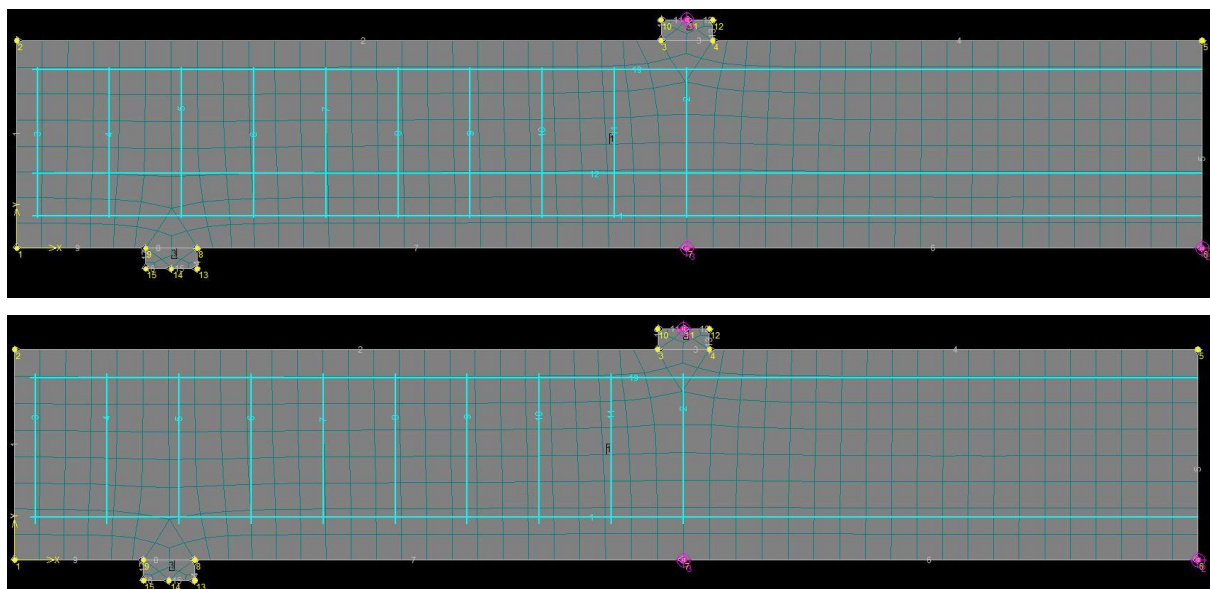
Modeliuojant ATENA buvo naudojami D. Rumšio (Rumšys, 2019) ir A. Sokolov (Sokolov, 2010) pasiūlyti medžiagų modeliai, atitinkamai, lengvajam ir įprastam betonui (žr. 3.3 pav.). f_{lct} – lengvojo betono vidutinis tempiamasis stipris, $\varepsilon_{cr} = f_{lct}/E_{lcm}$ – vidutinį tempiamąjį stiprį atitinkanti deformacija, $\varepsilon_1 = 0,55f_{lct}$ atitinkanti deformacija, horizontalioji ir

besileidžiančioji diagramos dalys nusako plyšių atsiradimo ir vystymosi etapus, o taškas ε_3 – nusako momentą, kai tempiamasis betonas darbe nebedalyvauja.

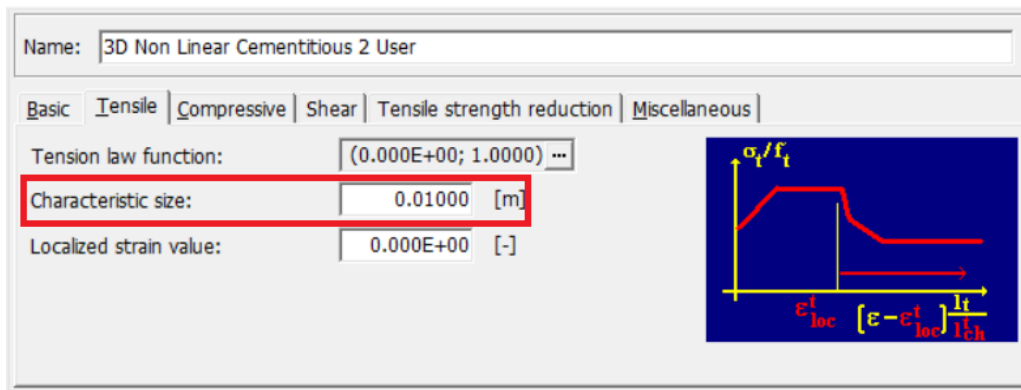


3.3 pav. D. Rumšio ir A. Sokolovo medžiagų modeliai (Rumšys, 2019), (Sokolov, 2010)

Apskaičiuotus betono mišinių parametrus suvedus baigtinių elementų programoje ATENA buvo modeliuojamos sijos su skirtingu armatūros išsidėstymu. Modeliuojama tik pusė sijos ir įvedama simetrijos ašis, nes visi gaminiai simetriški. Simetrijos ašis apibrėžiama kaip atrama, neleidžianti sijai pasislinkti išilgai elemento – x ašies kryptimi, bet leidžianti pasislinkti žemyn – y ašies kryptimi (žr. 3.4 pav.). Sumodeliavus sijas randamos sijų lenkimo momentų ir kreivių diagramos ir lyginamos su lenkimo momentų ir kreivių diagramomis gautomis eksperimento metu. Atliekant skaičiavimus ir apibrėžiant tempiamo betono savybes buvo pasirinktas charakteringasis dydis 0,01 m (žr. 3.5 pav.).



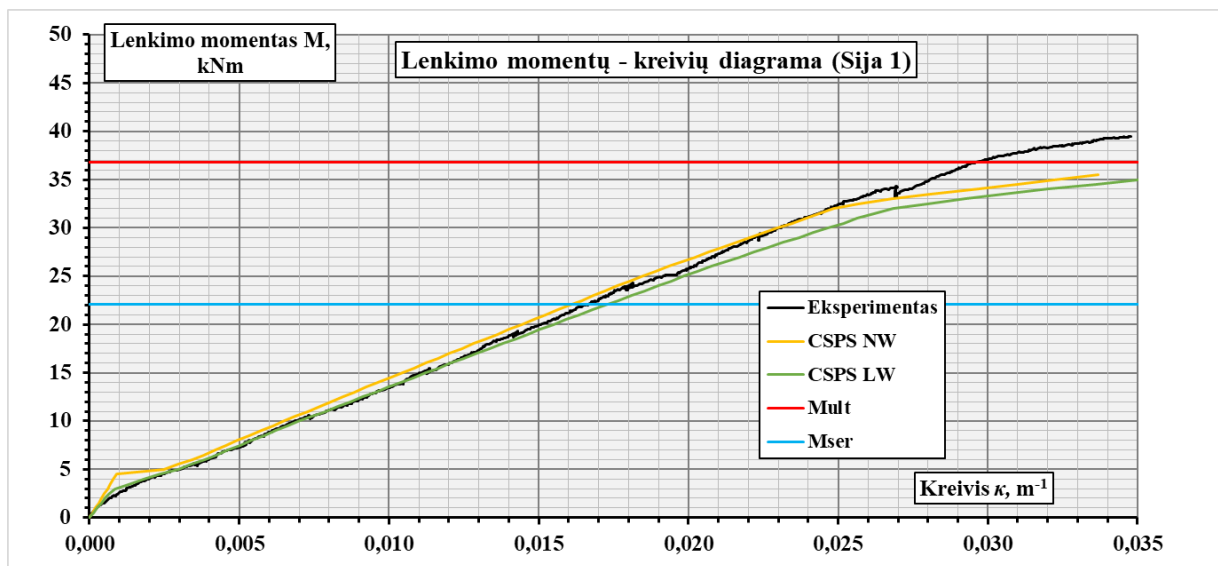
3.4 pav. Sijų baigtinių elementų modeliai



3.5 pav. Charakteringasis dydis

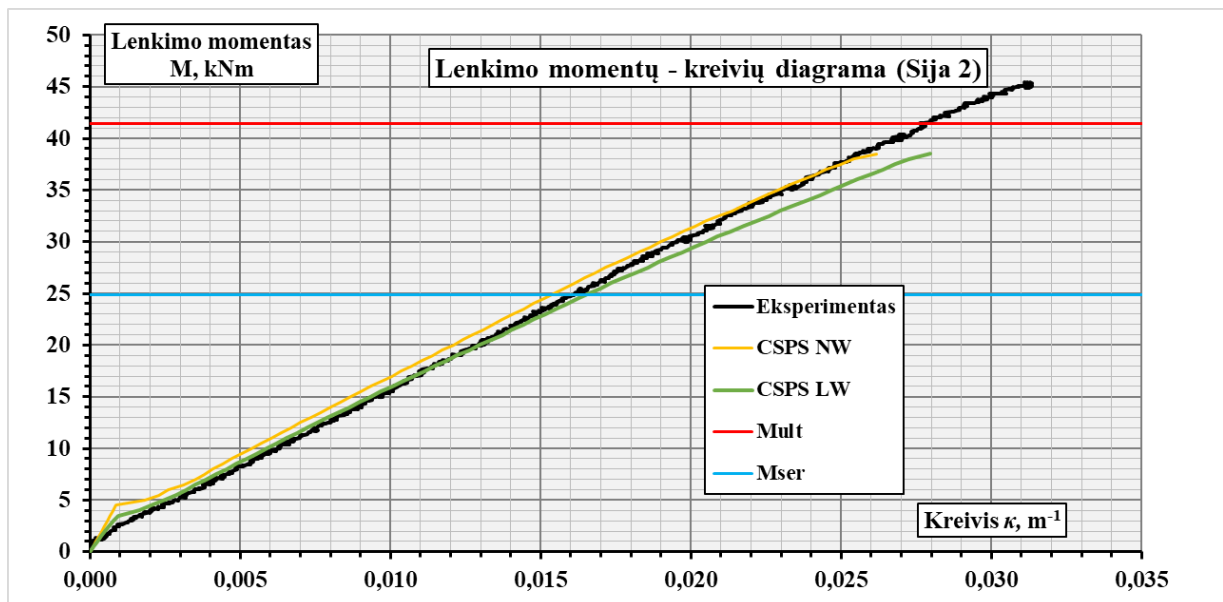
3.3. Modeliavimo rezultatai

Grafikuose raudona linija rodomas maksimalus atlaikomas lenkimo momentas, o mėlyna linija atitinka eksploatacinį lenkimo momentą, kuris šiame darbe priimtas 60 % maksimalaus laikomojo lenkimo momento. Iš grafiko (žr. 3.6 pav.) matyti, kad tiek lengvojo betono, tiek įprasto betono formulėmis apskaičiuotų charakteristikų betono grafikai labai gerai sutampa su eksperimentiniu grafiku, tačiau tiek vienas, tiek kitas variantas radikaliai atsiskiria nuo eksperimento, kai elemente pradeda formuotis įtrūkimai. Iki eksploatacinio lenkimo momento ribos lengvojo betono modelis gerai atitinka eksperimentinius rezultatus.



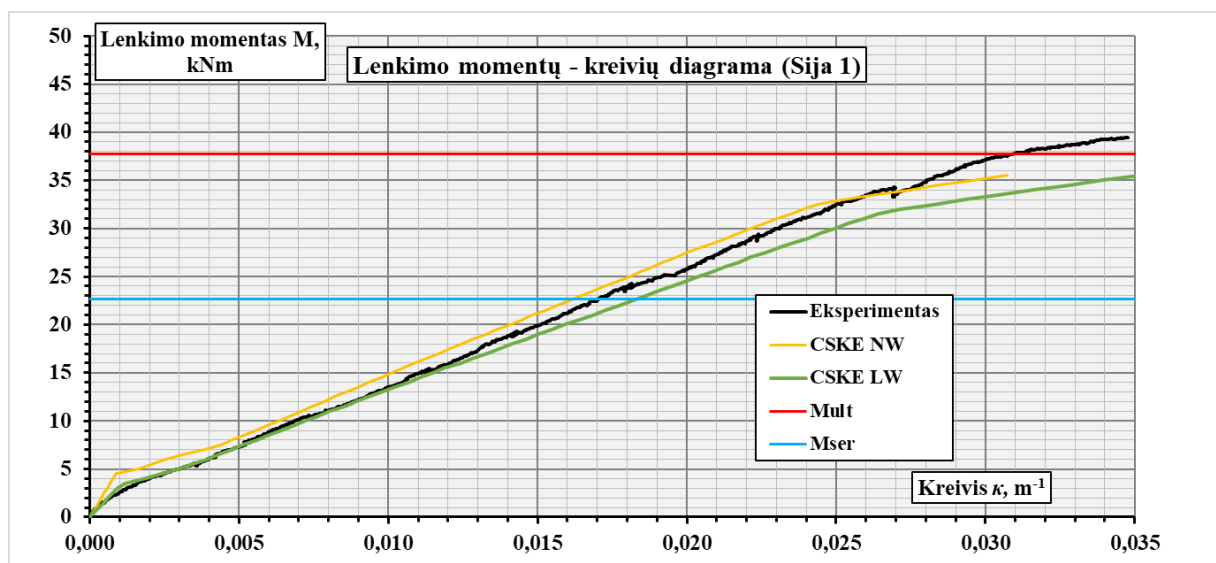
3.6 pav. CSPS sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Iš grafiko (žr. 3.7 pav.) matyti, kad lengvojo betono sijų įlinkiai iki apkrovos lygmens, atitinkančios eksploatacinį momentą, labai gerai sutampa su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Viršiju pastarąjį lenkimo momentą, gaunamos skaičiavimo paklaidos. Tuo tarpu normalaus svorio betono sijoms gaunamos atvirkščios tendencijos.



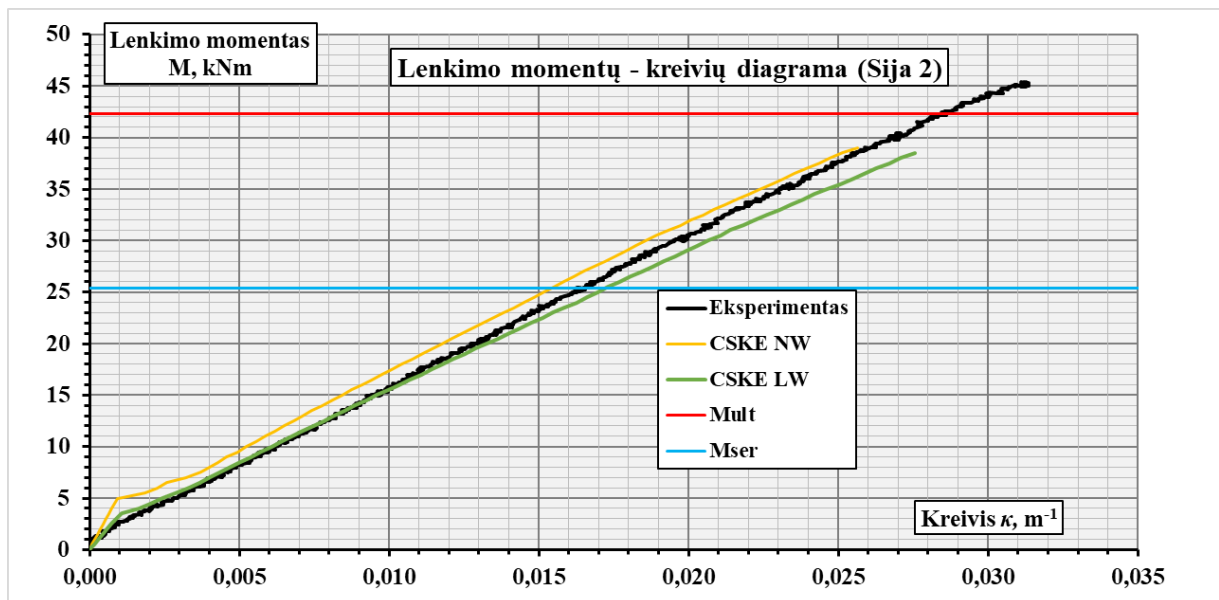
3.7 pav. CSPS sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Iš grafiko (žr. 3.8 pav.) matyti, kad lengvojo betono sijų teoriniai įlinkiai iki eksploatacinio lenkimo momento lygmens neblogai atitinka eksperimentinius rezultatus, tačiau vėlesniuose arovimo lygmenyse gaunamos paklaidos. Tuo tarpu įprasto betono teoriniai ir eksperimentiniai įlinkiai gerai sutampa visose apkrovimo stadijose.



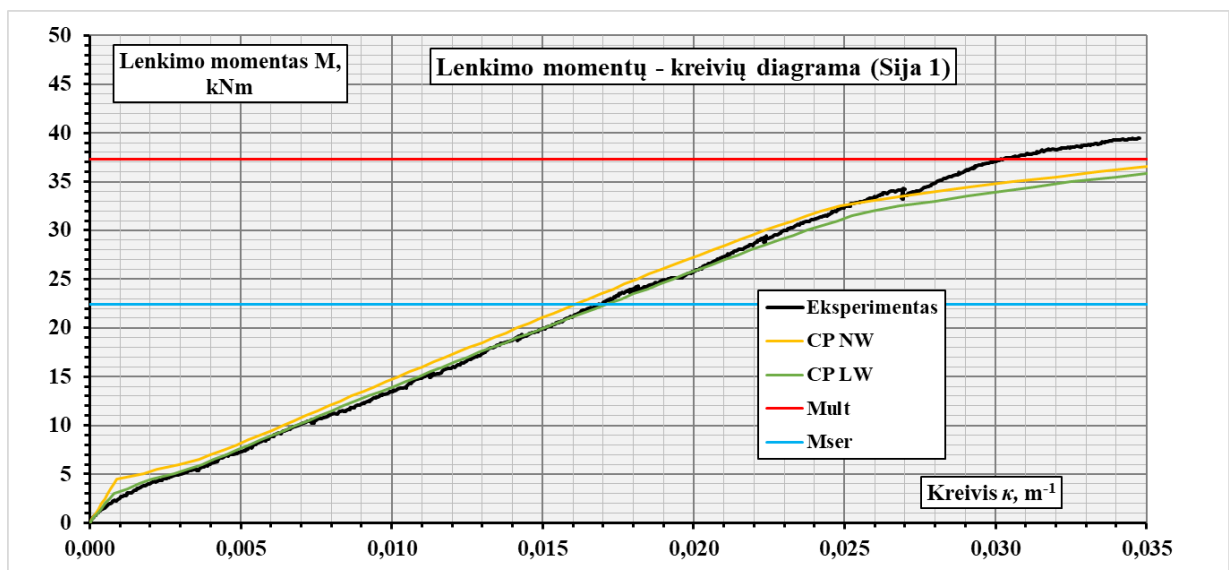
3.8 pav. CSKE sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Iš grafiko (žr. 3.9 pav.) matyti, kad lengvojo betono sijų lenkimo momentų ir sijų priklausomybės gerai atitinka eksperimentinę kreivę pradinėse apkrovimo stadijose bei nuo jos nukrypsta viršijus eksploatacinio lenkimo momento ribą. Įprasto betono sijoms teorinės ir eksperimentinės lenkimo momentų ir įlinkių kreivės yra lygiagrečios.



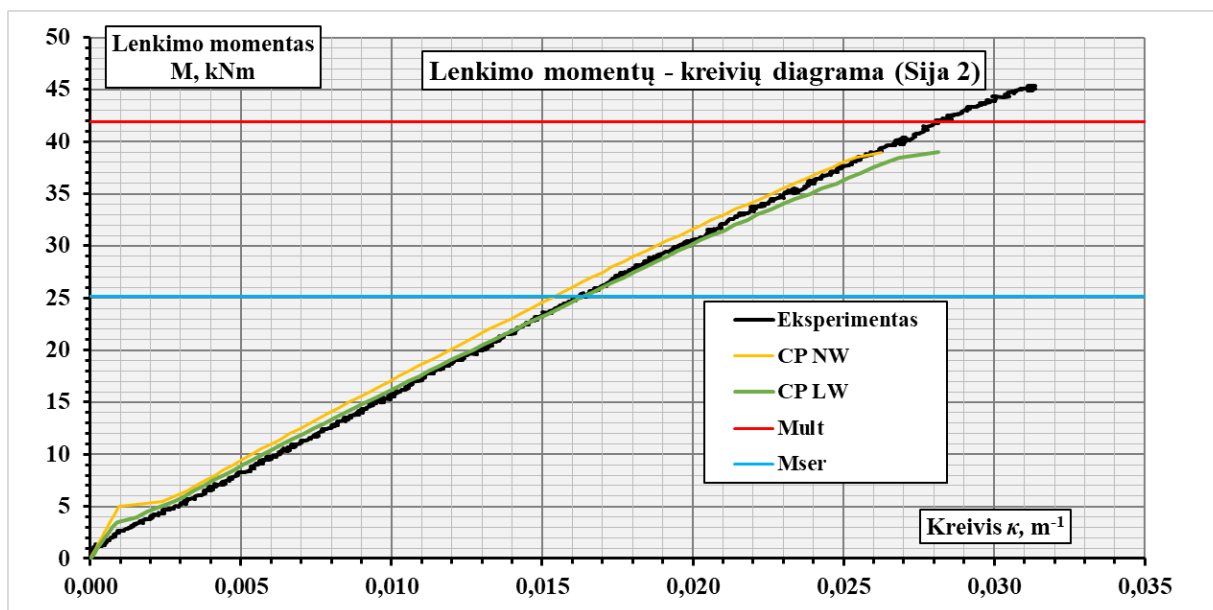
3.9 pav. CSKE sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Iš grafiko (žr. 3.10 pav.) matyti, kad lengvojo betono sijų įlinkiai labai gerai atitinka eksperimentinių rezultatus iki pleišėjimo momento ribos. Tuo tarpu įprasto betono sijoms gaunamas teorinių ir eksperimentinių rezultatų nesutapimas.



3.10 pav. CP sija 1 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Iš grafiko (žr. 3.11 pav.) matyti, kad lengvojo betono sijų teoriniai įlinkiai gerai atitinka eksperimentinių tyrimų rezultatus. Didesnės paklaidos gautos irimo stadijai artimuose apkrovimo lygmenyse. Įprasto betono sijoms gautas geras eksperimentinių ir teorinių rezultatų sutapimas stadijoje po plyšių atsivėrimo. Tačiau iki pleišėjimo gautos nemažos paklaidos. Tai rodo mažesnę eksperimentinę lengvojo betono stiprį lyginant įprastojo betono tempiamuoju stipriu.



3.11 pav. CP sija 2 teoriškai apskaičiuotų lenkimo momentų ir kreivių palyginimas su eksperimentu

Visų sijų teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas, esant eksploatacinio lenkimo momento ribą atitinkančiam apkrovimo lygmeniui, pateiktas 3.2 lentelėje.

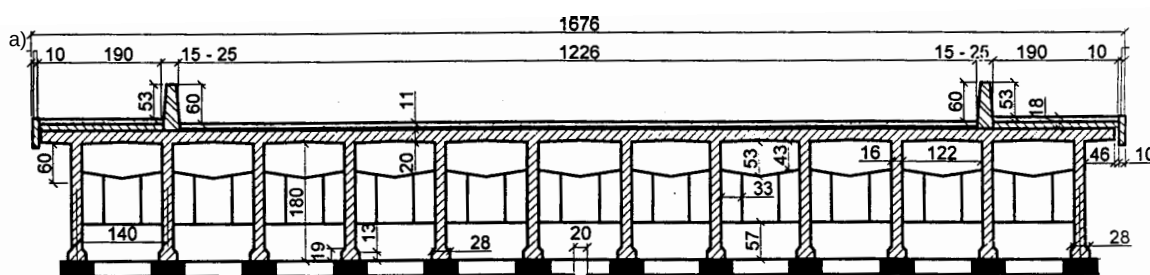
3.2 lentelė. Sijų teorinių ir eksperimentinių įlinkių palyginimas

Betono tipas	Įlinkiai, m						Vidurkis
	CSPS sija 1	CSPS sija 2	CSKE sija 1	CSKE sija 2	CP sija 1	CP sija 2	
Eks.	0,0165	0,0160	0,0170	0,0165	0,0170	0,0165	0,0166
NW	0,0161	0,0154	0,0162	0,0153	0,0160	0,0155	0,0158
LW	0,0174	0,0165	0,0185	0,0172	0,0170	0,0165	0,0172
Santykiniai įlinkiai							
$\frac{LW}{Eks}$	1,05	1,03	1,09	1,04	1,00	1,00	1,04
$\frac{LW}{NW}$	1,08	1,07	1,14	1,12	1,06	1,06	1,09
$\frac{NW}{Eks}$	0,98	0,96	0,95	0,93	0,94	0,94	0,95

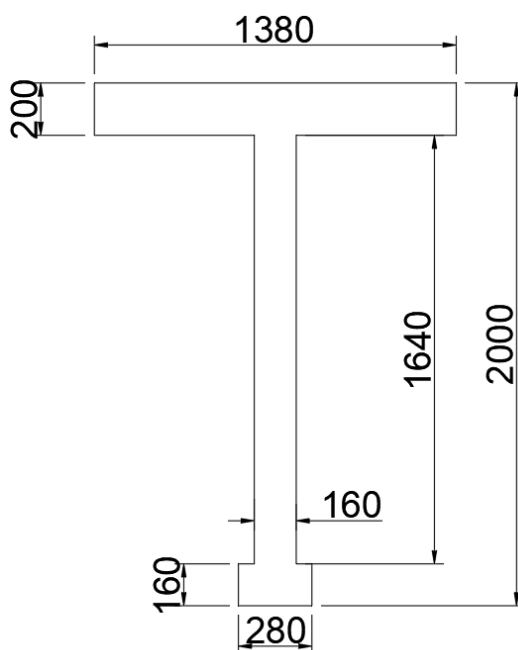
Iš pateiktų rezultatų matyti, kad lyginant su įprasto betono sijomis lengvojo betono elementų teoriniai sijų įlinkiai geriau sutampa su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Visais atvejais įprasto betono sijoms gautos didesnės teorinės reikšmės nei eksperimentinės. Gauti rezultatai tendencingi, kadangi eksperimentinėms sijoms panaudoti mažesnio standumo ir tempiamojo stiprio lengvojo betono mišiniai. Gautas teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas tiesiog atskleidžia įprasto lengvojo betono mišinių savybių skirtumus.

3.3. Lengvojo betono mišinio taikymas rekonstruojamo viaduko perdangai

Realios tilto sijos projektavimui pasirinktas viadukas Tilžės gatvėje, Šiauliuose. Viadukas pastatytas 1962 metais, nuo kada remontuotas ar dalinai rekonstruotas buvo keturis kartus. Viaduką sudaro 17 tarpatramių, kurių bendras ilgis – 324 metrai, o plotis – 17,24 metrai. Nagrinėjamos sijos yra IX viaduko tarpatramyje, kurio ilgis – 32,5 metro. IX viaduko tarpatramis yra intarpinė perdanga (žr. 3.12 pav.) Intarpinę perdangą sudaro 12 sijų su diafragmomis, sijų plotis – 1,38 m, aukštis – 2 m, viršutinės lentynos storis – 0,2 m, apatinės lentynos storis – 0,16 m, apatinės lentynos plotis – 0,28 m, sienelės storis – 0,16 m (žr. 3.13 pav.). Tilto konstrukcija stipriai pažeista ir turi būti rekonstruota, naują intarpinę siją planuojama gaminti iš lengvojo betono tokiu būdu neperkraunant atramų.



3.12 pav. Skersinis intarpinės perdangos pjūvis



3.13 pav. Sijos geometrija

Uždavinio tikslas – ortotropinių plokščių metodu rasti perdangą veikiančias įrašas pagal šiuolaikinį automobilinių apkrovų modelį, ir suprojektuoti skerspjūvį, kuris atlaikytų visas veikiančias apkrovas. Sijos parametrai suvesti į programą TILTAI 2000 (žr. 3.14 pav.).

PERDANGA

Pavadinimas: Tilžės viadukas

Plokštės storis d 200 mm

Tilto perdangos skaič. ilgis L 3250 cm

SİJA • Sijų skaičius 12

• Skersinių sijų skaičius 0

Perdangos plotis $B=2b$ 1656 cm

Atstumas tarp sijų ašių A 138 cm

Skersinė sija

Sijos viduryje

Sijos skerspjūvis prie atramų 1

Sijos skerspjūvis viduryje 1

Sijos galas

Mazgas A

Bv

Viršutinė juosta

Sienuotė

Apatinė juosta

Hv

Hs

Ha

E Iš 32000 MPa

E sk 32000 MPa

Sijos skerspjūvio biblioteka

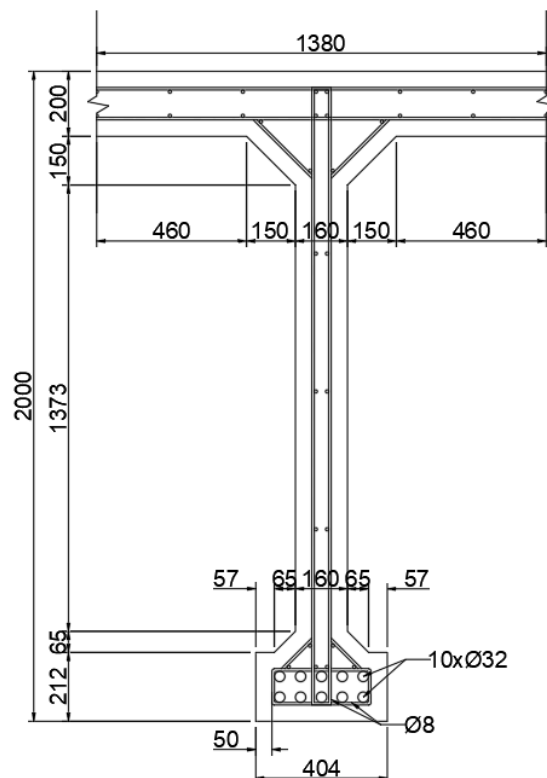
Koreguoti

1 Pagrindiniai skersp. parametrai

Nr.	Hv. cm	Bv. cm	Hs. cm	Bs. cm	Ha. cm	Ba. cm
1	0	0	164	16	16	28

3.14 pav. Sijos parametrų suvedimo langas TILTAI 2000

Ortotropinių plokščių metodu randami veikiantys lenkimo momentai nuo kintamos apkrovos ir nuo konstrukcijos savojo svorio – nuolatinės apkrovos. Projektuojamas normalinis pjūvis ir parenkama armatūra – 10xØ32 S500. Skersinio pasiskirstymo metodu randamos veikiančios skersinės jėgos nuo kintamų apkrovų ir nuo konstrukcijos savojo svorio – nuolatinės apkrovos. Projektuojamas įstrižasis pjūvis ir parenkama armatūra – 2xØ8 S240. Skerspjūvio armavimas parodytas 3.15 paveiksle.

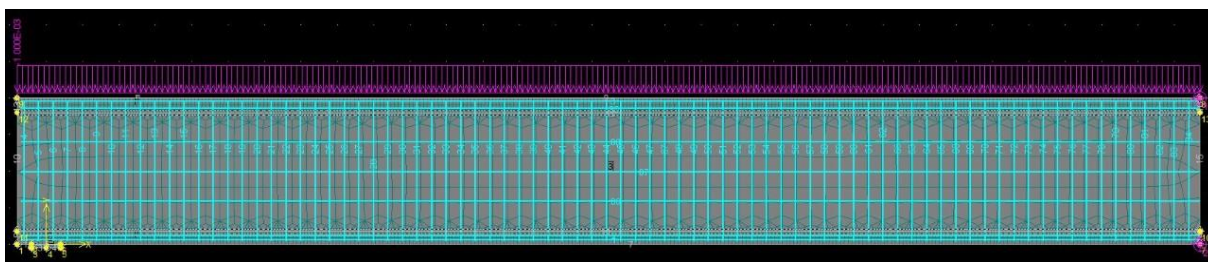


3.15 pav. Skerspjūvio armatūra ir geometrija

Elementas tuomet modeliuojamas ATENA (žr. 3.16 pav.), apkraunamas 0,2 kN/m apkrovos žingsniu iki suirimo ir matuojamas įlinkis kiekviename žingsnyje. Randami skaičiavimo žingsniai, kurių metu veikianti apkrova atitinka charakteristinį lenkimo momentą nuo nuolatinių apkrovų ir suminį charakteristinį lenkimo momentą (žr. 3.17 pav.). Įlinkis prie lenkiamojo momento nuo nuolatinių apkrovų atimamas iš suminio lenkiamojo momento ir gaunamas įlinkis – 0,0735 m. Dabartinėse normose automobилиniams tiltams įlinkis nereglamentuojamas, bet inžinerinė praktika rodo, kad $L/400$ įprastai priimamas kaip leistinas įlinkis, kuris gaunamas:

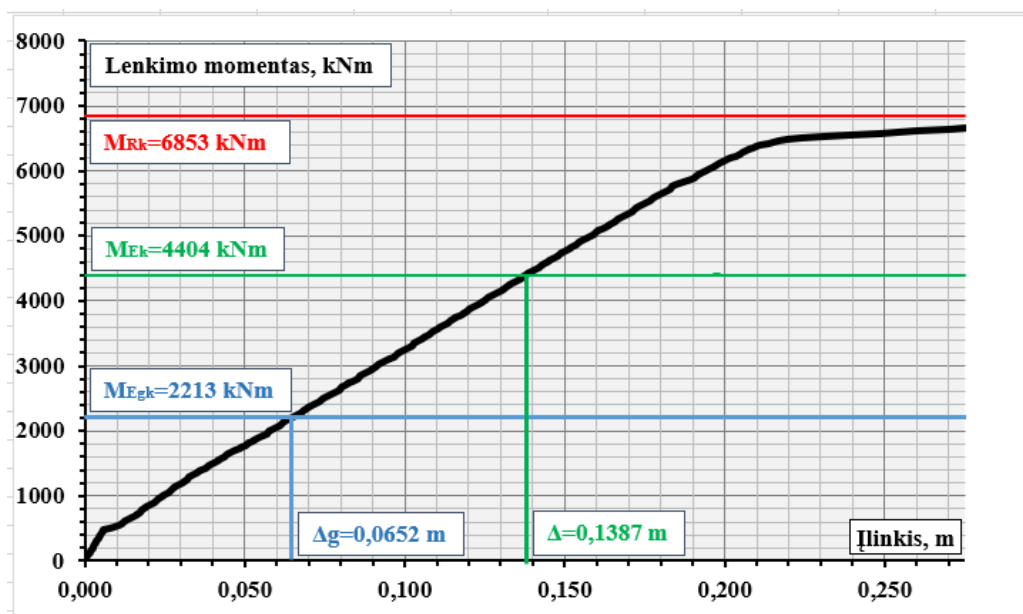
$$\frac{L}{400} = \frac{31,8}{400} = 0,0793 \text{ m}$$

Darbe priimta maksimalaus leistino įlinkio riba yra didesnė už apskaičiuotą teorinę lengvojo betono perdangos įlinkį nuo charakteristinės kintamos transporto apkrovos. Deformuotos sijų schemos nuo nuolatinės ir suminės charakteristinių apkrovų pavaizduotos 3.18 paveiksle.

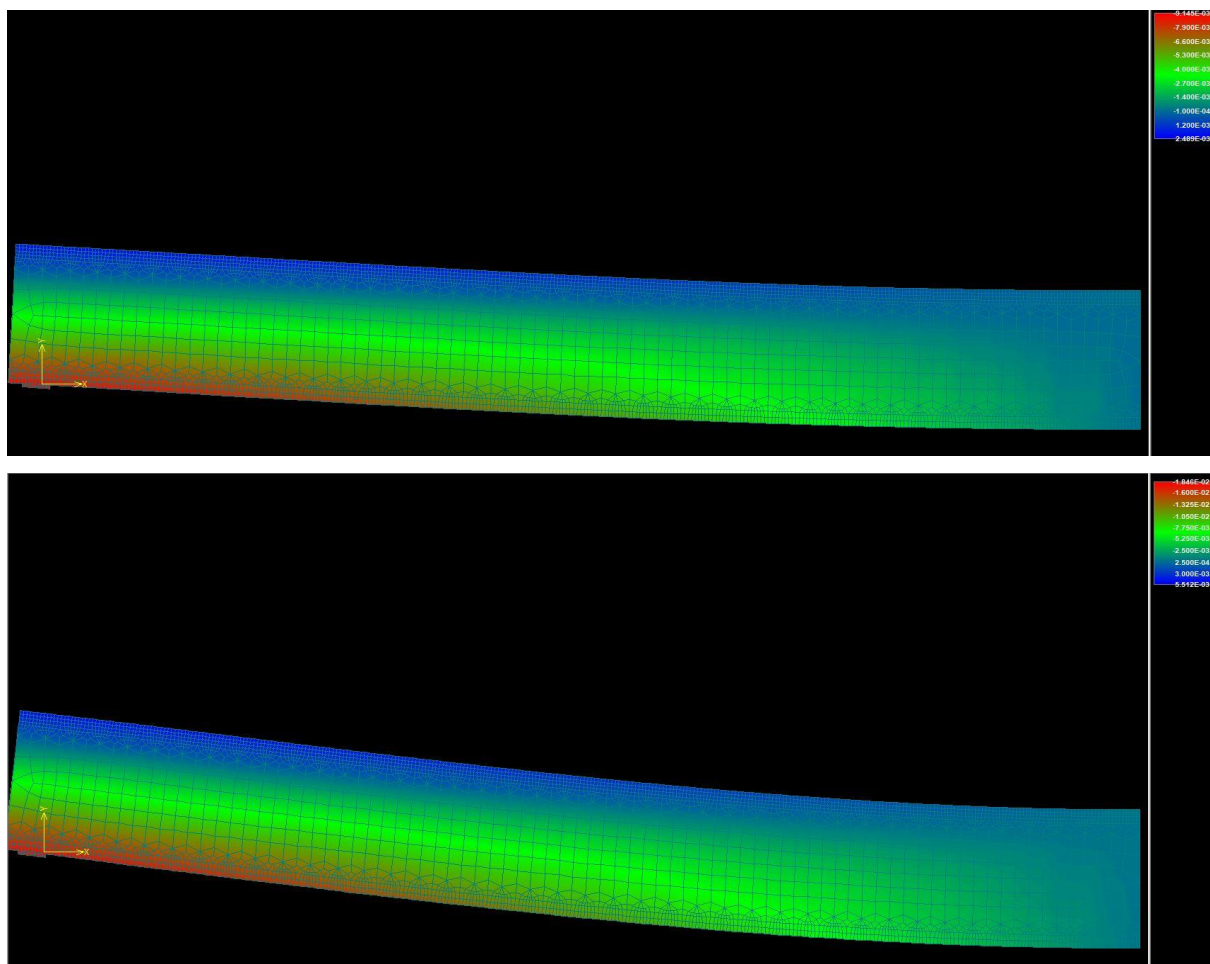


3.16 pav. Sumodeliuota sija programoje ATENA

Naujai suprojektuota perdanga neturi diafragmų ir būtų gaminama iš lengvojo betono, kas bendrai visos perdangos svorį sumažina 30,3 %.

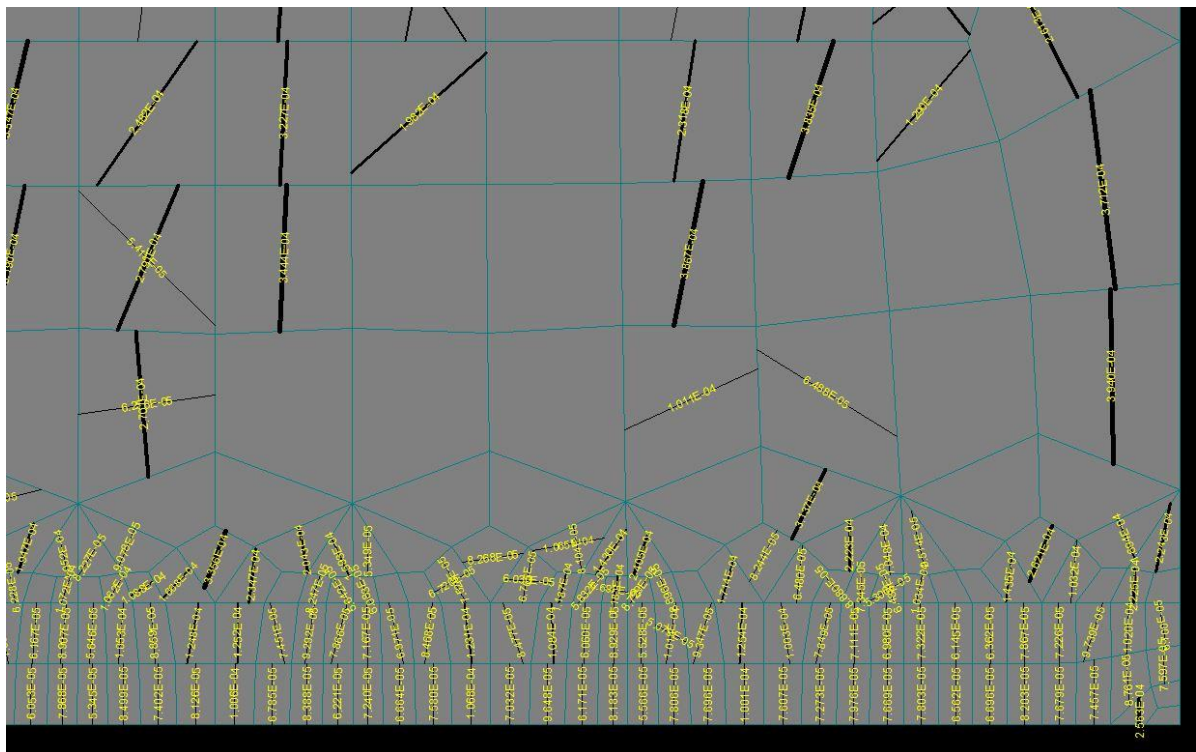
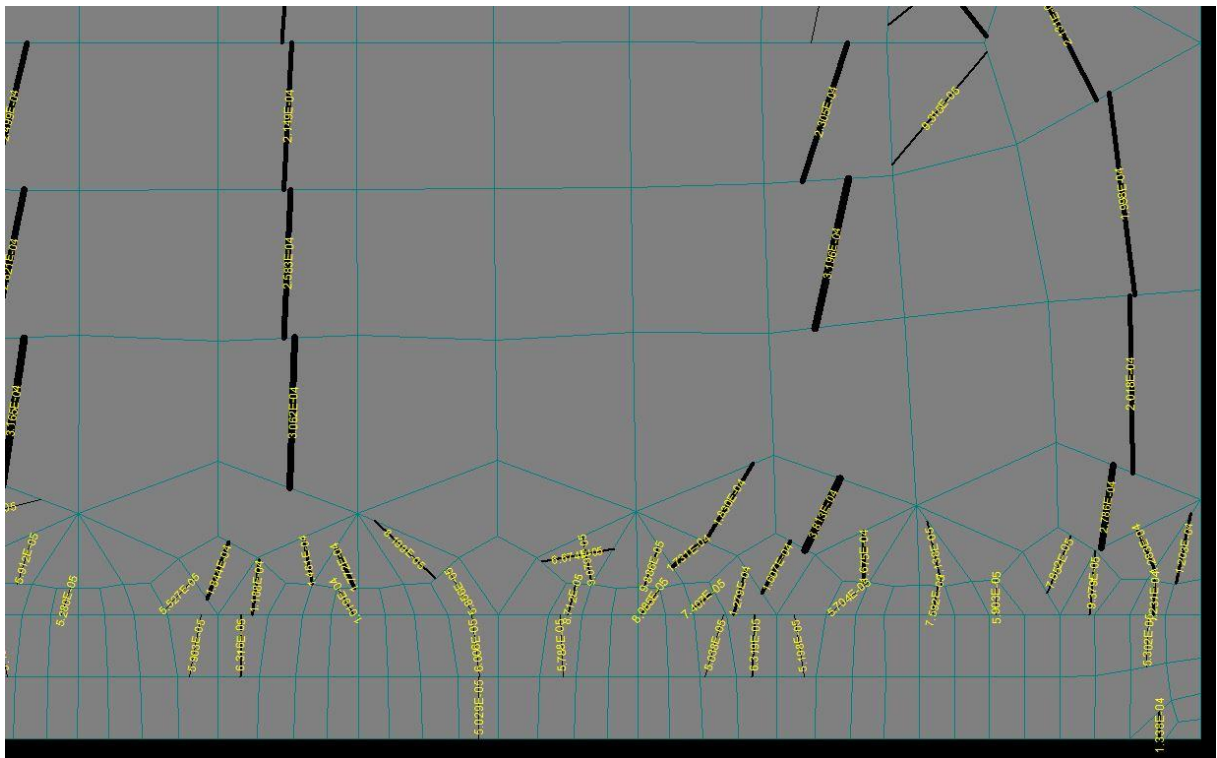


3.17 pav. ATENA gauta momentų – įlinkių diagrama



3.18 pav. a) įlinkiai nuo nuolatinės charakteristinės apkrovos, b) įlinkiai nuo suminės charakteristinės apkrovos

Taikant programą ATENA įvertintas perdangos pleišėjimas tempiamosios armatūros zonoje. Pleišėjimo charakteris nuo nuolatinės apkrovos bei suminės nuolatinės ir kintamos apkrovos pateiktas 3.19 pav. Nustatyta, kad tempiamojoje zonoje atsiradę plyšiai nuo nuolatinės apkrovos neviršija 0,30 mm, o nuo nuolatinės ir kintamos apkrovos – 0,39 mm.



3.19 pav. a) įtrūkiai nuo nuolatinės charakterinės apkrovos, b) įtrūkiai nuo suminės charakterinės apkrovos

LST EN 1992-1 normose leidžiamas plyšio plotis atsižvelgiant į aplinkos eksploatacines sąlygas yra 0,3 mm. Gauti teoriniai lengvojo betono perdangos plyšių pločiai yra apytiksliai LST EN 1992-1 normose reglamentuojamai ribinei įtrūkių reikšmei. Būtina pabrėžti, kad tikslesnei lengvojo betono pleišėjimo analizei būtini detalesni teoriniai tyrimai.

3.4. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje tyrimų metu sukurti betono mišiniai panaudoti armuoto betono sijų įtempių ir deformacijų būsenos skaitinėje analizėje taikant baigtinių elementų programą ATENA. Analizei reikalingos pasirinktų mišinių savybės nustatytos pagal galiojančiose normose nurodytas formules. Tyrimų metu sudarytos normalaus ir lengvojo betono sijų lenkimo momentų – įlinkių diagramos, kurios palygintos su VILNIUS TECH atliktų lengvojo betono sijų eksperimentinių tyrimų rezultatais. Palyginus tyrimų rezultatus, nustatyta, kad įprastojo betono įlinkiai yra mažesni už eksperimentinius. Gauti rezultatai tendencingi ir indikuoja apie šių elementų didesnę lenkiamąją standumą lyginant su lengvojo betono analogiškais elementais.

Lengvojo betono mišinys pritaikytas realaus rekonstruojamo viaduko perdangos konstrukcijoms. Normaliniame pjūvyje parinktas išilginės armatūros kiekis – 10xØ32 S500. Projektuojamas įstrižasis pjūvis ir parenkama armatūra – 2xØ8 S240 išdėstyta 200 mm žingsniu. Randamas įlinkis nuo charakteristinės nuolatinės apkrovos ir charakteristinės suminės apkrovos. Inžinerinėje praktikoje taikomas maksimalus leistinas įlinkis yra lygus $L/400 = 0,0793$ m, o modeliuojant su programa ATENA gaunamas įlinkis lygus 0,0735 m. Ribinių įlinkių sąlygą tenkina. Galiojančiose normose reglamentuojamas leistinas plyšio plotis yra 0,3–0,4 mm, priklausomai nuo aplinkos klasės ir apkrovos veikimo trukmės. Skaitinės analizės metu gautas plyšio plotis nuo nuolatinės charakteristinės apkrovos – 0,3 mm, o nuo nuolatinės ir kintamos suminės apkrovos – 0,39 mm. Gautų plyšių pločių reikšmė arti leistinos ribos. Tiksliesniems rezultatams gauti reikalingas detalesnė teorinė analizė.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Transporto tinklų infrastruktūroje, daugumoje pasaulio šalių dominuoja gelžbetonis. Dėl mažų eksploatacijos išlaidų, sąlyginai mažos kainos ir ilgo eksploatacijos laiko šio tipo konstrukcijos yra itin plačiai naudojamos. Didelis šių konstrukcijų svoris neretai lemia didesnes, nei pageidaujama kainas, o sudedamųjų betono dalių gavyba yra tiek neekonomiška, tiek neekologiška.
2. Viena galimybė sumažinti gavybos ir gamybos išlaidas gelžbetonyje yra lengvojo betono su perdirbtų atliekų užpildais taikymas. Dabartinės technologijos pakankamai pažengusios, kad lengvosios gelžbetonio konstrukcijos su perdirbtais užpildais savo mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis prilygsta įprasto betono konstrukcijoms, bet pranoksta jas savo mažu svoriu. Dėl mažesnio konstrukcijų svorio dažnai tiltų rekonstrukcijų metu perdangos gaminamos iš lengvojo betono, nes siekiama nepadidinti atramų perimamų apkrovų dėl intensyvesnio transporto srauto, ką kompensuoja kartais net 30 % mažesnis lengvojo betono tankis.
3. Darbe sukurti lengvojo betono mišiniai panaudojant perdirbto plastiko užpildus. Užpildų sukibimui su cementine matrica pagerinti jie papildomai mirkyti akrilo emulsijoje.
4. Darbe atliktas lengvojo betono mišinių eksperimentiniai tyrimai. Atlikus stiprumo ir vandens įgeriamumo bandymus su visais bandiniais (iš viso išbandyta 16 mišinių) tolesniems bandymas pasirinktas mišinys, kurio parametrai: $f_{cm.cube} = 30$ MPa, o tankis $\rho \leq 1882$ kg/m³ (stipris f_{cm} nustatytas bandant 40×40×40 mm kubelius, kuris apytiksliai atitinka 26,4 MPa bandant standartinius 150×150×150 mm kubelius) ir $f_{cm.cube} = 34$ MPa, o tankis $\rho \leq 1710$ kg/m³ (stipris f_{cm} nustatytas bandant 40×40×40 mm kubelius, kuris apytiksliai atitinka 30,4 MPa bandant standartinius 150×150×150 mm kubelius).
5. Apskaičiavus pasirinktų mišinių charakteristikas pagal įprasto ir lengvojo betonų formules buvo sumodeliuotos sijos su ATENA ir palygintos su realių sijų eksperimentų rezultatais. Skaitinėje analizėje taikyti D. Rumšio ir A. Sokolov siūlomi medžiagų modeliai, atitinkamai, lengvojo ir įprastojo armuoto betono elementams. Lengvojo betono elementams gautas geras teorinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimas. Gauti rezultatai rodo skaitinėje analizėje taikytų medžiagų fizikinių modelių adekvatumą bei sukurtų mišinių tinkamumą konstrukciniams armuoto betono lenkiamiesiems elementams.

6. Suprojektuota realaus rekonstruojamo viaduko intarpinės perdangos sija naudojant pagamintą lengvojo betono su plastikų užpildu mišinį. Ortotropinės plokštės metodu rastos įrašos, pagal kurias suprojektuota tilto perdanga pagal normalinio ir įstrižojo pjūvio sąlygas. Atsisakius senosios intarpinės perdangos diafragmų ir pakeitus įprastą betoną lengvuoju perdangos svoris sumažėjo 30,3 %. Taikant programą ATENA rastas naujai suprojektuotos perdangos įlinkis ir plyšio plotis, kurie palyginti su inžinerinėje praktikoje taikomu maksimaliu leistinu įlinkiu ir plyšio pločiu. Gauti rezultatai neviršija projektavimo normose reglamentuojamų ribinių reikšmių. Atlikti tyrimai rodo, kad betono mišinys su perdirbto plastiko užpildais ir akrilo emulsija yra tinkamas naudoti realių konstrukcijų projektavime.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

Abrams, M.S. (1971). Compressive strength of concrete at temperatures to 1600°F, In: Temperature and concrete. Detroit (MI): American Concrete Institute, [special publication]. SP-25.

Al-Akhras, N. M., Al-Akhras, K. M., & Attom, M. F. (2009). Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperatures. *Fire Safety Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.08.006>

Ali, M.; Maslehuddin, M.; Shameem, M.; Barry, M. (2018). Thermal-resistant lightweight concrete with polyethylene beads as coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 164, 739–749.

Aliabdo, A. A., Abd-Elmoaty, A. E. M., & Hassan, H. H. (2014). Utilization of crushed clay brick in cellular concrete production. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.11.005>

Babayemi, J. O., Nnorom, I. C., Osibanjo O., & Weber, R. (2019). Ensuring sustainability in plastics use in Africa: Consumption, waste generation, and projections. *Environmental Sciences Europe Volume*. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0254-5>

Bastami, M., Aslani, F., & Esmaeilnia OMran, M. (2009). High-Temperature Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/289178209>

Bastami, M., Aslani, F., & Omran, M. E. (2010). High-Temperature Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering*.

Belkharchouche, D., & Chaker, A. (2016). Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.160>

Bleino prietaisas. (n.d.). Apcis.ktu.edu. Retrieved May 17, 2023, from <https://apcis.ktu.edu/SAF/lt/site/katalogas?more=6891>

Bogas, J. A., & Gomes, A. (2013). Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction. *Materials & Design (1980-2015)*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.004>

Bouniol, P.: (2001), Bétons spéciaux de protection. Techniques de l'Ingénieur, vol. BN, Article BN3740, Avril.

Chandni, T. J., & Anand, K. B. (2018). Utilization of recycled waste as filler in foam concrete. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.032>

Coelho, A., & Brito, J. D. (2012). Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.210>

ComfyComfy. (2023). Comfycomfy.ca. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.comfycomfy.ca/collections/hulls>

Controls-Group (2023). *Mould 40x40x160 mm*. Controls-Group.com. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.controls-group.com/eng/cement-mortar-testing-equipment/hydraulic-shrinkage-mould-40x40x160-mm.php>

Demirboğa, R., & Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 723-727. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01032-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01032-3)

Dry sieving sieve shaker. (n.d.). Directindustry.com. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.directindustry.com/prod/nexopart-gmbh-co-kg/product-51736-1815675.html>

Elkins, B. V., Wilson, G. E., & Gersberg, R. M. (1985). Complete Reclamation of Wastewater and Sludge. *Water Science & Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.1985.0061>

Eurocode 2: 2004 Design of Concrete Structures. Part 1.2: General Rules—Structural Fire Design (EN1992-1-2), Commission of European Communities, Brussels.

Favaretto, P., Hidalgo, G. E. N., Sampaio, C. H., Silva, R. D. A., & Lermen, R. T. (2017). Characterization and Use of Construction and Demolition Waste from South of Brazil in the Production of Foamed Concrete Blocks. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app7101090>

Gherghel, A., Teodosiu, C., & Gisi, S. D. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>

Gunasekaran, K., & Pennaras, G. (2017). All-in-one about a momentous review study on coconut shell as coarse aggregate in concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. <https://doi.org/0976-6316>

Gunasekaran, K., Annadurai, R., & Kumar, P. (2011). Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. *Construction. Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.072>

H. Roser and M. Roser, *Forests and Deforestation*, (2021). <https://ourworldindata.org/palm-oil>

Hammer, T.A. (1995) Compressive strength and E-modulus at elevated temperatures. Report 6.1, High Strength Concrete phase 3. SINTEF-rapport nr STF70 A95023, Trondheim, 16 pp.

Hertz, K.D. (2005), Concrete strength for fire safety design, Mag Concrete Research, Vol.57, No.8.

Yazicioglu, S., Tugla, R., Ay, S., & Dermirel, B. (2018). Effect of High Temperature on Compressive Strength of Concrete Prepared Using Different Types of Aggregates. *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_34

Intertechnika (2023). *Planetarinė maišyklė*. Intertechnika.lt. Retrieved May 17, 2023, from <https://intertechnika.lt/planetarines-teslos-maisykles/>

Jensen, J.J., Hammer, T.A., Opheim, E., Hansen, P.A. (1995) Fire resistance of lightweight aggregate concrete. Paper presented at the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, s. 192-203, 12 pp.

Junaid, M. F., Rehman, Z. U., Kuruc, M., Medved', I., Bačinskas, D., Čurpek, J., Čekon, M., Ijaz, N., & Ansari, W. S. (2022). Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126061>

Kashani, A., Ngo, T. D., Mendis, P., Black, J. R., & Hajimohammadi, A. (2017). A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. V. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (pp. 3-10). The World Bank.

Kodur, V.K.R., Dwaikat, M.M.S. and Dwaikat, M.B.L: (2008), High-Temperature Properties of Concrete for Fire Resistance Modeling of Structures, *ACI Materials Journal*, Vol.105, No.5, 517-527

Křížová, K., Bubeník, J., & Sedlmajer, M. (2022). Use of Lightweight Sintered Fly Ash Aggregates in Concrete at High Temperatures. *MDPI*. <https://doi.org/buildings12122090>

Kumar, R. (2017). Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077>

Li, L., Purkiss, J.A.: (2005), Stress–strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, Vol.40.

Lie, T.T., Lin, T.D.: (1985), Fire performance of reinforced concrete columns, In: ASTM STP 882. Fire Safety: Science and Engineering, 176–205.

Lindgard, J., & Hammer, T. A. (1998). Fire resistance of structural lightweight aggregate concrete a literature survey with focus on spalling. *LIGHTCON*.

LST EN 196-1. *Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2007. 31 p.

LST EN 196-6. *Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2011. 17 p.

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

LST EN 933-1:2012. *Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2012. 18 p.

Mohammed, T. U., Khan, A. Z., & Mahmood, A. H. (2015). Recycling of Demolished Brick Aggregate Concrete as Coarse and Fine Aggregate. *International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures*.

Nguyen, H. P., Le, N. L., Nguyen, C. T., Nguyen, V. T., Nguyen, T. T., & Nguyen, X. H. (2020). Lightweight Concrete Using Lightweight Aggregates from Construction and Demolition Wastes—Production and Properties. *ICSCEA*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5144-4_55

Olive Biomass. (n.d.). Energieolive.com. Retrieved May 17, 2023, from <http://www.energieolive.com/index.php/en/biomass/olive-biomasses>

Olofinnade, O., Chandra, S., & Chakraborty, P. (2021). Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. *Environmental Sciences Europe Volume*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.176>

P. Shafigh, H. Bin Mahmud, M.Z. Bin Jumaat, R. Ahmmad, S. Bahri, Structural lightweight aggregate concrete using two types of waste from the palm oil industry as aggregate, *J. Clean. Prod.* 80 (2014) 187-196

Palmieri, S., Cipolletta, G., Pastore, C., Giosue, C., Akyol, C., Eusebi, A. L., Frison, N., Tittarelli, F., & Fatone, F. (2018). Pilot scale cellulose recovery from sewage sludge and reuse in building and construction material. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.015>

Powężka, A., Szulej, J., & Ogrodnik, P. (2020). *Effect of High Temperatures on the Impact Strength of Concrete Based on Recycled Aggregate Made of Heat-Resistant Cullet*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma13020465>

Prusty, J. K., Patro, S. K., & Basarkar, S. S. (2016). Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.06.003>

Raji, W. O., & Adeoye, T. O. (2017). Geophysical mapping of contaminant leachate around a reclaimed open dumpsite. *Journal of King Saud University - Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.09.005>

Rao, G. V. R. S. (2018). Utilization of Sustainable Materials to Enhance Geotechnical Characteristics of Soils. *International Journal of Engineering & Technology*. <https://doi.org/0.14419/ijet.v7i2.1.11043>

Rumšys, D. (2019). *Konstrukcinio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų deformacijų analizės modelis* [Daktaro disertacija, VILNIUS TECH].

Safiuddin, M., Salam, M., & Jumaat, Z. (2012). Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60093-4](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60093-4)

Saikia, N., & Brito, J. D. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>

Savva, A., Manita, P. and Sideris, K.K. (2005), Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol.27.

Schneider, U. (1985) Behavior of concrete at high temperatures. RILEM committee 44-PHT, Kassel Tyskland, 130 pp.

Scribd (2023). *U-Series Instruction Manual*. Scribd.com. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.scribd.com/document/297268943/U-Series-Instruction-Manual-820-7001-15Issue-03#>

Sewage sludge. (2014, June 1). In *Wikipedia*. https://www.wikiwand.com/en/Sewage_sludge

Sharipudin, S. S., & Ridzuan, A. R. M. (2012). Influence of Waste Paper Sludge Ash (WPSA) and Fine Recycled Concrete Aggregate (FRCA) on the Compressive Strength Characteristic of Foamed Concrete. *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.376>

Sholonchem (2023). *First-class Electronic Chemical Supplier*. Sholonchem.com. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.sholonchem.com/en>

Sokolov, A. 2010. *Tension stiffening model for reinforced concrete beams*. [Daktaro disertacija, VILNIUS TECH].

Tay, J. H., Yip, W. K., & Show, K. Y. (1991). Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material. *Journal of Environmental Engineering*. <http://ojps.aip.org/eeo>

TBI (n.d.). *Palm Kernel Shell*. Totalbiofuelindonesia.com. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.totalbiofuelindonesia.com/EN/Bisnis/Cangkang-Kelapa-Sawit.html>

Tedjditi, A. K., Ghomari, F., Taleb, O., Belarbi, R., & Bouhraoua, R. T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120734>

U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, H. Mahmud, M.M. Fayyadh, Shear behaviour of reinforced palm kernel shell concrete beams, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2918-2927.

Vaickelionis, G. & Valančienė, V. (2015). Lightweight Concrete with an Agricultural Waste – Buckwheat Husk. *Construction Materials*. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.8662>