



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Endrius Šlyžius

**GULSČIOSIOS SIŪLĖS ĮTAKOS MŪRO MECHANINĖMS SAVYBĖMS
ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF BED JOINT INFLUENCE TO MECHANICAL
PROPERTIES OF MASONRY**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Juozas Valivonis

(Vardas, pavardė)

2017-05-29

(Data)

Endrius Šlyžius

GULSČIOSIOS SIŪLĖS ĮTAKOS MŪRO MECHANINĖMS SAVYBĖMS
ANALIZĖ

ANALYSIS OF BED JOINT INFLUENCE TO MECHANICAL
PROPERTIES OF MASONRY

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vadovas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

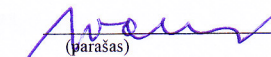
Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas


(parašas)

Juozas Valivonis

(vardas, pavardė)

2017-11-20

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Endriui Šlyžiui
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Gulsčiosios siūlės įtakos mūro mechaninėms savybėms analizė

patvirtinta 2017 m. kovo 15 d. dekanų įsakymu Nr. 122ST

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. birželio 5 d.

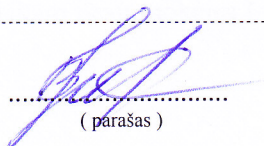
BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

.....Išanalizuoti literatūrą nagrinėjamos temos klausimu. Išanalizuoti faktorius turinčius įtaką skiedinio gulsčiojoje siūlėje mechaninėms savybėms.
Nustatyti skiedinio gulsčiojoje siūlėje mechanines savybes. Eksperimentiškai ištirti gulsčiosios siūlės įtaką mūro gniuždomajam stipriui ir tamprumo moduliui.....

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: lekt. L. Rutkelienė, lietuvių kalbos konsult.

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

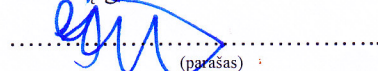
Vadovas


(parašas)

Bronius Jonaitis, dr., doc.

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau


(parašas)

Endrius Šlyžius.

(vardas, pavardė)

2015- spalio 15

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Endrius Šlyžius, 20113160

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Gulsčiosios siūlės įtakos mūro mechaninėms savybėms analizė“ patvirtintas 2017 m. kovo 15 d. dekanų potvarkiu Nr. 122st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas doc. dr. Bronius Jonaitis.

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

(Parašas)

Endrius Šlyžius
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Gulsčiosios siūlės įtakos mūro mechaninėms savybėms analizė
Autorius	Endrius Šlyžius
Vadovas	Bronius Jonaitis
Kalba: lietuvių	
Anotacija Pagrindinis šio darbo tikslas yra išnagrinėti mūrėjimo skiedinio savybes gulsčiojoje siūlėje ir eksperimentiškai ištirti gulsčių siūlių įtaką mūro gniuždomajam stipriui ir deformacijoms. Skiedinio, gulsčiojoje siūlėje, mechaninės savybės žymiai skiriasi nuo skiedinio savybių nustatytų, bandant etaloninius bandinius, todėl eksploatuojamus mūrinius pastatus, jų rekonstrukcijos metu, svarbu teisingai nustatyti mūro, kaip kompozitinės medžiagos, laikomąją galią. Trumpalaikė statinė apkrova bandomi etaloniniai skiedinio bandiniai, tiriamos mūrėjimo skiedinio deformacinės bei mechaninės savybės, trumpalaikė statinė gniuždymo apkrova bandomi silikatinų plytų mūro fragmentai. Darbe nustatytas skiedinio stipris ir tamprumo modulis, bandant etaloninius bandinius. Išnagrinėtos savybės darančios įtaką mūro mechaninėms savybėms. Nustatytas mūro gniuždomasis stipris ir tamprumo modulis, gauti rezultatai palyginti su analitiniais metodais apskaičiuotais rezultatais. Baigiamąjį darbą sudaro keturi skyriai, kuriuose apžvelgiamas mūro deformacijų būvis, savybės darančios įtaką bendroms mūro mechaninėms savybėms, atliekami eksperimentiniai skiedinio ir mūro tyrimai, nagrinėjami analitiniai skaičiavimų metodai ir pateikiami grafiniai rezultatai, išvados. Darbo apimtis yra 72 puslapiai be priedų, 60 paveikslų, 12 lentelių ir 32 literatūros šaltinių sąrašas.	
Prasminiai žodžiai: Gulsčioji siūlė, mūras, mūro gaminy, skiedinys, vandens cemento santykis, įtempių ir deformacijų būvis, igertis, gniuždomasis stipris, tamprumo modulis.	

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures

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

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

Title	Analysis of bed joint influence to mechanical properties of masonry
-------	--

Author	Endrius Šlyžius
--------	-----------------

Academic supervisor	Bronius Jonaitis
---------------------	-------------------------

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The main master thesis aim is to analyze brick mortar properties in bed joint and experimentally investigate bed joint influence to masonry compressive strength and deformations. Bed joint mortar mechanical properties are greatly different from mortar properties determined by testing standard specimens, consequently when masonry buildings are reconstructed it is very important to correctly examine masonry like composite material bearing load capacity. By applying short term loads standard mortar specimens are examined, mechanical and deformational properties of mortar are investigated. By applying short term static load calcium silicate masonry prisms are tested. In this thesis mortar modulus of elasticity and bearing load results are gained by testing standard specimens. Properties that makes vast difference to mechanical properties of masonry are examined. Experimentally determined masonry bearing load and modulus of elasticity results are compared with results that are calculated using analytical methods. Thesis consists of 4 sections in which masonry stress-strain state and mortar properties that makes influence to mechanical properties of masonry are reviewed, experimental mortar and masonry tests are performed, analytical calculation methods are examined and graphical results are provided. Thesis contains of 72 pages (appendix excluded), 60 figures, 12 tables, 32 literature references.

Keywords: Bed joint, masonry, masonry unit, mortar, water cement ratio, stresses and deformations, absorption, compressive strength, modulus of elasticity.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ŽYMENYS	13
ĮVADAS	15
1. GNIUŽDOMOJO MŪRO ĮTEMPIAI IR DEFORMACIJOS	17
1.1. Gniuždomojo mūro įtempių deformacijų būvis	17
1.2. Mūro irties stadijos.....	22
1.3. Veiksniai, turintys įtakos mūro mechaninėms savybėms	27
1.3.1. <i>Mūro gaminio poveikiai</i>	27
1.3.2. <i>Skiedinio poveikiai</i>	29
1.3.3. <i>Mūro, kaip vienalytės medžiagos, poveikis</i>	30
1.4. Mūro gaminio ir skiedinio sąlyčio zonos įtaka	30
1.4.1. <i>Skiedinio paskirtis</i>	30
1.4.2. <i>Vandens įgerties įtaka mūro mechaninėms savybėms</i>	33
1.4.3. <i>Kontakto zonos paviršių struktūra</i>	35
1.5. Pirmojo skyriaus išvados	35
2. MŪRIJIMO SKIEDINIO GULSČIOJOJE SIŪLĖJE SAVYBIŲ TYRIMAI	36
2.1. Skiedinio mechaninės savybės, bandant etaloninius bandinius	36
2.1.1. <i>Medžiagos</i>	36
2.1.2. <i>Skiedinio kontrolinių bandinių paruošimas ir bandymų metodika</i>	36
2.1.3. <i>Skiedinio lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymas</i>	37
2.1.4. <i>Bandymų rezultatai</i>	38
2.1.5. <i>Skiedinio deformacinių savybių nustatymas</i>	39
2.2. Skiedinio kietėjimo gulsčiojoje siūlėje ypatumai	41
2.2.1. <i>Bandymų paruošimas ir bandymų metodika</i>	41

2.2.2.	<i>Skiedinio sukibties su mūro gaminiu ypatybės</i>	43
2.3.	Skiedinio gulsčiosios siūlės gniuždomasis stipris.....	44
2.3.1.	<i>Bandiniai ir bandymo metodika</i>	44
2.3.2.	<i>Bandymo rezultatai</i>	45
2.4.	Antrojo skyriaus išvados	48
3.	EKSPERIMENTINIAI MŪRO TYRIMAI.....	49
3.1.	Mūro gaminių mechaninių ir deformacinių savybių nustatymas	49
3.1.1.	<i>Bandiniai</i>	49
3.1.2.	<i>Bandymų metodika</i>	49
3.1.3.	<i>Bandymų rezultatai</i>	50
3.2.	Mūro mechaninių ir deformacinių savybių nustatymas	50
3.2.1.	<i>Bandiniai ir bandymų metodika</i>	50
3.2.2.	<i>Bandymų rezultatai</i>	52
3.3.	Trečiojo skyriaus išvados.....	57
4.	EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ BEI TEORINIŲ METODŲ VERTINIMAS	58
4.1.	Silikatinių pilnavidurių plytų mūro gniuždomojo stiprio skaičiavimas pagal EC6.	58
4.2.	Deformacinių mūro savybių vertinimas.....	60
4.2.1.	<i>Analitinis deformacinių mūro savybių vertinimas</i>	60
4.2.2.	<i>Analitinis gulsčiosios skiedinio siūlės deformacinių savybių vertinimas</i>	62
4.2.3.	<i>Silikatinių pilnavidurių plytų mūro tamprumo modulio skaičiavimo pagal EC6</i> <i>vertinimas</i>	65
4.3.	Ketvirtojo skyriaus išvados	66
5.	BENDROSIOS IŠVADOS.....	67
	LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	69
	A PRIEDAS.....	72
A.1	Siedinio tamprumo modulio nustatymo bandymo rezultatai	72

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Gniuždomo mūro įtempių deformacijų būvis	17
1.2 pav. Gniuždomo mūro gaminių ir gulsčiosios siūlės horizontalių įtempių diagrama: pagal Hallerio modelį (Vermeltfoort 2005)	18
1.3 pav. Įtempių pasiskirstymas skiedinyje (Sabha, Schöne 1994).....	20
1.4 pav. Mūro gaminio ir skiedinio irties gaubtinės pagal (Hendry et al. 1987).....	21
1.5 pav. Mūro gaminio ir skiedinio įtempių schema įvertinus netiesines skiedinio savybes (Mc Nary, Abrams 1985)	22
1.6 pav. Mūro irties stadijos; σ_z – išorinės apkrovos sukelti įtempiai mūre; f_{crc} – plyšių atsivėrimo mūro stipris; f_{crc} – ribinis gniuždomasis mūro stipris (Rozenbliumas 1956).....	23
1.7 pav. Eksperimento metu atsivėrę plyšiai mūro prizmėse (Pela, et al. 2016)	23
1.8 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybių kreivės.....	24
1.9 pav. Mūro fragmentai po suirimo (Sassoni et al. 2014)	24
1.10 pav. Mūro prizmių suirimo charakteris:	25
1.11 pav. Plyšių vėrimosi tendencija; vaizdai iš priekio ir šono a) apkrovą perduodant per skiedinį, b) apkrovą perduodant per neopreno sluoksnį. Skaičiai parodo plyšių atsivėrimo seką. (Drougkas et al. 2015)	26
1.12 pav. Mūro gaminių stiprio poveikis mūro gniuždomajam stipriui (Kaushik et al. 2007)	28
1.13 pav. Mūro gaminių tuštymėto ir gulsčiosios siūlės storio poveikis mūro gniuždomajam stipriui (1 – pilnavidurės keraminės plytos, 2 – tuštymėtosios keraminės plytos, 31 % tuštymėtumas) (Francis et al. 1971)	28
1.14 pav. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo skiedinio gniuždomojo stiprio, kai naudojamas bendrosios paskirties skiedinys, o gulsčiosios siūlės storis: a) 15 mm; b) 10 mm; c) 5 mm (Zavalis 2013).....	29
1.15 pav. Mūro gaminių perrišimo shema	30
1.16 pav. Sienos efektas: a) ties standžiu elementu (siena) dalelių susitankinimas mažesnis palyginus su pjūviu per brūkšninę liniją; b) silpnescio skiedinio poros ties kontakto zona (Anson 1964).....	31
1.17 pav. Sienos efektas: a) pjūvis ties skiediniu (viršuje) ir plyta (apačioje), padidinta 60 kartų, b) schematinis atvaizdavimas	31
1.18 pav. Ultra garso metodu išskirtos skirtingos sukibties zonos gulsčiosios siūlės plote ir skirtingo stiprio sukibties zonos išėmus gulsčiosios siūlės plokštelę (Hobbs 1991).....	32

1.19 pav. Veiksniai turintys įtakos mechaninėms skiedinio savybėms (Zavalis 2013; Huster 2000)	32
1.20 pav. Įtempių pasiskirstymas aplink skiedinyje esančią porą (Witman, Zaitsev 1974)	33
1.21 pav. Vandens persiskirstymas mūro gaminio ir skiedinio sandūroje (Groot 1995)	34
2.1 pav. Skiedinio kontroliniai bandiniai: a) lenkimo bandymas; b) gniuždymo bandymas	37
2.2 pav. Ryšys tarp skiedinio gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių	38
2.3 pav. Skiedinio deformacinių savybių tyrimo ir prietaisų išdėstymo schema ir bendras vaizdas	39
2.4 pav. Skiedinio prizmės po suirimo	39
2.5 pav. M1, M2 ir M3 skiedinių būdingosios $\sigma - \epsilon$ priklausomybių diagramos	40
2.6 pav. Mūro bandinių fragmentai su viena gulsčiąja siūle. Kairėje panaudotas M1 skiedinys, dešinėje M2	41
2.7 pav. Stipri gulsčiosios siūlės sukibties zona, kai sunkiai atskiriama skiedinio plokštelė nuo mūro gaminio	43
2.8 pav. Mūro fragmentas su dviem gulsčiosioms siūlėmis (kairėje). Skiedinio plokštelė, išimta iš mūro siūlės ir paruošta pjautymui (dešinėje)	44
2.9 pav. Dvigubo praspaudimo tyrimas	44
2.10 pav. Mūro bandiniai su plėvelės intarpu	45
2.11 pav. Skiedinio gniuždomojo stiprio pasiskirstymas plokštelėse: a) kai naudojamas skiedinys M1; b) kai naudojamas skiedinys M2; c) kai naudojamas skiedinys M3 po 14 parų kietėjimo; d) kai naudojamas skiedinys M3 po 28 parų kietėjimo	46
2.12 pav. Cementinio skiedinio gniuždomojo stiprio redukcijos koeficiento β priklausomybė nuo skiedinio plokštelių, atpjautų iš skiedinio prizmių, gniuždomojo stiprio $f_m, pl. \beta$ (Galatiltis 2017)	47
2.13 pav. Skiedinio stiprių rezultatų palyginimas	48
3.1 pav. Mūro gaminio bandymo schema kai plyta vertikali (Šlivinkas 2016)	49
3.2 pav. Mūro gaminių vidutinės $\sigma - \epsilon$ priklausomybių diagramos (Šlivinskas et al. 2016)	50
3.3 pav. Mūro fragmento bandymo daviklių išdėstymo schema ir bendras bandymo vaizdas	51
3.4 pav. Mūro fragmentai po suirimo: a) mūro irties pobūdis kai naudojamas skiedinys M1, b), c) mūro irties pobūdis kai naudojamas skiedinys M2	52
3.5 pav. Gniuždomųjų įtempių σ_z ir skersinių deformacijų ϵ_x priklausomybės kai naudojami skirtingi skiediniai 1, 2, 3 kreivės ir atskiro mūro gaminio skersinės deformacijos 4 kreivė	53

3.6 pav. Mūro (7-10) ir mūro fragmento ir mūro gaminio (1, 2) įtempių ir deformacijų priklausomybės: a) Mūro fragmentas B1.1M1, b) mūro fragmentas B3.1M3 ir c) mūro fragmentas B2.1M2	54
3.7 pav. Pilnavidurių silikatinių plytų fragmentų tamprumo modulio kitimas kai keičiamas skiedinio stipris.....	55
3.8 pav. Skiedinio kontrolinių bandinių (M) ir gulsčiosios siūlės (B) įtempių bei deformacijų priklausomybės.....	56
4.1 pav. Eksperimentinės ir teorinės charakteristinės mūro stiprio santykio $f_{k,obs} / f_k$ priklausomybės nuo eksperimentinės mūro charakteristinės reikšmės $f_{k,obs}$	59
4.2 pav. Eksperimentinių ir teorinių, apskaičiuotų pagal 3.6 – 3.9 formules, mūro tamprumo modulio reikšmių palyginimas	62
4.3 pav. Skiedinio siūlės apibendrinto tamprumo modulio nustatymo schema	63
4.4 pav. Mūro gaminių ir skiedinio sąlyčio zonos schema: 1) mūro gaminys; 2) skiedinio sluoksnis; 3) sąlyčio zona (Zavalis 2013).....	64
4.5 pav. Eksperimentinių ir teorinių, apskaičiuotų pagal 3.6 – 3.9 formules, mūro tamprumo modulio reikšmių palyginimas, įvertinus apibendrintą skiedinio siūlės tamprumo modulį.....	65
A.1 pav. M1 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \varepsilon$ priklausomybė, ...	72
A.2 pav. M3 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \varepsilon$ priklausomybė, ...	72
A.3 pav. M2 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \varepsilon$ priklausomybė, ...	73

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Veiksniai, turintys įtakos mūro mechaninėms savybėms (Zavalis 2013, Hendry et al. 2004).....	27
2.1 lentelė. Skiedinio sudėtis	36
2.2 lentelė. Skiedinio lenkimo ir gniuždymo rezultatų suvestinė.....	38
2.3 lentelė. Skiedinių tamprumo modulių suvestinė.....	40
2.4 lentelė. Mūro gaminių masės.....	42
2.5 lentelė. Vandens ir cemento santykis skiedinio siūlėje prieš ir po vandens atidavimo mūro gaminiam.....	43
2.6 lentelė. Skiedinio gniuždomųjų stiprių palyginimas	46
3.1 lentelė. Mūro gaminio parametrai	49
3.2 lentelė. Mūro gaminių tamprumo moduliai kai plyta gulsčia ir statmena (Šlivinskas et al.)..	50
3.3 lentelė. Silikatinų plytų mūro fragmentų tyrimų rezultatai	52
3.4 lentelė. Mūro fragmentų tamprumo modulio rezultatų suvestinė.....	55
4.1 lentelė. Koeficientų α ir β reikšmės.....	59
4.2 lentelė. Mūro tamprumo modulio charakteristikos KE rezultatai	66

ŽYMENYS

A_{net} – guldomojo paviršiaus plotas;

E_b – mūro gaminių tamprumo modulis;

E'_b – į gulsčiosios skiedinio siūlės deformacijų matavimų bazę patenkančio mūro gaminio dalies tamprumo modulis;

$E_{b,cal}$ – apskaičiuotas mūro gaminio tamprumo modulis;

$E_{b,obs}$ – mūro gaminio tamprumo modulis nustatytas eksperimentiškai;

E_m – skiedinio tamprumo modulis;

$E_{m,eff}$ – efektyvusis skiedinio tamprumo modulis;

$E_{m,s,cal}$ – apibendrintas gulsčiosios siūlės tamprumo modulis;

$E_{m,s,obs}$ – apibendrintas gulsčiosios siūlės tamprumo modulis nustatytas eksperimentiškai;

$E_{m,obs}$ – skiedinio tamprumo modulis nustatytas eksperimentiniais tyrimais;

$E_{mas,cal}$ – apskaičiuotas mūro tamprumo modulis;

$E_{mas,obs}$ – mūro tamprumo modulis nustatytas eksperimentiniais tyrimais;

F – sutelktoji jėga;

K – empirinis mūro stiprio koeficientas;

M_d – nusistovėjusio džiovinamo mūro gaminio masė pagal LST EN 772-21;

N – išorinė apkrova;

N_{crc} – išorinė apkrova, kuriai esant atsirado pirmieji plyšiai;

a – sąlyčio zonos tarp skiedinio ir mūro gaminio dydis;

b – bandinio plotis;

d – bandinio aukštis;

f_b – mūro gaminio normalizuotas vidutinis gniuždomasis stipris;

$f_{c,b}$ – mūro gaminių gniuždomasis stipris;

$f_{c,m}$ – skiedinio gniuždomasis stipris;

f_m – skiedinio gniuždomasis stipris nustatytas bandant kontrolinius bandinius;

$f_{m.pl}$ – skiedinio gniuždomasis stipris nustatytas bandant plokšteles išimtas iš gulsčiosios siūlės;

$f_{m.pl\beta}$ – skiedinio gniuždomasis stipris pritaikius redukcijos koeficientą β ;

$f_{c,mas}$ – mūro gniuždomasis stipris;

$f_{fl,m}$ – skiedinio lenkiamasis stipris;

f_k – charakteristinis gniuždomasis mūro stipris;

$f_{k,obs}$ – charakteristinis mūro gniuždomasis stipris nustatytas eksperimentiniais tyrimais;

f_m – skiedinio vidutinis gniuždomasis stipris;

f_{vid} – vidutinis mūro fragmento gniuždomasis stipris;

h_b – mūro gaminių aukštis;

h'_b – į gulsčiosios skiedinio siūlės deformacijų bazę patenkančio mūro gaminio dalis;

h_m – skiedinio gulsčiosios siūlės storis;

h'_m – skiedinio gulsčiosios siūlės storis atmetus sąlyčio zoną;

$h_{m,con}$ – sąlyčio zonos tarp mūro gaminio ir skiedinio storis;

h_{sum} – mūro gaminio aukščio ir gulsčiosios siūlės storio suma;

h'_{sum} – gulsčiosios skiedinio siūlės deformacijų matavimo bazė;

l – atstumas tarp atramų;

l_b – mūro gaminių ilgis;

α ir β – empiriniai laipsnio rodikliai, kuriais įvertinamas skiedinio tipas ir gulsčiųjų siūlių storis;

ε_{mx} ; ε_{my} ; ε_{mz} – santykinė skiedinio deformacija atitinkamomis kryptimis;

ε_{bx} ; ε_{by} ; ε_{bz} – mūro gaminių santykinė deformacija atitinkamomis kryptimis;

σ_{mx} ; σ_{mb} ; σ_{mz} – įtempiai gulsčiojoje siūlėje atitinkamomis kryptimis;

σ_{bx} ; σ_{by} ; σ_{bz} – įtempiai mūro gaminyje atitinkamomis kryptimis;

ξ – mūro gaminio aukščio h_b ir skiedinio siūlės storio h_m santykis.

Δh_b – mūro gaminio deformacija;

$\Delta h'_b$ – į gulsčiosios skiedinio siūlės deformacijų matavimų bazę patenkančio mūro gaminio dalies deformacija;

Δh_m – gulsčiosios skiedinio siūlės deformacija;

$\Delta h'_m$ – skiedinio gulsčiosios siūlės atmetus sąlyčio zoną deformacija;

$\Delta h_{m,com}$ – sąlyčio zonos tarp mūro gaminio ir skiedinio deformacija;

Δh_{sum} – vertikalioji mūro deformacija.

IVADAS

Įvairūs pastatai iš silikatinių plytų mūro pradėti statyti nuo XIX a. Silikatinių pilnavidurių plytų mūras vienas labiausiai paplitusių mūro gaminių tipų Lietuvoje, todėl naudojant silikatinės plytas buvo pastatyta daug statinių. Per laiką atsirado poreikis šias konstrukcijas atnaujinti rekonstruojant, daugelio pastatų mūras nebuvo apsaugotas nuo atmosferinių poveikių, mūras korodavo ir dūlėjo, prarado savo mechanines savybes. Vertinant mūrinių pastatų būklę ir skaičiuojant mūrinių konstrukcijų laikomąją galią yra labai svarbu ištirti gulsčiosios siūlės įtaką mūro mechaninėms savybėms.

Problemos formulavimas

Eksploatuojant mūrinius pastatus, norint nustatyti mūro kaip kompozitinės medžiagos bendrą stiprį susiduriama su problema, jog nėra paprasta nustatyti mūro gulsčiosios siūlės stiprį, tačiau mūro gaminio stiprio nustatymas nėra sudėtingas. Skiedinio, gulsčiojoje siūlėje, mechaninės savybės, ženkiai skiriasi nuo skiedinio savybių nustatytų, bandant etaloninius bandinius pagal standartų reikalavimus. Tiriant eksploatuojamų mūrinių pastatų būklę, ar mūro įtempių būvį, svarbu kuo tiksliau įvertinti gulsčiosios siūlės įtaką mūro mechaninėms savybėms.

Darbo aktualumas

Eksploatuojant mūrinius pastatus jų rekonstrukcijos metu svarbu teisingai nustatyti mūro, kaip kompozitinės medžiagos, laikomąją galią. Analizuojant gniuždomo mūro įtempių būvį svarbu kuo tiksliau įvertinti gulsčiųjų siūlių savybes bei jų įtaką mūro mechaninėms savybėms.

Tyrimų objektas

Trumpalaikę gniuždomąją apkrovą veikiamo pilnavidurių silikatinių plytų mūro gulsčiosios siūlės įtakos jo mechaninėms savybėms analizė.

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – išnagrinėti mūrijimo skiedinio savybes gulsčiojoje siūlėje ir eksperimentiškai ištirti gulsčiųjų siūlių įtaką mūro gniuždomajam stipriui ir deformacijoms.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Atlikti gulsčiosios siūlės įtakos mūro mechaninėms savybėms tyrimų apžvalgą.
2. Išnagrinėti pilnavidurių silikatinių plytų gniuždomojo mūro įtempių ir deformacijų būvį.
3. Išanalizuoti skiedinio, esančio mūro gulsčiojoje, siūlėje mechanines savybes.
4. Eksperimentiškai nustatyti gulsčiųjų siūlių poveikį mūro mechaninėms savybėms.
5. Eksperimentinių tyrimų rezultatus palyginti su analitinių metodų skaičiavimų rezultatais.

Tyrimų metodika

Trumpalaikė statinė gniuždymo apkrova bandomi silikatinių plytų mūro fragmentai. Trumpalaikė statinė apkrova bandant etaloninius bandinius tiriamos mūrijimo skiedinio deformacinės bei mechaninės savybės. Mūro bandiniai sveriami prieš ir po vandens įgėrimo ir nustatomas cemento vandens santykis gulsčiojoje siūlėje. Atliekami mūro gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio analitiniai skaičiavimai.

Darbo mokslinis naujumas

1. Įvertintas gulsčiųjų siūlių poveikis gniuždomo silikatinių plytų mūro mechaninėms ir deformacinėms savybėms.
2. Pateikti skiedinio cemento vandens santykio pokyčio duomenys mūro gaminiui perėmus dalį vandens iš gulsčiosios siūlės.
3. Pateiktas pasiūlymas, kaip patikslinti tamprumo modulio skaičiavimo metodiką pagal LST EN 1996-1-1.

Darbo struktūra

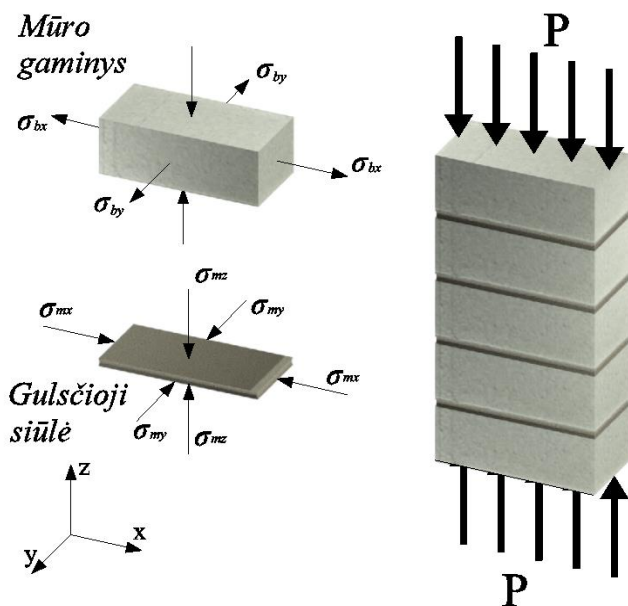
Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis yra 72 puslapiai be priedų, 60 paveikslų, 12 lentelių ir 32 literatūros šaltinių sąrašas.

1. GNIUŽDOMOJO MŪRO ĮTEMPIAI IR DEFORMACIJOS

1.1. Gniuždomojo mūro įtempių deformacijų būvis

Mūras – kompozitinė konstrukcija, sudaryta iš dviejų skirtingų medžiagų, turinčių skirtingas deformacines savybes. Dėl šios priežasties mūre susidaro sudėtingas įtempių būvis. Mūro tempiamasis stipris yra daug mažesnis už gniuždomąjį, todėl dažniausiai mūrinės konstrukcijos projektuojamos taip, kad jas labiausiai veiktų gniuždymo įtempiai.

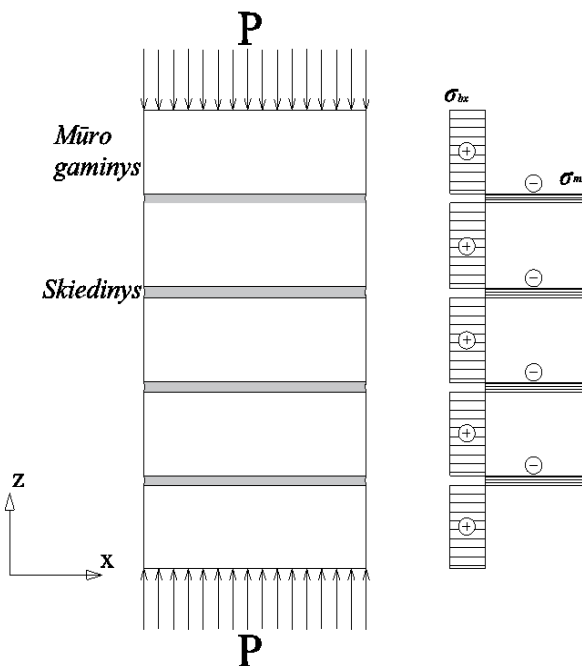
Paprastai mūras susideda iš standesnių mūro gaminių ir mažiau standaus skiedinio (Vermeltfoort 2005), dėl šios priežasties mūre atsiranda sudėtingas įtempių būvis. Mažesnio standumo skiedinys plečiasi labiau nei standesnis mūro gaminys, todėl mūro gaminiai suvaržo skiedinio deformacijas, skiedinyje atsiranda triašis gniuždymas. Kai mūro gaminių tamprumo modulis yra didesnis už gulsčiųjų siūlių skiedinio tamprumo modulį $E_b > E_m$, gniuždomuose mūro gaminiuose skersine linkme sukeliama tempiamieji įtempiai (žr. 1.1 pav.). Šį mūro įtempių būvį detaliau aprašė mokslininkai B. Jonaitis ir R. Zavalis, A. M. Rozenbliumas, H. Hilsdrofas (Jonaitis, Zavalis 2011; Rozembliumas 1956; Hilsdorf 1969).



1.1 pav. Gniuždomo mūro įtempių deformacijų būvis

Gniuždomo mūro atskirų komponentų (mūro gaminio ir gulsčiosios siūlės) įtempiai priklauso nuo jų deformacinių savybių (standumo).

Vertikaliai gniuždomo mūro apkrovos sukeltų įtempių diagramą vienas iš pirmųjų 1969 m. sudarė P. Halleris (Vermeltfoort 2005), diagrama dar kitaip žinoma kaip Hallerio modelis (žr. 1.1; 1.2 pav.).



1.2 pav. Gniuždomo mūro gaminių ir gulsčiosios siūlės horizontalių įtempių diagrama: pagal Hallerio modelį (Vermeltfoort 2005)

Diagrama, pavaizduota 1.2 pav., yra bendrojo pobūdžio, rodanti atsirandančius skirtingus įtempius mūro komponentuose: skiedinyje ir mūro gaminiuose. Gniuždomos apkrovos sukelti horizontalieji įtempiai mūro gaminyje ir skiedinyje yra priešingo ženklo, mūro gaminys yra tempiamas, o skiedinys – gniuždomas. Halerio įtempių diagrama patvirtina 1.1 skyriuje aprašytą gniuždomojo mūrinio elemento triašį įtempių būvį (žr. 1.1 pav.). Pagal Halerio gniuždomo mūro modelį, horizontalūs įtempiai mūro komponentuose pasiskirsto vienodai per visą jų aukštį. Dėl skirtingų mūro gaminio ir skiedinio siūlės aukščių, veikiant vienodo dydžio vertikaliai apkrovai, galima pastebėti, kad skiedinyje veikiantys įtempiai yra ženkliai didesni negu mūro gaminyje (žr. 1.2 pav.).

Pagal tamprumo teoriją, taikant bendrąjį Huko dėsnį ir Halerio įtempių pasiskirstymo dėsnį skersiniai tempimo įtempiai $\sigma_{bx} = \sigma_{by}$ bus lygūs:

$$\sigma_{bx} = \sigma_{by} = \sigma_z \cdot \frac{\left(-\frac{E_b}{E_m} \cdot v_m + v_b\right)}{1 - v_b + \frac{E_b}{E_m} \cdot \frac{h_b}{h_m} \cdot (1 - v_m)}; \quad (1.1)$$

Išvedant šią lygtį buvo pasirinkta, kad didesnio stiprio plytos tempiamos ir silpnesnis skiedinys gniuždomas dėl didelio medžiagų savybių skirtumo, ryšys tarp skiedinio gulsčiųjų siūlių

ir mūro gaminių yra standus. Taip pat pasirinkta, kad mūro gaminys ir siūlė veikia tiesiškai, t.y. jų deformacijų ir įtempių priklausomybė tiesinė.

Skersinių deformacijų ε_{bx} ir ε_{by} išraiška bus lygi:

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{by} = \frac{\sigma_z}{E_b} \cdot \frac{\left(-\frac{E_b}{E_m} \cdot \nu_m + \nu_b\right)}{1 - \nu_b + \frac{E_b}{E_m} \cdot \frac{h_b}{h_m} \cdot (1 - \nu_m)}; \quad (1.2)$$

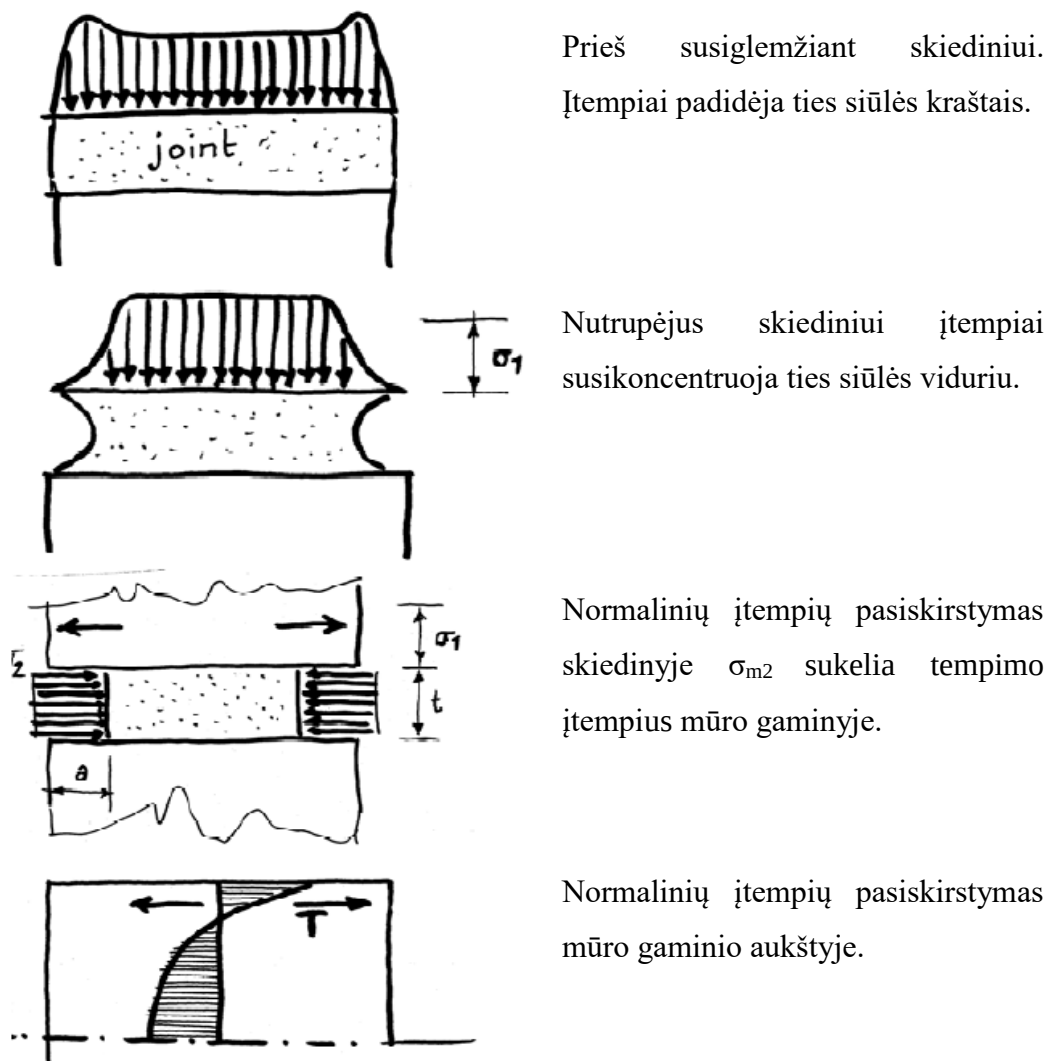
čia E_b ir E_m – mūro gaminių ir skiedinio tamprumo moduliai; ν_b ir ν_m – mūro gaminio ir skiedinio Puasono koeficientai; h_b – mūro gaminių aukštis; h_m – skiedinio gulsčiosios siūlės storis. Šios formulės plačiau aptartos straipsniuose (Jonaitis *et al.* 2001; Kaushik *et al.* 2001)

Kai skiedinys yra santykinai silpnas ir deformatyvus, lyginant su mūro gaminiu, mūro fragmentas suyra skiediniui susiglemžus ties gulsčiosios siūlės kraštais prieš pasiekiant ribinius įtempius. Mūro gaminyje atsiranda tempiamieji įtempiai, kurie didžiausią reikšmę įgauna ties mūro gaminio aukščio viduriu, o didžiausi gniuždymo įtempiai mūro gaminyje yra ties skiedinio ir mūro gaminio sandūra (žr. 1.3 pav.). Sabha ir kt. (1994) pastebėjo, kad gniuždymo įtempių maksimalios reikšmės ties plytų kraštais sumažėja dėl skiedinio plastiškumo ir susiglemžimo. Trintis tarp skiedinio ir mūro gaminio neleidžia skiediniui ištrykšti, atsiranda triašis įtempių būvis ir taip padidėja skiedinio laikomoji galia.

Kad triašis įtempių būvis atsirastų gulsčiosios siūlės aukštis negali būti didesnis negu 20 % mūro gaminio aukščio. Šiuo atveju, kai skiedinys deformatyvus ir silpnas, o mūro gaminys standus, sąryšis tarp vertikalių gniuždymo įtempių mūre ir skersinių tempimo įtempių mūro gaminyje gali būti apskaičiuojamas pagal (1.3) lygtį.

$$\sigma_{bx} = \left[-3.22 \cdot \left(2.5 \cdot \frac{h_m}{h_b} \right)^{2.5} + 1.524 \cdot \left(2.5 \frac{h_m}{h_b} \right) \right] \cdot \sigma_{my} \quad (1.3)$$

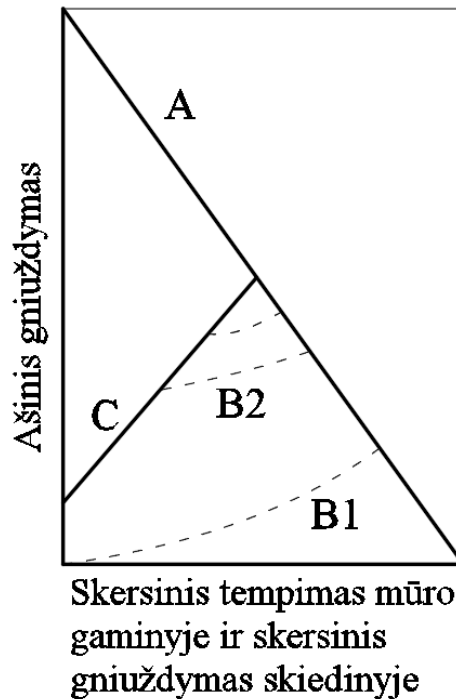
Tempiamieji skėlimo įtempiai mūro gaminyje atsiranda tik tada kai skiedinio įtempių būvis iš tamprios būsenos pasikeičia į plastinę ir skiedinys susiglemžia ties gulsčiosios siūlės kraštais. Sabha ir kt. bandymais nustatė, kad mūro gaminyje skėlimas dėl tempimo įtempių pradeda vystytis, kai vertikalūs mūro gniuždymo įtempiai yra dvigubai didesni negu skiedinio gniuždomasis stipris. Mūro gaminio tamprumo modulis E_b santykinai didelis, lyginant su skiedinio tamprumo moduliu E_m , kuris mažesnis nei 1 kN/mm². Mūro gaminio tamprumo modulis E_b kinta nuo 20 iki 30 kN/mm².



1.3 pav. Įtempių pasiskirstymas skiedinyje (Sabha, Schöne 1994)

Kai mūro bandinio prizmės yra apkraunamos gniuždomąja apkrova, tiek mūro gaminyje, tiek skiedinyje veikia dviašis, o dažnai ir triašis įtempių būvis. Mūro gaminio ir skiedinio irties gaubtinė gali būti nubraižyta viena diagrama. 1.4 paveiksle A linija rodo mūro gaminio irties gaubtinę, linija C rodo triašį mūro stiprį. Kai gniuždymo apkrova apkraunama prizmė, vidiniai įtempiai didėja pagal B1 kreivę. Pasiekus tam tikrą apkrovos dydį B1 susikerta su linija A ir plyta supleišėja lokaliai. Įtempiai persiskirsto ir vidiniai įtempiai kinta pagal kreivę B2 iki kol kreivė B2 susikerta su linija A ir taip iki pat bendro mūro prizmės suirimo.

Įprastai, kai mūro gaminyje nebeatlaikys vertikalaus gniuždymo ir dėl skersinių deformacijų suskils, tuo pat metu suirs ir skiedinys. Tai galime pastebėti iš 1.4 pav., mūro irtis įvyks, kai triašio skiedinio įtempių būvio tiesė C susikirs su mūro gaminio tiese A, tai reiškia, kad sankirta tarp skiedinio ir mūro gaminio irties gaubtinių yra ribinė gniuždomo mūro stiprio reikšmė.



1.4 pav. Mūro gaminio ir skiedinio irties gaubtinės pagal (Hendry *et al.* 1987)

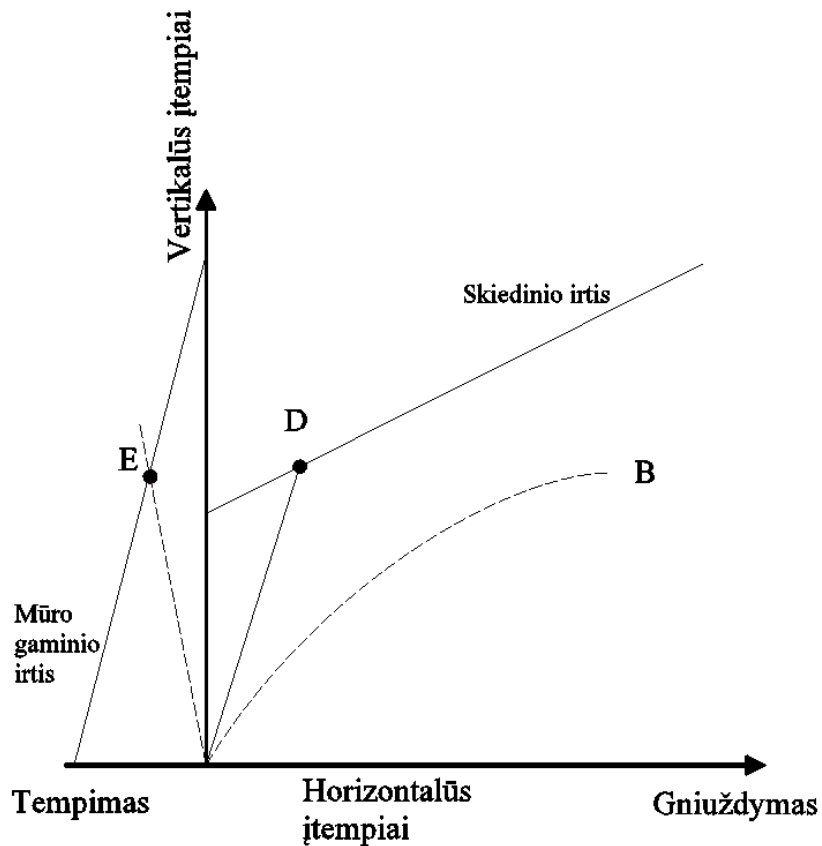
Hilsdorfas išvedė irties metu veikiančių vertikalųjų įtempių σ_{bz} ribinės reikšmės lygtį, arba A ir C tiesės susikirtimo taško reikšmė gali būti apskaičiuota pagal (1.4) formulę.

$$\sigma_{bz} = f_{c,b} \frac{f_{t,b} + \frac{h_m \cdot f_{c,m}}{4.1 \cdot h_b}}{f_{t,b} + \frac{h_m}{4.1 \cdot h_b} f_{c,b}}. \quad (1.4)$$

Apytikslė tiesinė skiedinio ir mūro gaminio irties gaubtinių priklausomybė (žr. 1.4 pav.) buvo patobulinta mokslininkų McNary'io ir Abramo (McNary, Abrams 1985). Jie pateikė teoriją kuri įvertina skiedinio netiesinę elgseną mūro prizmių, apkrautų gniuždomąja apkrova. Autoriai nustatė, kad apkrovimo metu skiedinio tamprumo modulis E_m ir Puasono koeficientas ν_m kinta (žr. 1.5 pav. B). Ši teorija supaprastinta pasirenkant vidutinius įtempius vienodus visame mūro gaminio ir skiedinio aukštyje. Mūro gaminio savybės visu apkrovimo metu išlieka vienodos. Veikiant mažoms apkrovoms mūro gaminio ir skiedinio įtempiai kinta tiesiškai, o veikiant didesnėms apkrovoms skersiniai įtempiai didėja greičiau nei vertikalūs, tai ir yra netiesinė horizontaliųjų ir vertikalųjų įtempių priklausomybė.

1.5 paveiksle matoma, kad sistemos irtis įvyksta, kai įtempių kreivė susikerta su irimo gaubtinėmis taškuose E ir D. Mūro fragmentų irtis įvyksta mūro gaminiui suirus dėl horizontaliųjų

skėlimo įtempimų, kuriuos sukelia skiedinys. Irimo metu skiedinyje veikia triašis įtempių būvis, kaip matome 1.5 paveiksle, skiedinio įtempių deformacijų kreivė nepasiekia irties gaubtinės, kreivė B yra beveik lygiagreti skiedinio irties gaubtinei, o tiesė, kuri apibrėžia horizontalius mūro gaminio įtempius, didėjant apkrovai, su mūro gaminio irties gaubtine susikerta taške E. Šis paveikslas aiškiai parodo, jog mūro konstrukcija suyra tada, kai suyra mūro gaminyje dėl skersinių deformacijų, kurias sukelia gniuždomas skiedinys.



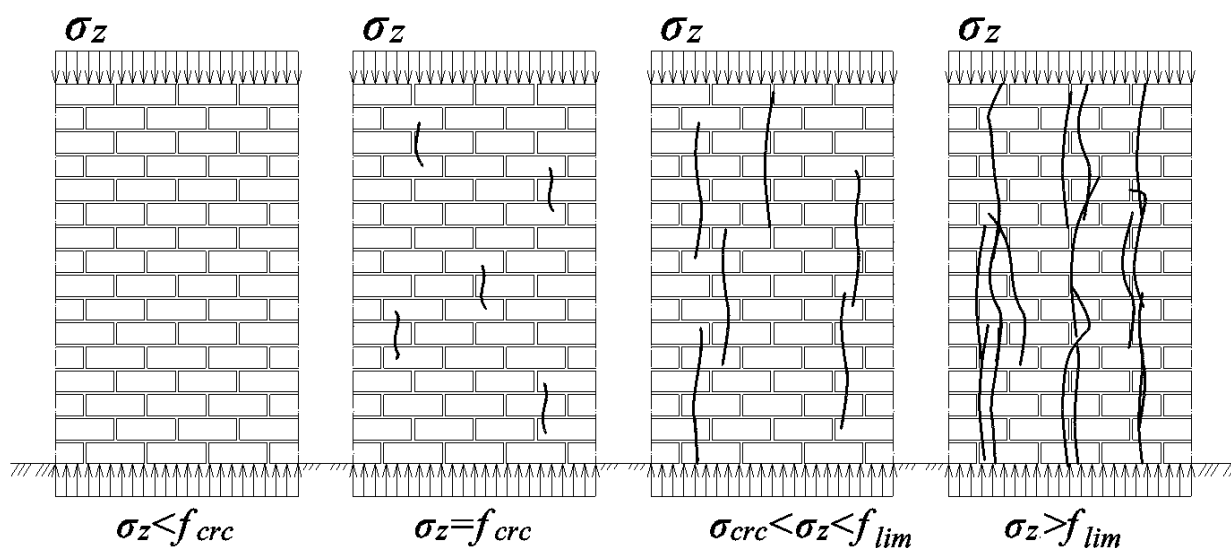
1.5 pav. Mūro gaminio ir skiedinio įtempių schema įvertinus netiesines skiedinio savybes (Mc Nary, Abrams 1985)

1.2. Mūro irties stadijos

Dėl sudėtingo triašio įtempių būvio ir kitų priežasčių didinant apkrovą mūro konstrukcijose susidaro vertikalūs plyšiai. Yra išskiriamos 4 mūro konstrukcijų irimo stadijos (žr. 1.6 pav.).

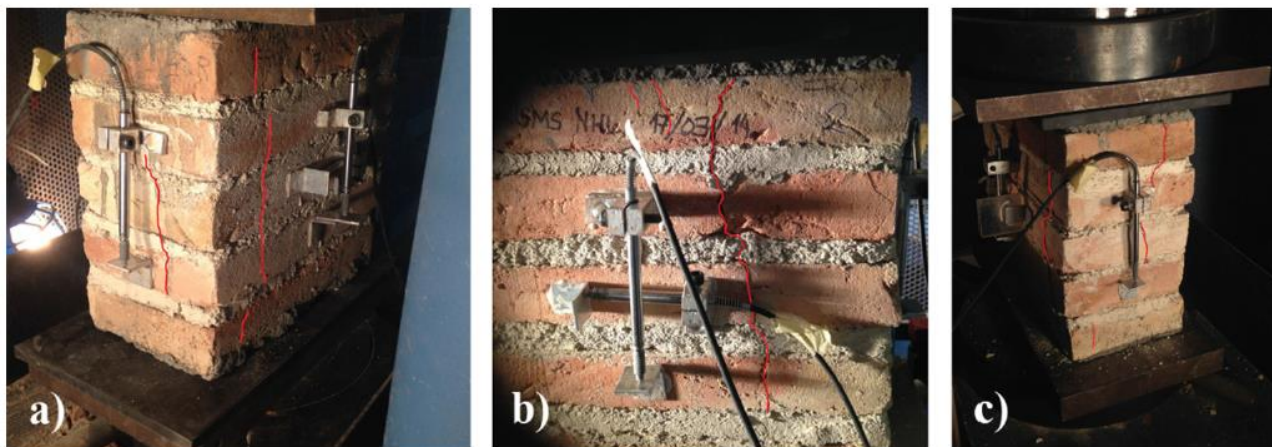
Pirmosios stadijos metu mūre pasireiškia deformacijos, kintančios pagal tiesinį Huko dėsnį, $\sigma_z < f_{crc}$. Antrosios stadijos metu, kai $\sigma_z = f_{crc}$, mūre pradeda vertis lokalūs plyšiai, išsidėstę vertikaliai mūro konstrukcijoje, tuo pačiu metu pasireiškia ir plastinės mūro deformacijos. Trečiojoje stadijoje atsivėrę plyšiai didėja toliau, taip pat didėja ir plastinės mūro deformacijos, veikiantys įtempiai didesni už pleišėjimo įtempius, bet mažesni už ribinį mūro stiprį ($\sigma_{crc} < \sigma_z =$

f_{lim}). Ketvirtojoje stadijoje mūras pasidalina į atskirus stulpus, veikiantys įtempiai $\sigma_z > f_{lim}$ viršija ribinį mūro stiprį ir konstrukcija suyra.

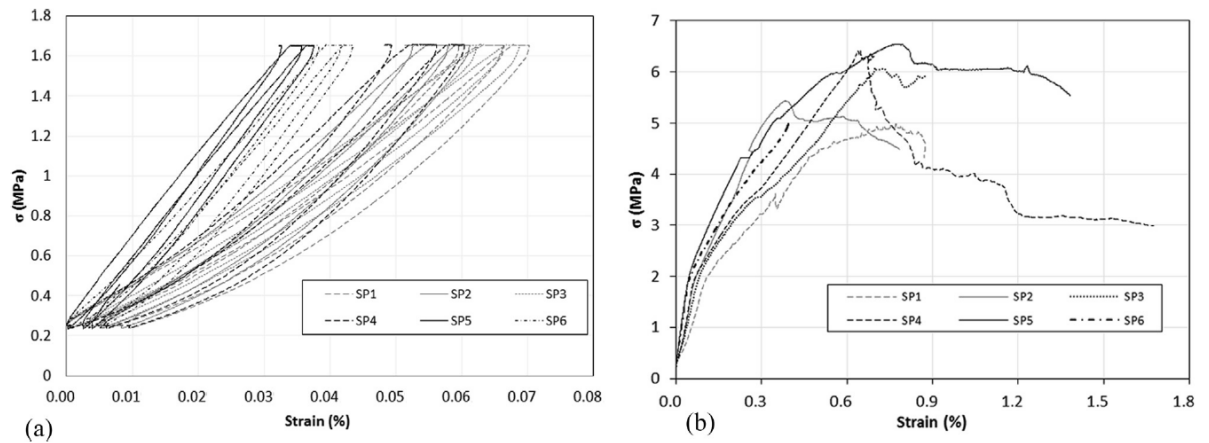


1.6 pav. Mūro irties stadijos; σ_z – išorinės apkrovos sukelti įtempiai mūre; f_{crc} – plyšių atsivėrimo mūro stipris; f_{lim} – ribinis gniuždomasis mūro stipris (Rozenbliumas 1956)

Atlikti mūro bandymų eksperimentai patvirtina mūro suirimo charakterį, atitinkantį mūro irimo stadijas.



1.7 pav. Eksperimento metu atsivėrę plyšiai mūro prizmėse (Pela, et al. 2016)



1.8 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybių kreivės
a) elastinė priklausomybė, b) stipris ir netiesinė priklausomybė (Pela et al. 2016)

1.7 paveiksle pavaizduoti Katalonijos universiteto mokslininkų išbandytų prizmių bandiniai. Eksperimentai atlikti praėjus 8 mėnesiams nuo bandinių paruošimo. Sumūrytos 6 prizmės iš 5 keraminių plytų. Plytų matmenys (305x145x50h). Bandinių įtempių ir deformacijų kreivės pateiktos 1.8 paveiksle. Iš grafikų matyti, kad bandiniuose pradeda veikti netiesinės deformacijos pasiekus apie 2 MPa gniuždymo įtempius. Didėjant įtempiams standumas mažėja dėl pirmų atsivėrusių plyšių. Vidutinis tamprumo modulis $E = 2,855 \text{ GPa}$, o vidutinis gniuždomasis stipris $\sigma_{mz} = 5,82 \text{ MPa}$. Plyšių charakteris visuose bandiniuose panašus: plyšiai dažniausiai vertikalūs, prasidedantys nuo viršutinių plytų ir besitęsiantys per visą bandinio aukštį.



1.9 pav. Mūro fragmentai po suirimo (Sassoni et al. 2014)

1.9 paveiksle pateikti 2 keraminių plytų mūro sienų fragmentai po suirimo. Pirmas mūro fragmentas mūrytas naudojant $f_m = 8.4 \text{ MPa}$ stiprio skiedinį, o antras su stipresniu ($f_{mc} = 18.6 \text{ MPa}$) stiprio skiediniu. Mūro fragmentai sudaryti iš 11 eilių, fragmento storumas – viena

plyta. Dvi plytų eilės tarpusavyje surištos trumpainiais. 1.9 b) paveiksle aiškiai matyti dėl triašio įtempių būvio atsiradęs išilginis plyšys. Pirmas mūro fragmentas suiro pasiekęs silpniausio komponento (skiedinio) stiprį $f_{wc.1} = 8.4 \text{ MPa}$, antrasis mūro fragmentas suiro pasiekęs $f_{wc.2} = 10.2 \text{ MPa}$. Antras bandinys suiro veikiant mažesniems įtempiams negu jo komponentai (skiedinio $f_{mc} = 18.6 \text{ MPa}$ ir plytos $f_{bc} = 19.3 \text{ MPa}$).



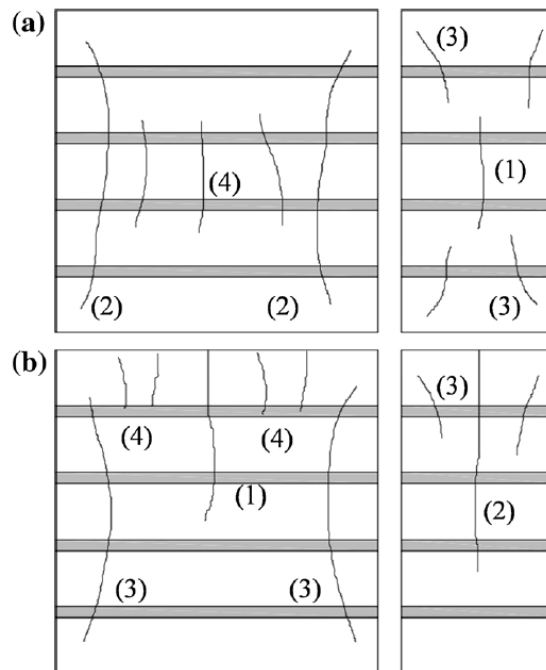
1.10 pav. Mūro prizmių suirimo charakteris:

a) kai mūras gniuždomas apkrovą perduodant per skiedinio sluoksnį; b) kai mūras gniuždomas apkrovą perduodant per neopreno plokštelę (Drougkas *et al.* 2015)

1.10 paveiksle pavaizduotas mūro, sudaryto iš kalkinio skiedinio ir keraminių pilnavidurių plytų, suirimo charakteris. Skiedinys sudarytas 1:3 kalkių smėlio santykiu maišant rankiniu būdu. Skiedinio stipris nustatytas vadovaujantis standartu EN 1015-11. Kalkinio skiedinio bandiniai sukelia nemažai problemų juos bandant dėl mažo stiprio ir kietėjimo sąlygų. Dėl lėto kietėjimo tik maži bandiniai gali būti patikimai išbandyti, nes didelių bandinių stipriais po tam tikro laiko nebus vienodas visame bandinio tūryje. Nors didesni bandiniai, pavyzdžiui, cilindrai, pateiktų tikslesnes mechanines savybes.

Iš viso pagamintos 6 mūro prizmės, sudarytos iš 5 mūro gaminių, kurių matmenys (290 x 140 x 50h mm), ir 4 gulsčiųjų siūlių, kurių storis apie 10mm. Mūro gaminių viršus ir apačia nušlifuoti norint išvengti paviršių nelygumų ir kitų netikslumų, todėl galutinis plytų aukštis po paviršiaus apdorojimo liko apie 40mm. Bandiniai bandyti praėjus 49 dienoms nuo jų pagaminimo. Pirmieji matomi plyšiai mūro prizmėse atsirado maždaug esant 70 % apkrovai. 1.10 pav. b) pavaizduotas bandinys, apkrovą perduodant per neopreno sluoksnį, pasiekė $f_c = 9.68 \text{ MPa}$ stiprį, kuris yra 21.3 % mažesnis negu prizmės stipris, apkrovą perduodant per skiedinio sluoksnį $f_c = 12.75 \text{ MPa}$. Taip pat skiriasi suirimo forma, kai apkrova perduodama per skiedinio sluoksnį (žr. 1.10 pav.). Skirtumas toks akivaizdus, nes skiedinio sluoksnis suvaržo mūro skersines deformacijas apkrovos pridėties zonoje (žr. 1.10 pav. a)). Prizmės viršutinis sluoksnis išlikęs beveik nepažeistas. Gniuždamas mūro prizmes apkrovą perduodant per neopreno paklotą vyksta priešingas procesas:

neoprenas mūrai leidžia laisvai deformuotis skersine kryptimi, todėl veriasi statmeni lygiagretūs vienas kitam plyšiai visose prizmės pusėse (žr. 1.11 pav.).



1.11 pav. Plyšių vėrimosi tendencija; vaizdai iš priekio ir šono a) apkrovą perduodant per skiedinį, b) apkrovą perduodant per neopreno sluoksnį. Skaičiai parodo plyšių atsiradimo seką. (Drougkas *et al.* 2015)

Kaip matome 1.11 paveiksle, naudojant neopreno paklotą plyšiai pradeda vertis nuo pat mūro prizmės viršaus pačiame mūro gaminio viduryje, o kai apkrova perduodama per skiedinio sluoksnį ir suvaržomos skersinės deformacijos pirmiausia plyšys atsiveria ties vidurine plyta ir plinta į šonus nuo prizmės aukščio vidurio. Mūro stipris apskaičiuojamas pagal LST EN 1996-1-1. (1.5) formulę:

$$f_c = 0.5 \cdot f_{c,u}^{0,7} \cdot f_{c,m}^{0,3}. \quad (1.5)$$

čia $f_{c,u}$ – mūro gaminio stipris, $f_{c,m}$ – skiedinio stipris.

Gauta mūro stiprio reikšmė $f_c = 4,7 MPa$ yra 2.55 karto mažesnė negu išmatuota eksperimentiškai (Drougkas *et al.* 2015). Drougko tyrimai parodo, kad naudojant santykinai silpną kalkinį skiedinį ir stiprius mūro gaminius mūro stipris gali būti 10 kartų didesnis už skiedinio stiprį panaudotą tame mūre.

1.3. Veiksniai, turintys įtakos mūro mechaninėms savybėms

Mūro mechaninėms savybėms įtaką daro įvairūs veiksniai: gulsčių ir stačių siūlių storis, mūro gaminio bei skiedinio mechaninės savybės. Bandant mūrines konstrukcijas susiduriama su įvairiomis problemomis dėl didelės rezultatų sklaidos, tačiau norint kuo detaliau išanalizuoti mūro mechanines savybes, privaloma teisingai ištirti visų veiksnių poveikius. Daugelis anksčiau minėtų autorių (Hendry *et al.* 2004; Rozenbliumas 1956; Wenzel 1997, Zavalis 2013) išskiria nemažai įvairių veiksnių, darančių įtaką mūro mechaninėms savybėms. Šiuos veiksnius galima suskirstyti į tris grupes: 1) mūro gaminių įtaka; 2) skiedinio įtaka; 3) mūro, kaip vienalytės medžiagos, poveikis. (žr. 1.1 lentelė).

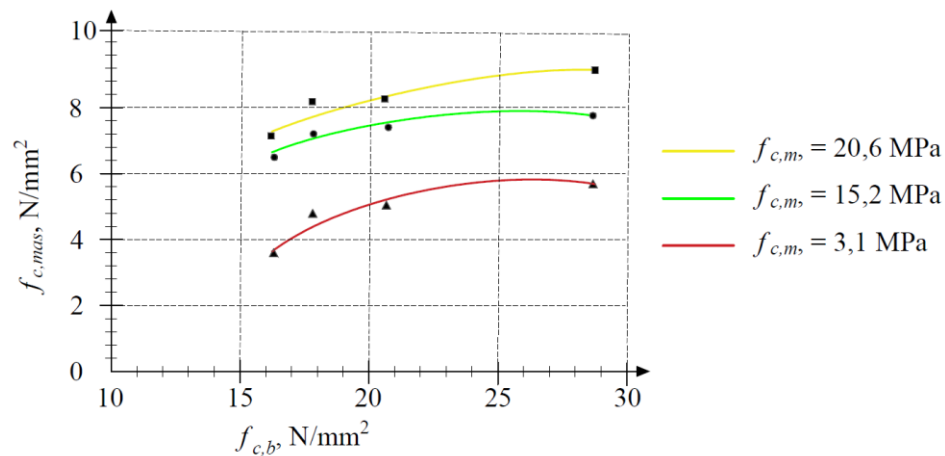
1.1 lentelė. Veiksniai, turintys įtakos mūro mechaninėms savybėms (Zavalis 2013, Hendry *et al.* 2004)

Mūro gaminio poveikis	Skiedinio poveikis	Mūro, kaip vienalytės medžiagos, poveikis
Gniuždomasis stipris	Gniuždomasis stipris	Mūro gaminių išdėstymas
Tempiamasis stipris	Deformacinės savybės	Įtempių koncentracija
Deformacinės savybės	Ryšys tarp mūro gaminių ir skiedinio	Apkrovos veikimo kryptis
Absorbcinės charakteristikos	Siūlės užpildymas ir sutankinimo tolygumas	
Konstruktinis sprendinys (forma, tuštymėtumas)	Gulsčiosios siūlės storis	

1.3.1. Mūro gaminio poveikiai

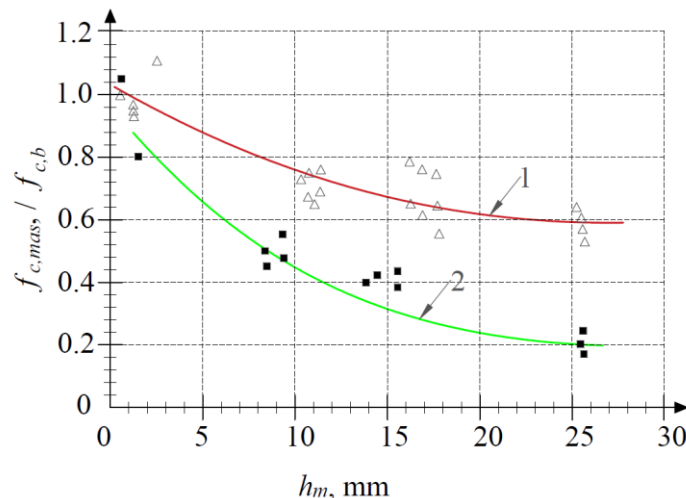
Mūro gaminio gniuždomasis stipris yra vienas iš dviejų pagrindinių komponentų nulemiančių bendrą mūro stiprį. Įvairūs tyrimai (Kaushik *et al.* 2007, Chahine 1989) parodė, kad mūro gniuždomajam stipriui didžiausią poveikį turi mūro gaminio gniuždomasis stipris.

Kaushik ir kitų autorių tyrimai parodė, kad naudojant pilnavidures keramines plytas, kai gulsčių ir stačių siūlių storis ir skiedinio gniuždomasis stipris pastovūs, eksperimentinė mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo mūro gaminio stiprio, yra netiesinė (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Mūro gaminių stiprio poveikis mūro gniuždomajam stipriui (Kaushik *et al.* 2007)

Dėl anksčiau aptarto mūre veikiančio triašio įtempių būvio (1.1 pav), mūro gaminiai skersine kryptimi yra tempiami, o skiedinys gniuždomas, todėl labai svarbi mūro gaminio savybė, daranti įtaką mūro stipriui, yra gaminio tempiamasis stipris.



1.13 pav. Mūro gaminių tuštymėtumo ir gulsčiosios siūlės storio poveikis mūro gniuždomajam stipriui (1 – pilnavidurės keraminės plytos, 2 – tuštymėtios keraminės plytos, 31 % tuštymėtumas) (Francis *et al.* 1971)

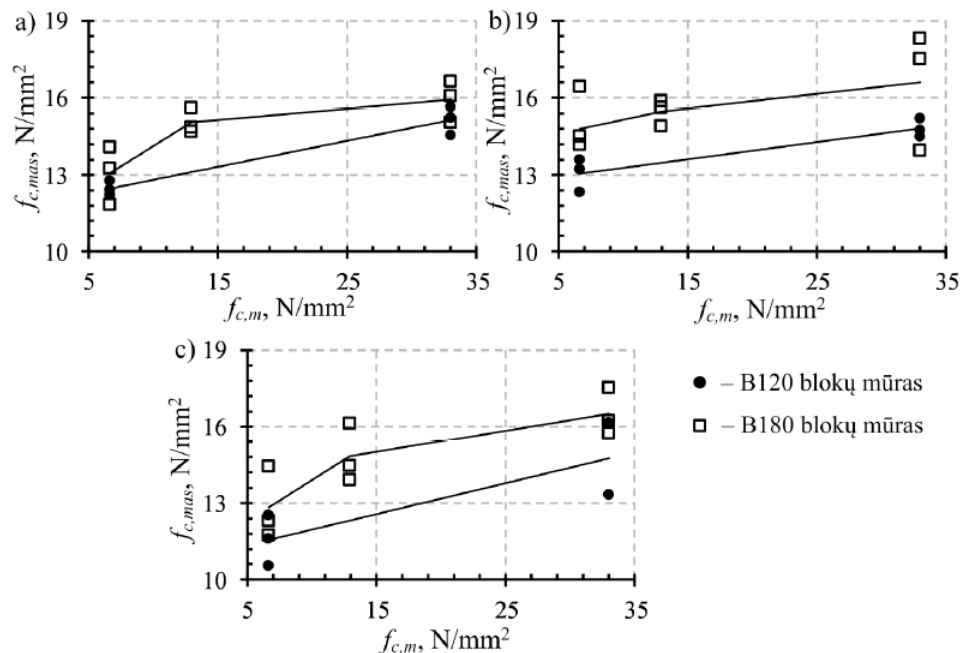
Dar viena svarbi savybė – mūro gaminio konstrukcinis sprendinys (mūro gaminio forma, tuštymėtumas). Horizontalius tempimo įtempius mūro gaminyje perima vertikalusis pjūvis. Kuo didesnis mūro gaminio aukštis, tuo didesnis vertikaliojo pjūvio plotas ir mūro laikomoji galia. Kuo didesnis skiedinio gulsčiosios siūlės aukštis, tuo mūro stipris mažesnis. Tai patvirtina Francis ir kt. atlikti tyrimai (žr. 1.13 pav.). Iš grafiko matoma, kad naudojant tuštymėtus ir pilnavidurius mūro gaminius, tuštymėtų plytų mūro stipris, skiedinio siūlės aukščiui kintant nuo 5 iki 25 mm, sumažėja 65 %.

Mūro gniuždomasis stipris priklauso nuo mūro gaminio ir skiedinio deformacinių savybių. Pagrindinis dydis apibūdinantis mūro gaminio deformacines savybes yra tamprumo modulis E_b . Mūro gaminio esančio mūre arba kaip atskiro elemento, tamprumo modulis kinta nedaug, o skiedinio deformacinės savybės, kaip rodo tyrimai (Lourenco 2006), gali skirtis kelis ir daugiau kartų.

Nuo mūro gaminio absorbcinių savybių labiausiai priklauso skiedinio gniuždomasis stipris, kuris padaro didžiausią įtaką mūro gniuždomajam stipriui, dėl susidarančio sudėtingo triašio įtempių būvio. Mūro gaminiai gali būti atvirų arba uždarytų porų, todėl mūro gaminių absorbcinės savybės stipriai skiriasi. Mūro gaminiai, įgerdami vandenį iš skiedinio, sumažina cemento vandens santykį. Dėl šios priežasties suprastėja hidratacijos procesas skiedinyje. Rekomenduojamas mažiausias vandens santykis, kad galėtų vykti hidratacijos procesas turėtų būti 15-25 % nuo cemento kiekio.

1.3.2. Skiedinio poveikiai

Kai naudojamas bendrosios paskirties skiedinys (gulsčiosios siūlės storis $3\text{ mm} < h_m < 15\text{ mm}$), mūro gniuždomojo stiprio skaičiavimas pagal EC6 ir STR sudarytas iš mūro gaminio stiprio ir skiedinio gniuždomojo stiprio. Didėjant gulsčiosios siūlės aukščiui, mūro gniuždomasis stipris mažėja, tai parodo R. Zavalio atlikti tyrimai su tuštymėtais silikatiniais blokais, naudojant bendrosios paskirties skiedinį (žr. 1.14 pav)



1.14 pav. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo skiedinio gniuždomojo stiprio, kai naudojamas bendrosios paskirties skiedinys, o gulsčiosios siūlės storis: a) 15 mm; b) 10 mm; c) 5 mm (Zavalis 2013)

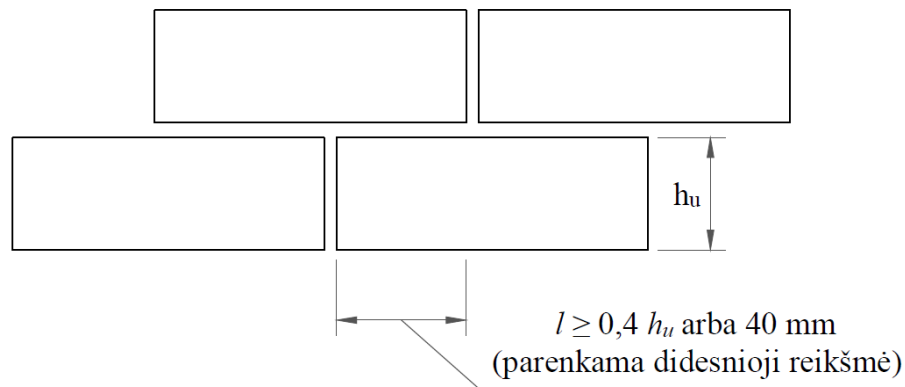
1.14 paveiksle matoma, kad vidutinis mūro gniuždomasis stipris, kintant skiedinio stipriui nuo 7 iki 33 MPa, padidėjo nuo 10 % iki 29 %.

Mūro mechaninės savybės priklauso nuo ryšio tarp mūro gaminių ir skiedinio. Jeigu sukibtis, tarp mūro komponentų nėra gera, tai veikiant triašiam įtempių būviui, dėl skersinių jėgų, sukibtis suardoma ir mūras praranda savo pastovumą. Mūro komponentų sukibtis labai priklauso nuo siūlės užpildymo bei sutankinimo tolygumo. Jeigu skiedinys sutankintas netolygiai, atsiranda įtempių koncentracijos bei sumažėja skiedinio sukibtis su mūro gaminiu.

1.3.3. Mūro, kaip vienalytės medžiagos, poveikis

Kai mūro konstrukcija yra statoma, mūro gaminiai turi būti išdėstomi pagal statybos taisykles bei kitus reikalavimus. Mūro gaminiai tarpusavyje turi būti perrišti (išdėstomi) taip, kad mūro siena būtų vientisas konstrukcinis elementas. (1.15 pav.)

Mūras, kaip kompozitinė konstrukcija, dažniausiai projektuojamas, kad perimtų gniuždymo apkrovas dėl santykinai nedidelio kontakto zonos stiprio. Mūrą apkraunant didelėmis horizontaliomis jėgomis ar lenkimo momentais, sukibtis tarp mūro gaminio ir skiedinio suardoma, mūras praranda savo mechanines ir deformacines savybes.



1.15 pav. Mūro gaminių perrišimo schema

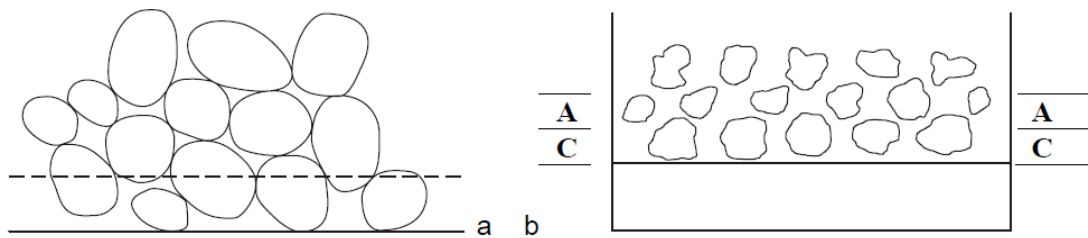
1.4. Mūro gaminio ir skiedinio sąlyčio zonos įtaka

1.4.1. Skiedinio paskirtis

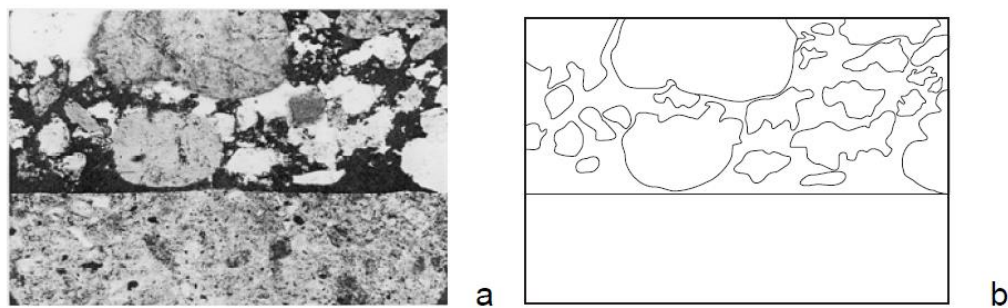
Skiedinio pagrindinė paskirtis yra sujungti mūro gaminius į bendrą mūro visumą. Taip pat skiedinys atlieka kitą svarbią funkciją – išlygina mūro gaminių matmenų nevienodumus. Mūrijimo metu skiedinys turi išlikti pakankamai plastiškas, kad plytos tolygiai atsiremtų ant skiedinio ir nesusidarytų įtempių koncentracija. Tačiau tuo pačiu metu skiedinys turi greitai įgauti tokį stiprį bei standumą, kad atlaikytų plytų savąjį svorį, mūrijant vis naujas plytų ar blokelių eiles.

Konstrukcijos eksploataavimo metu skiedinys yra lengviau pažeidžiamas ar paveikiamas erozijos, jis deformuojasi daugiau, negu mūro gaminys, todėl pagrindinės pastato deformacijos priklauso nuo skiedinio savybių.

Skiedinio paviršiaus struktūra gulsčiojoje siūlėje labiausiai priklauso nuo skiedinio sutankėjimo mūrijimo metu. Skiedinio dalelės gulsčiosios siūlės viduryje yra labiau sutankinamos negu ties kraštais. (Velmertfort 2005). Taip pat smėlio dalelės skiedinyje ties mūro gaminiu susitankina mažiau dėl „sienos efekto“ (angl. Wall – effect) (žr. 1.16 ir 1.17 pav. Šį efektą pastebėjo ir plačiau aprašė mokslininkas Ansonas . Sienos efektas pasireiškia sluoksnyje, kurio storis maždaug kaip vidutinis smėlio dalelės skersmuo. Arti mūro gaminio silpno skiedinio poros C zonoje (žr. 1.16 pav b.), perduos mažiau apkrovų negu kietos užpildo dalelės A zonoje. Dėl šio efekto susidarys netolygus įtempių pasiskirstymas pačioje kontakto zonoje, taip pat aukštesnės skiedinio zonos bus atsparesnės skersiniams įtempiams, susidarantiems dėl triašio įtempių būvio mūre (žr. 1.1pav.).

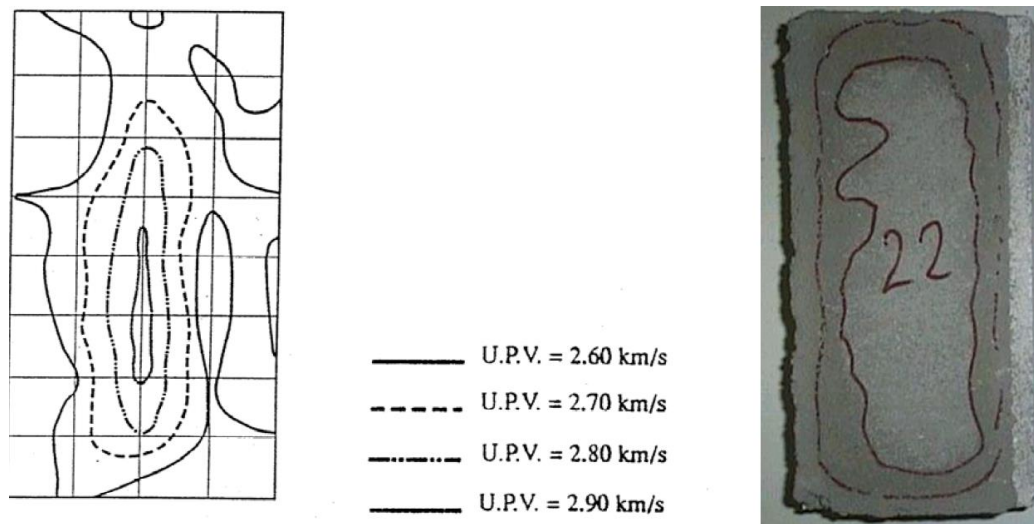


1.16 pav. Sienos efektas: a) ties standžiu elementu (siena) dalelių susitankinimas mažesnis palyginus su pjūviu per brūkšninę liniją; b) silpnosios skiedinio poros ties kontakto zona (Anson 1964)



1.17 pav. Sienos efektas: a) pjūvis ties skiediniu (viršuje) ir plyta (apačioje), padidinta 60 kartų, b) schematinis atvaizdavimas

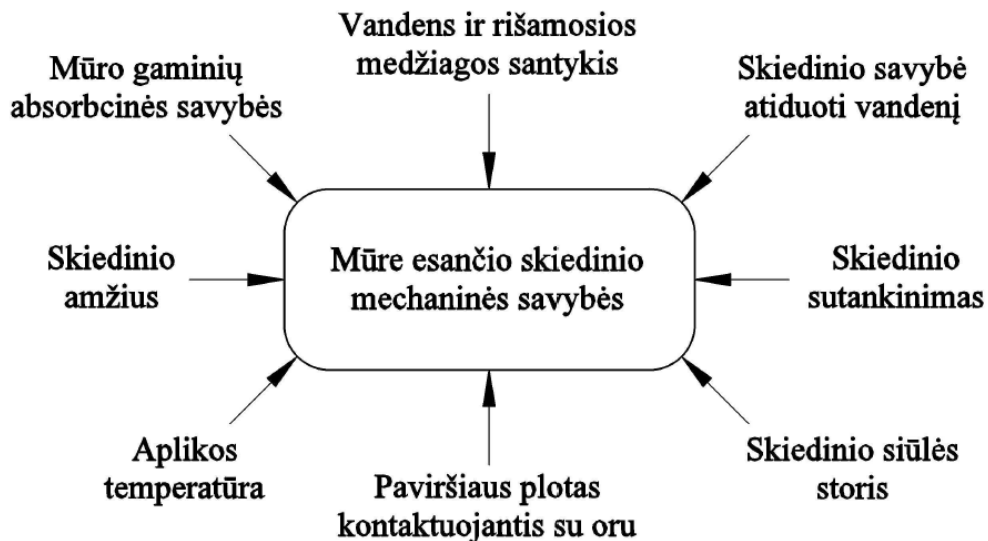
Mūro gaminio paviršius ties kontakto zona džiūsta greičiau negu skiedinio centras, taip pat, sausas mūro gaminys atima drėgmę iš skiedinio, dėl to atsiranda nevienodos sukibties sąlygos (žr. 1.18 pav.), gali pasireikšti didelės traukumo deformacijos ir skiedinyje atsiverti mikroplyšys.



1.18 pav. Ultra garso metodu išskirtos skirtingos sukibties zonos gulsčiosios siūlės plote ir skirtingo stiprio sukibties zonos išėjus gulsčiosios siūlės plokštelę (Hobbs 1991)

1.18 paveiksle pateiktas dėl nevienodų vandens atidavimo mūro gaminiui sąlygų, susiformavusios sukibties zonos.

U. Hastleris (Hustler 2000) išskyrė pagrindinius veiksnius, keičiančius skiedinio mechanines savybes (žr. 1.19 pav.).

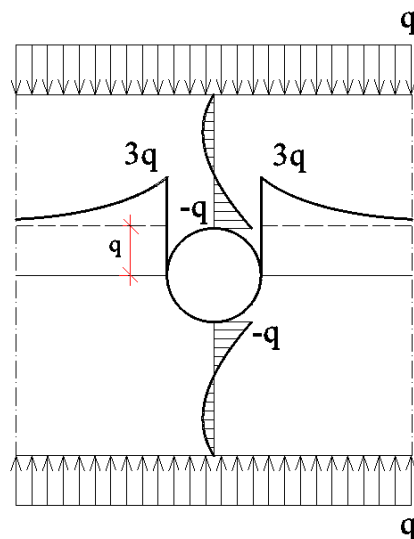


1.19 pav. Veiksniai turintys įtakos mechaninėms skiedinio savybėms (Zavalis 2013; Huster 2000)

1.4.2. Vandens įgerties įtaka mūro mechaninėms savybėms

Mūras, kaip minėta anksčiau, yra kompleksinė medžiaga, sudaryta iš skiedinio ir mūro gaminių. Mūrijimo metu skiediniui kietėjant susidaro poros, kurios sukelia įtempių koncentracijas perduodant apkrovas. Vanduo reikalingas užtikrinti reikiamą skiedinio konsistenciją patogiam mūrijimo darbui bei hidratacijos procesui vykti. Smėlis ir vanduo traukia vienas kitą dėl fizikos dėsnių, dalelės paviršius yra įelektrintas teigiamai, todėl traukia neigiamus vandens molekulių jonus, susidaro vandens plėvelė apie smėlio dalelę (Vermeltfort 2005). Be vandens, skiedinyje yra cemento ar kitos rišamosios medžiagos, kitų priedų. Cemento akmuo reaguos su dalimi vandens, vyks hidratacijos procesas ir vandens santykis skiedinyje pasikeis. Vanduo, nesureagavęs su cementu, lieka susidariusiose porose, kurios kapiliariniais kanalais susijungusios tarpusavyje. Praradus drėgmę skiedinyje pasireiškia traukumas, todėl kuo ilgiau skiedinys išlaikomas drėgnas, tuo mažesnė tikimybė, jog susidarys plyšiai dėl traukumo deformacijų. Tyrimais nustatyta, kad skiedinio sudėtį papildžius kalkėmis kietėjimo procesas sulėtės, kartu sumažės ir traukumo deformacijos (Balén, K. 1991). Optimalus vandens kiekis yra būtinas norint užtikrinti reikiamą skiedinio stiprį ir ilgalaikiškumą.

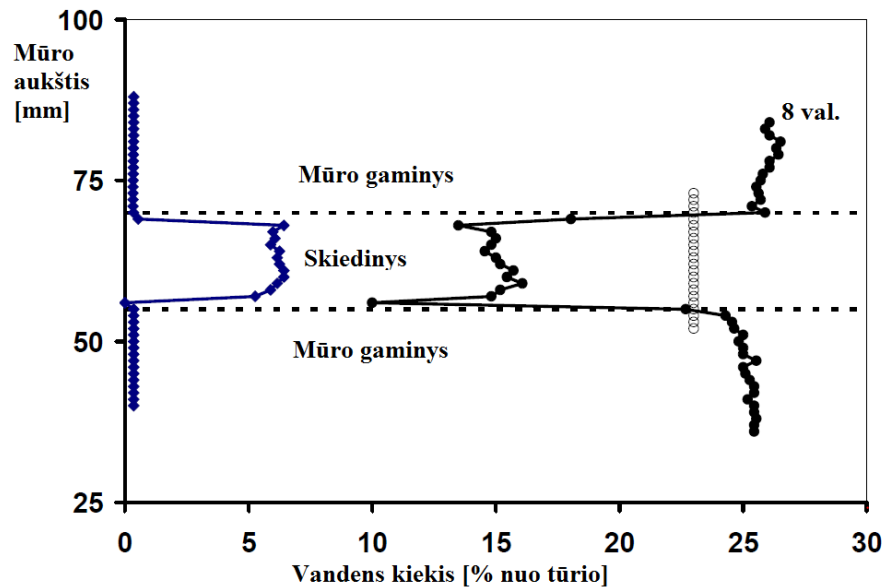
Priklausomai nuo mūro tipo, skiedinys konstrukcijoje sudaro mažesniąją sudedamąją dalį, nuo 1 % iki 18 % mūro tūrio. Nors mūre skiedinys sudaro santykinai mažą viso mūro dalį, tačiau būtent jis nulemia mūro gniuždomąjį stiprį. Įtempių pasiskirstymas aplink porą pateiktas 1.20 paveiksle (Witman, Zaitsev 1974). Iš paveikslo matyti, kad įtempių koncentracijos atsiranda ties poros kraštais, o tai padidina skiedinio mikroplyšių susidarymą, o tai reiškia, kad kuo skiedinyje mažiau porų, tuo skiedinio stipris didesnis.



1.20 pav. Įtempių pasiskirstymas aplink skiedinyje esančią porą (Witman, Zaitsev 1974)

Panaši priklausomybė tarp stiprio ir porų kiekio moksliniais tyrimais nustatyta ir betone. Gniuždomasis stipris betone sumažėja 5-6 % padidėjus 1 % porų kiekio (Vermeltfoort 2005).

Mūro gaminio bei skiedinio paviršiai bei absorbcinės savybės yra labai svarbus faktorius bendram mūro stipriui. Mūrijimo metu reikia užtikrinti, kad mūro gaminių paviršiai būtų pakankamai drėgni, priešingu atveju plytos, kurios yra visiškai sausos perims per daug vandens iš šviežio skiedinio ir taip jo kietėjimo proceso kokybė pablogės. Jei mūro gaminiai yra per drėgni yra didelė tikimybė, kad pasireikš plastinis traukumas. Grotas (Groot 1995) neutroniniu radiografiniu būdu nustatė, kad vandens absorbcavimo greitis iškart po skiedinio kontakto su mūro gaminiu labiausiai priklauso nuo mūro gaminio kapiliarinių savybių, mokslininkas išmatavo drėgmės atidavimo mūro gaminiui greitį, (žr. 1.21 pav.).



1.21 pav. Vandens persiskirstymas mūro gaminio ir skiedinio sandūroje (Groot 1995)

1.21 pav. Juoda spalva pažymėta kreivė rodo vandens atidavimą mūro gaminiui per 8 valandas iškart po bandinio paruošimo 95 % drėgmėje 20 °C temperatūroje. Mėlyna spalva pažymėta kreivė rodo vandens kiekį mūre, kai mūro gaminiai išdžiovinti 105 °C temperatūroje po 28 dienų kietėjimo.

Griaunant mūro konstrukcijas dažnai skiedinys atsiskiria nuo mūro gaminio atskiromis dalimis. Lenkiant skiedinys dažnai atsiskiria nuo mūro gaminio, todėl ši sandūra tarp mūro gaminio ir skiedinio laikoma silpniausia.

1.4.3. Kontakto zonos paviršių struktūra

Dažniausiai mūro gaminiai yra gaminami gamyklose, kur yra įdiegta sertifikuota kokybės kontrolės sistema, dėl šios priežasties mūro gaminiai turi vienodus paviršius, jų matmenų paklaidos nedidelės, todėl mūro gaminiai neturi didelės įtakos plytos ir skiedinio kontakto zonos kokybei. Pagrindiniai skiedinio savybių skirtumai skiedinį ruošiant gamykliniu būdu ir statybos aikštelėje yra aiškiai pastebimi tiek statybos metu, tiek bandant mūro fragmentus laboratorijoje. Skiedinio mišinio kokybė, kuri priklauso nuo užpildų proporcijų, vandens ir cemento santykio, padaro didelę įtaką mūro gaminio ir skiedinio kontakto zonai. Dėl įtempių persiskirstymo aplink silpnas skiedinio dalis (poras) ir stipresnes (smėlio daleles) skiedinys pradeda trupėti, skiedinio ir mūro gaminio kontakto vietoje atsiranda nevienalytiškumas. Sąveika tarp mūro gaminio ir šviežio skiedinio yra svarbiausias veiksnys šiai jungties kokybei. Mūro gaminio paviršių struktūra yra sukuriamama gamykloje įvairių gamybos procesų, o skiedinio struktūra sukuriamama mūrijimo metu. Skiedinys susideda iš smėlio dalelių ir rišamosios medžiagos, jo elgsena turi panašumų su betono elgsena. Mūrininkas mūrijimo metu gali kontroliuoti šviežio skiedinio klojimo ant mūro gaminių procesą, nuo to priklauso kontakto zonos kokybė, o tai yra labai svarbu apkrovų perdavimui mūro konstrukcijose.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad gulsčiosios siūlės mechaninės ir deformacinės savybės turi didelę įtaką mūro mechaninėms savybėms. Gulsčiosios siūlės poveikis mūro mechaninėms savybėms priklauso nuo mūro gaminio kapiliarinių įgerties savybių, mūro gaminio formos, tuštymetumo. Literatūroje nėra pakankamai eksperimentinių duomenų apie silikatinių pilnavidurių plytų mūro elgseną.

2. Mūrijimo skiedinio gulsčiųjų siūlių savybės turi didelę įtaką ne tik mechaninėms mūro savybėms, bet ir mūro elgsenai. Dėl nevienodos cemento hidratacijos gulsčiojoje siūlėje, skiedinio sąlytyje su mūro gaminiu, susidaro skirtingo standumo ir sukibties zonos.

3. Literatūroje pateikta daug bandymų rezultatų, kurie įrodo, kad gulsčiosios siūlės deformacijos ženkliai skiriasi nuo tokio pat storio sluoksnio skiedinio deformacijų. Tačiau literatūroje nėra pakankamai duomenų, kurie leistų nustatyti skiedinio siūlėje savybes, įvertinant kontakto zonos įtaką.

2. MŪRIJIMO SKIEDINIO GULSČIOJOJE SIŪLĖJE SAVYBIŲ TYRIMAI

2.1. Skiedinio mechaninės savybės, bandant etaloninius bandinius

2.1.1. Medžiagos

Gaminant mūro prizmių bandinius, gulsčiosioms siūlėms formuoti, kurių storis $3\text{ mm} < h_m < 15\text{ mm}$, naudojamas bendrosios paskirties skiedinys. Naudojami trijų skirtingų stiprių skiediniai. Cementinis skiedinys M1 – 30,53 MPa, kuris yra paruoštas iš cemento ir smėlio santykiu 1:3. Cementinis skiedinys M2 – 9,39 MPa, kuris yra paruoštas iš cemento ir smėlio santykiu 1:6. Mišraus tipo skiedinys M3 – 17,49 MPa, kuris yra pagamintas iš cemento, kalkių ir smėlio santykiu 1:0,3:4 (2.1 lentelė). Skiedinys maišomas rankiniu būdu ir bandomas pagal standarto LST EN 1015 – 11:2004 reikalavimus. Papildomai nustatomas skiedinio tamprumo modulis. Toliau aprašoma bandymų atlikimo metodika, bandinių paruošimo eiga ir pateikiami matavimų rezultatai.

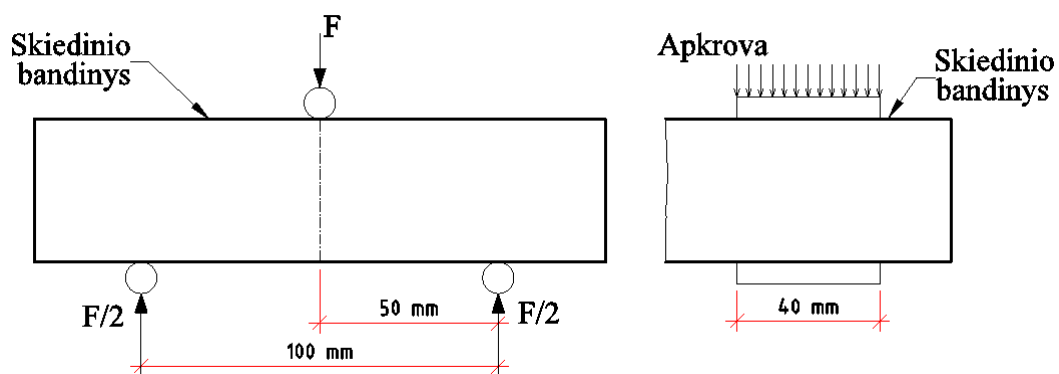
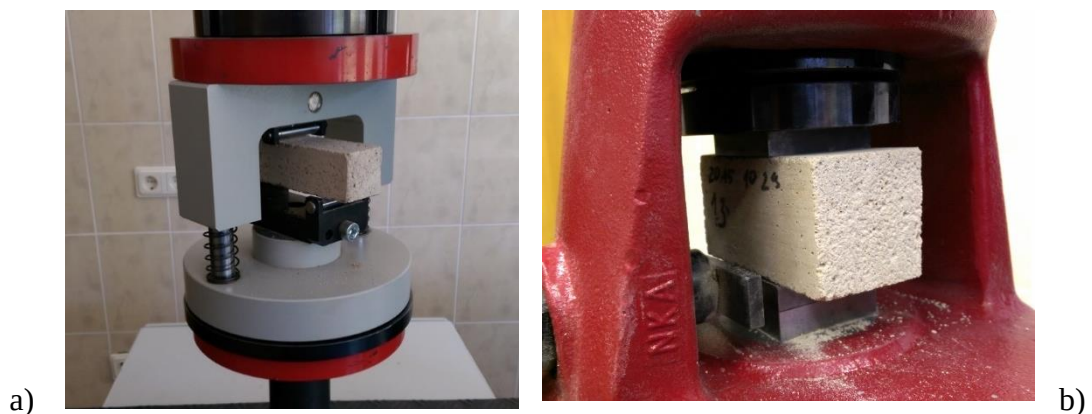
2.1 lentelė. Skiedinio sudėtis

Skiedinio šifras	Skiedinio sudėtis dalimis			Cemento vandens santykis
	Cementas	Kalkės	Smėlis	
M1	1	-	3	1,00
M2	1	-	6	0,56
M3	1	0.3	4	0,80

2.1.2. Skiedinio kontrolinių bandinių paruošimas ir bandymų metodika

Ruošiant skiedinį mūrijimui ir kontroliniams bandiniams, į smėlį pagal proporcijas supilamas cementas. Smėlis ir cementas tolygiai paskirstomi kai sausas mišinys permaišomas ir į jį supilamas vanduo. Skiedinio slankumas nustatomas kūgio įsmigimo metodu pagal standarto LST EN 1346 reikalavimus. Skiedinio slankis pagal kūgio įsmigimą – 70 mm. Skiedinio kontroliniai bandiniai formuojami metalinėse klojinių formose, kurių vidinių kraštinių matmenys 40 x 40 x 160 mm. Skiedinys klojamas dviem sluoksniais, kiekvieną sluoksnį sutankinant plūktuvu. Kiekvieno skiedinio rūšies pagaminta po 12 vnt. kontrolinių bandinių. Bandiniai 28 dienas laikomi polietilenuose maišuose. Skiedinio prizmės ir mūro fragmentai išbandomi praėjus tam pačiam kietėjimo laikui. Skiedinio kontroliniai bandiniai buvo išbandomi:

- lenkiant (lenkiamojo stiprio nustatymui) (2.1 pav., a);
- gniuždant prizmių (40 x 40 x 80 mm) galus (gniuždomojo stiprio nustatymui) (2.1 pav., b);
- gniuždant prizmes (40x40x160 mm) (tamprumo modulio nustatymui).



2.1 pav. Skiedinio kontroliniai bandiniai: a) lenkimo bandymas; b) gniuždymo bandymas

2.1.3. Skiedinio lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymas

Bandymai atliekami naudojant presą LFM100k, kurio tikslumo klasė 0,5. Tyrimams naudojami skiedinio lenkimo ir gniuždymo rėmai. Kontroliniai bandiniai tiriami juos apkraunant trumpalaikę statinę apkrovą nuolatiniu 50 N/s greičiu. Skiedinio lenkiamasis stipris $f_{fl,m}$ apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{fl,m} = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}, \quad (2.1)$$

čia F – maksimali atlaikoma jėga; l – atstumas tarp atramų; b – bandinio plotas; d – bandinio aukštis.

Gniuždomasis stipris nustatomas pagal standarto LST EN 1015 – 11:2004 reikalavimus, gniuždant trumpalaikę statinę apkrovą, bandinius gautus, atlikus lenkimo bandymą (2.1 pav., b). Apkrovos kėlimo greitis pasirenkamas pagal skiedinio stiprį. Gauti skiedinio stiprio rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

2.1.4. Bandymų rezultatai

2.2 lentelė. Skiedinio lenkimo ir gniuždymo rezultatų suvestinė

Skiedinio tipas	Bandinių skaičius, vnt.	Vidutinis lenkiamasis stipris $f_{fl,m}, N/mm^2$,	Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{c,m}, N/mm^2$ (cvp*)		Tempiamasis stipris $f_{t,m}, N/mm^2$ ***
M1	6 (18**)	6,26	30,53	(19,62 %)	2,76
M2	6 (18**)	2,46	9,39	(13,93 %)	1,09
M3	3 (9**)	3,26	17,49	(10,51 %)	1,44

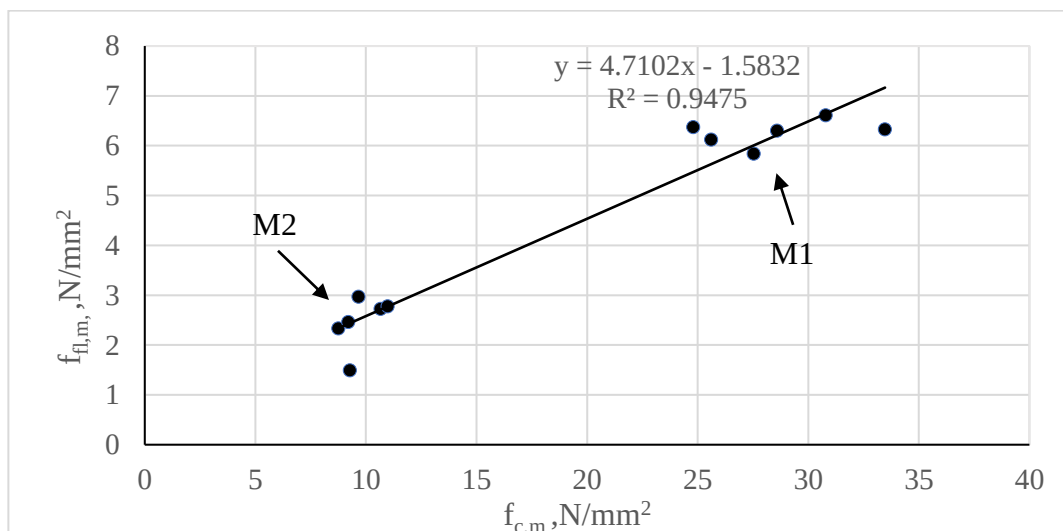
* Procentinis variacijos koeficientas
 ** Bandinių, naudojamų gniuždymo bandymams, skaičius
 *** Skiedinio ašinis tempiamasis stipris, apskaičiuojamas pagal EC2 pateiktą lenkiamojo ir tempiamojo stiprio priklausomybę (2.2).

Eksperimentiniais tyrimais gautos skiedinio gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio reikšmės tarpusavyje koreliuoja, bet M1 skiedinio gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas yra 19 %. Dviejų rūšių cementinių skiedinių gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių priklausomybė pateikta 2.2 paveiksle, ryšys tarp šių dydžių aiškiai pastebimas, o koreliacijos koeficientas lygus 0,95.

2.2 lentelėje pateiktos skiedinio tempiamojo stiprio reikšmės $f_{t,m}$ nustatytos vadovaujantis lenkiamojo ir tempiamojo stiprių priklausomybe (LST EN 1992-1-1; MC 1990):

$$f_{t,m} = f_{fl,m} \frac{1,5 \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{0,7}}; \quad (2.2)$$

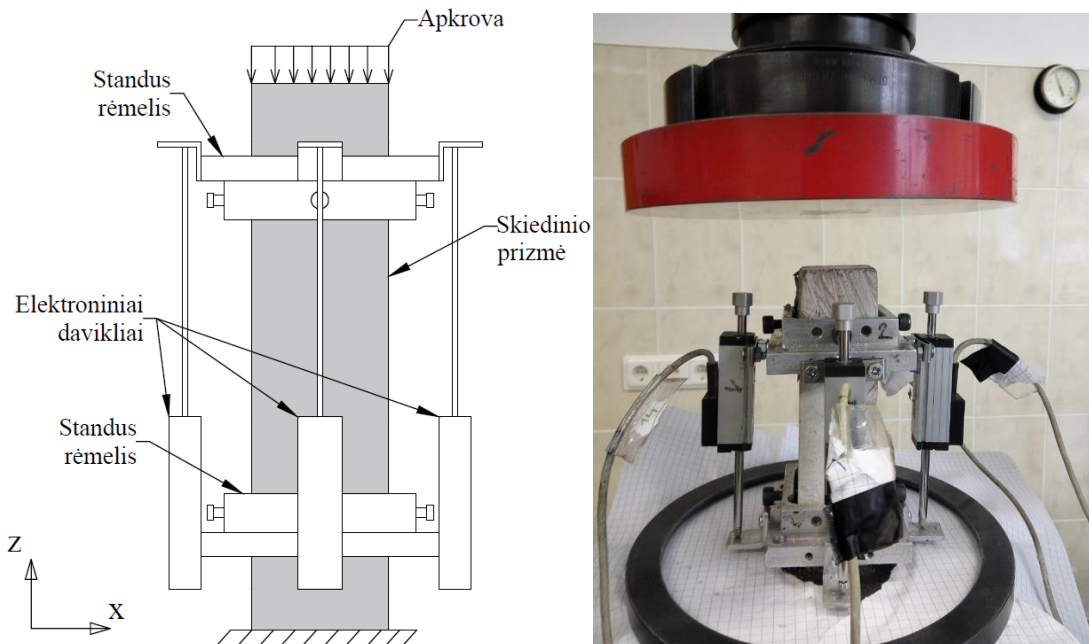
čia d – bandinio aukštis; $d_0 = 100mm$.



2.2 pav. Ryšys tarp skiedinio gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių

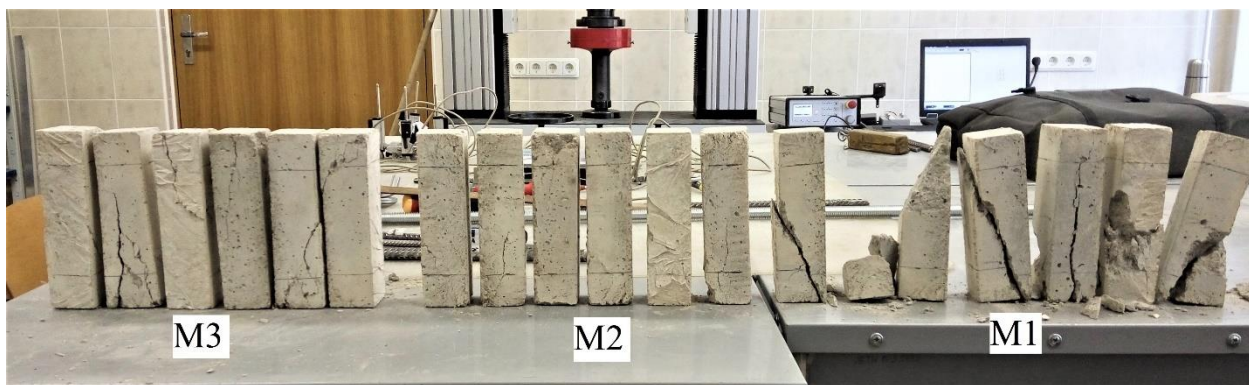
2.1.5. Skiedinio deformacinių savybių nustatymas

Skiedinio deformacinių savybių nustatymui naudojamos standartinės skiedinio prizmės (40 x 40 x 160 mm). Matavimo prietaisų išdėstymo schema pateikta 2.3 paveiksle. Tyrimai atliekami LFM100kN presu, kurio tikslumo klasė 0,5.



2.3 pav. Skiedinio deformacinių savybių tyrimo ir prietaisų išdėstymo schema ir bendras vaizdas

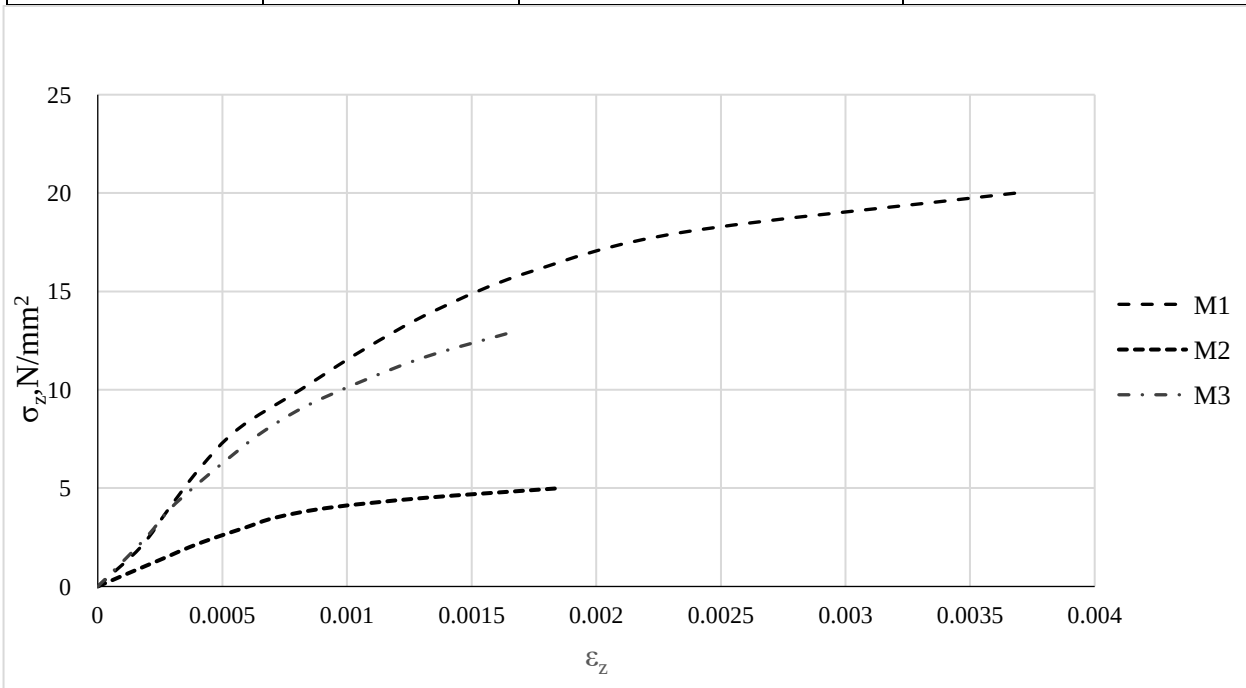
Išilginės skiedinio bandinio deformacijos matuojamos „Almemo“ matavimo sistema su 1 % tikslumo keturiais elektroniniais poslinkio matuokliais TR025 (žr. A.1 pav.). Prietaisai iš visų keturių prizmės pusių pritvirtinami prie standaus metalinio rėmo. Matavimo bazė lygi 100 mm. Matavimo rezultatų grafikai pateikti 2.5 grafike. Tamprumo modulis $E_{m,obs}$ nustatytas, kai įtempiai sudarė $0,33\sigma_{max}$ (Zavalis 2013). Nustatytos skiedinio deformacinės savybės pateiktos 2.3 lentelėje.



2.4 pav. Skiedinio prizmės po suirimo
Skiedinio kontrolinių bandinių, atskirų daviklių, matavimo rezultatai pateikti A priede.

2.3 lentelė. Skiedinių tamprumo modulių suvestinė

Skiedinio tipas	Bandinių skaičius vnt.	Vidutinis tamprumo modulis $E_m \cdot 10^{-3}, N/mm^2$	Variacijos koeficientas, %
M1	6	16,5	37,6
M2	6	6,9	36,2
M3	6	14,1	37,0

**2.5 pav.** M1, M2 ir M3 skiedinių būdingosios $\sigma - \varepsilon$ priklausomybių diagramos

2.5 paveiksle pavaizduotos vidutinės trijų skiedinių rūšių $\sigma - \varepsilon$ diagramos. Šios įtempio deformacijų priklausomybės gautos išvedus vidutines reikšmes tarp 6 vienos rūšies kontrolinių bandinių prizmių. Iš grafiko matoma, kad stipriausias skiedinys M1, kurio vidutinis gniuždomasis stipris yra 30,53 N/mm², suiro pasiekęs 0,0037 ‰ ribinę santykinę deformaciją. Skiedinys M2, kurio vidutinis gniuždomasis stipris yra 9,39 N/mm², suiro pasiekęs 0,0018 ‰ ribinę deformaciją. 2.4 paveiksle matomos tamprumo modulio bandymo prizmės po suirimo. Skiedinio prizmių suirimo charakteris patvirtina bandymu gautus mechaninių savybių rezultatus. Matoma, kad M1 skiedinio prizmių suirimo charakteris tamprus, plyšiai atsiveria prieš pat suirimą. Mažesnio standumo skiedinio bandinių M2 ir M3 (2.3 lentelė) prizmių suirimo charakteris daug plastiškesnis, matomi atsivėrę plyšiai, bandymo metu energija disipuoja.

2.2. Skiedinio kietėjimo gulsčiojoje siūlėje ypatumai

1.4 poskyryje aptartos skiedinio kontakto zonos su mūro gaminiu ypatybės. Mokslininkai Miuleris, Meyeris bandymais įrodė, kad mūro gaminio kapiliarinės savybės, bendrosios paskirties skiedinio gniuždomąjį stiprį siūlėje, gali stipriai paveikti. Šviežią skiedinį užklojus ant mūro gaminių, iškart pradeda vykti vandens įgerties, iš gulsčiosios skiedinio siūlės, procesas. Vandens įgerties greitis, pirmosiomis kontakto minutėmis, labiausiai priklauso nuo mūro gaminio kapiliarinių savybių.

Vanduo, reikalingas cemento hidratacijos procesui, yra atimamas iš skiedinio. Skiedinys, netekęs reikalingo vandens, nepasiekia savo projektinio stiprio. Ilgainiui dalis drėgmės iš mūro gaminio grįžta į skiedinį, tačiau didesnė dalis išgaruoja pro gulsčiosios siūlės ir mūro gaminio kraštus. Dėl šios priežasties sukibtis tarp skiedinio ir mūro gaminio įgauna nevienodą stiprį ir ties gulsčiosios siūlės išoriniu kontūru gali stipriai susilpnėti

2.2.1. Bandymų paruošimas ir bandymų metodika

Cemento ir vandens santykio kitimo gulsčiojoje siūlėje tyrimui, kiekvienam skiediniui paruošta po tris plytų bandinius, sudarytus iš dviejų mūro gaminių su viena gulsčiaja siūle (2.6 pav.). Visos bandymui naudotos orasausės plytos pasveriamos prieš mūrijimą. Šviežias skiedinys klojamas ant mūro gaminio, uždedama antroji plyta ir bandinys kietėja vieną valandą. Po valandos bandinys išardomas, likęs cementas nuo plytų nuvalomas, o mūro gaminiai sveriami dar kartą. Iš siūlės įgerto vandens kiekis apskaičiuojamas pagal (2.3) formulę.



2.6 pav. Mūro bandinių fragmentai su viena gulsčiaja siūle. Kairėje panaudotas M1 skiedinys, dešinėje M2

$$m_w = m_{b,ad,t} + m_{b,ad,b} - m_{b,w,t} - m_{b,w,b} \quad (2.3)$$

čia m_w – gulsčiosios siūlės prarasto vandens masė po 1 valandos kietėjimo; $m_{b,ad,t}$ ir $m_{b,ad,b}$ – viršutinės ir apatinės orasausių plytų masė; $m_{b,w,t}$ ir $m_{b,w,b}$ – viršutinės ir apatinės plytos masės po 1 valandos kietėjimo.

Mūro gaminių masės prieš mūrijimą ir po vandens įgėrimo pateiktos 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Mūro gaminių masės

Skiedinio žymuo	Bandinio nr.	Plytos pozicija	Orasausės plytos masė $m_{b,ad}, g$	Plytos masė po 1 val. kietėjimo, $m_{b,w}, g$	Išdžiovintos plytos masė $m_{b,d,,} g$	Įgerto vandens kiekis plytoje, g	Iš siūlės įgerto vandens kiekis, $m_{b,w}, g$	Vidurkis, g
M1	1	Viršutinė	5141.4	5151.3	4820.0	9.9	45.5	41.7
		Apatinė	5058.5	5094.1	4681.1	35.6		
	2	Viršutinė	5016.7	5024.3	4822.0	7.6	38	
		Apatinė	5170.0	5200.4	4820.7	30.4		
	3	Viršutinė	5145.3	5152.8	4774.0	7.55	41.7	
		Apatinė	5105.9	5140.1	4764.5	34.2		
M2	1	Viršutinė	5015.2	5031.5	4779.2	16.4	54.7	67.0
		Apatinė	5136.1	5174.5	4781.1	38.4		
	2	Viršutinė	5137.4	5160.9	4771.9	23.5	79.7	
		Apatinė	5015.5	5071.7	4806.8	56.2		
	3	Viršutinė	5097.7	5118.2	4823.4	20.5	66.7	
		Apatinė	5019.1	5065.3	4761.1	46.2		
M3	1	Viršutinė	5080.4	5098.8	4752.6	18.4	61.9	64.3
		Apatinė	5010.5	5054	4830.9	43.5		
	2	Viršutinė	5099.0	5119.3	4752.7	20.4	71.3	
		Apatinė	4975.1	5026	4840.1	50.9		
	3	Viršutinė	5105.7	5122.1	4790.4	16.4	59.9	
		Apatinė	4979.5	5023	4771.0	43.5		

Pagal 2.4 lentelėje pateiktus duomenis matome, kad iš didžiausio stiprio skiedinio M1, kuriame cemento ir vandens santykis 1:1, mūro gaminiai vidutiniškai įgėria 41,7 g vandens. Silpnescio skiedinio M2, kuriame cemento ir vandens santykis 1:1,8, gulsčioji siūlė mūro gaminiams vidutiniškai atiduoda 67 g vandens. Vandens kiekis M1 skiedinyje didesnis lyginant su skiediniu M2, tačiau M2 skiedinys vandens įgėrė 37 % daugiau. Taip nutinka dėl skirtingo cemento kiekio ir hidratacijos intensyvumo. Šią tendenciją galima pastebėti iš 2.6 paveiksle pateiktų nuotraukų, kur bandinio su M1 skiediniu įgėrio aukštis apatinėje plytoje (po 1 valandos kietėjimo) kinta nuo 11 mm iki 14 mm, o įgėrio aukštis mūro gaminyje su M2 skiediniu kinta nuo 15 mm iki

20 mm. Bandinių viršutiniai mūro gaminiai su M1 skiediniu įgėrė vidutiniškai 75 % mažiau už apatines plytas, o bandinių su skiediniu M2 - 42 % mažiau. (žr. 2.4 lentelė ir 2.6 pav.).

2.5 lentelė. Vandens ir cemento santykis skiedinio siūlėje prieš ir po vandens atidavimo mūro gaminiams

Skiedinio tipas	Cemento kiekis siūlėje, l	Vandens kiekis siūlėje, l	C/V santykis siūlėje	Vandens kiekis siūlėje po atidavimo, l	C/V santykis po vandens atidavimo	C/V skirtumas, kartais
M1	0.1200	0.1200	1,00	0,0782	1,53	1,53
M2	0.0600	0.1080	0,56	0,0410	1,46	2,63
M3	0.0900	0.1125	0,80	0,0481	1,87	2,33

2.5 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad C/V santykis gulsčiojoje siūlėje, kai naudojamas M1 skiedinys, po vandens atidavimo mūro gaminiams pasikeičia 1,53 karto. Kai naudojamas M2 skiedinys C/V santykis pasikeičia 2,33 karto. Gulsčiosios siūlės plokštelės gniuždomasis stipris priklauso nuo C/V santykio siūlėje, todėl kuo daugiau vandens mūro gaminys įgeria iš siūlės, tuo siūlės stipris mažesnis. Tai patvirtina dvigubo praspaudimo tyrimo gniuždomojo stiprio rezultatai, kai plokštelės, išimtos iš mūro gulsčiosios siūlės, ir tarp skiedinio bei mūro gaminio įdedama maistinė plėvelė. Dėl plėvelės vanduo neįgeriamas į mūro gaminius (žr. 2.10 pav.).

2.2.2. Skiedinio sukibties su mūro gaminiu ypatybės

Kai yra gera sukibtis, tai sunkiai atskiriamas gulsčiosios siūlės skiedinys nuo mūro gaminio. B. Hobbs'as (Hobbs 1991) atliko sankibos tarp mūro gaminio ir skiedinio tyrimus ir nustatė, kad dėl nevienodo vandens atidavimo susiformuoja kelių stiprių sukibties zonos (žr. 1.18 pav.).



2.7 pav. Stipri gulsčiosios siūlės sukibties zona, kai sunkiai atskiriama skiedinio plokštelė nuo mūro gaminio

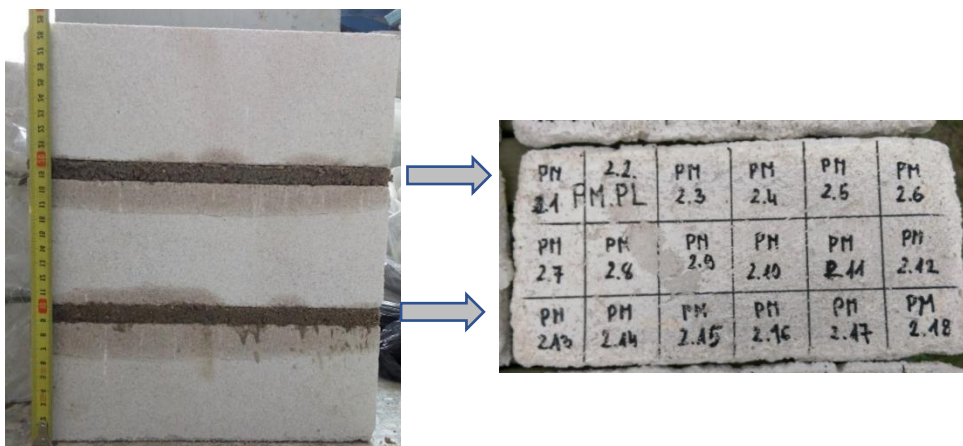
Skiediniui pasiekus reikiamą stiprį, gulsčiosios siūlės išėmimo procesas yra sudėtingas (žr. 2.7 pav.), nes dėl stiprios sukibties sunku atskirti skiedinio plokštelę nuo mūro gaminio. Atlikus tyrimus pastebėta, kad naudojant stipriausią M1 cementinį skiedinį kokybiška sukibtis tarp mūro

gaminio ir skiedinio sudaro apie 60-80 % sąlyčio paviršiaus ploto. Naudojant silpnesnį cementinį skiedinį M2, gulsčiosios siūlės atskyrimas nuo mūro gaminio nesudėtingas dėl žymiai silpnesnės sukibties. Taip nutinka dėl mažesnio skiedinyje esančio vandens ir cemento santykio.

2.3. Skiedinio gulsčiosios siūlės gniuždomasis stipris

2.3.1. Bandiniai ir bandymo metodika

1.19 paveiksle pateiktos savybės, kurios daro įtaką skiedinio mechaniniams parametrams. Pagrindinis parametras yra skiedinio siūlės vandens atidavimas mūro gaminiui ir vandens išgaravimas ties gulsčiosios siūlės kraštais. Norint ištirti gulsčiosios skiedinio siūlės vandens atidavimo įtaką skiedinio gniuždomajam stipriui, suformuoti trijų plytų bandiniai su 11-12 mm skiedinio gulsčiaja siūle. Po 28 parų, kai pasiekiamas reikiamas skiedinio stipris, iš mūro išimamos skiedinio plokštelės ir supjaustomos į 40x40 mm plokšteles žr. (2.8 pav.). Plokštelės bandomos dvipusiu gniuždymu (žr. 2.9 pav.), apkrovimo greitis 100 N/s.



2.8 pav. Mūro fragmentas su dviem gulsčiosioms siūlėmis (kairėje). Skiedinio plokštelė, išimta iš mūro siūlės ir paruošta pjaustymui (dešinėje)



2.9 pav. Dvipusio gniuždymo tyrimas

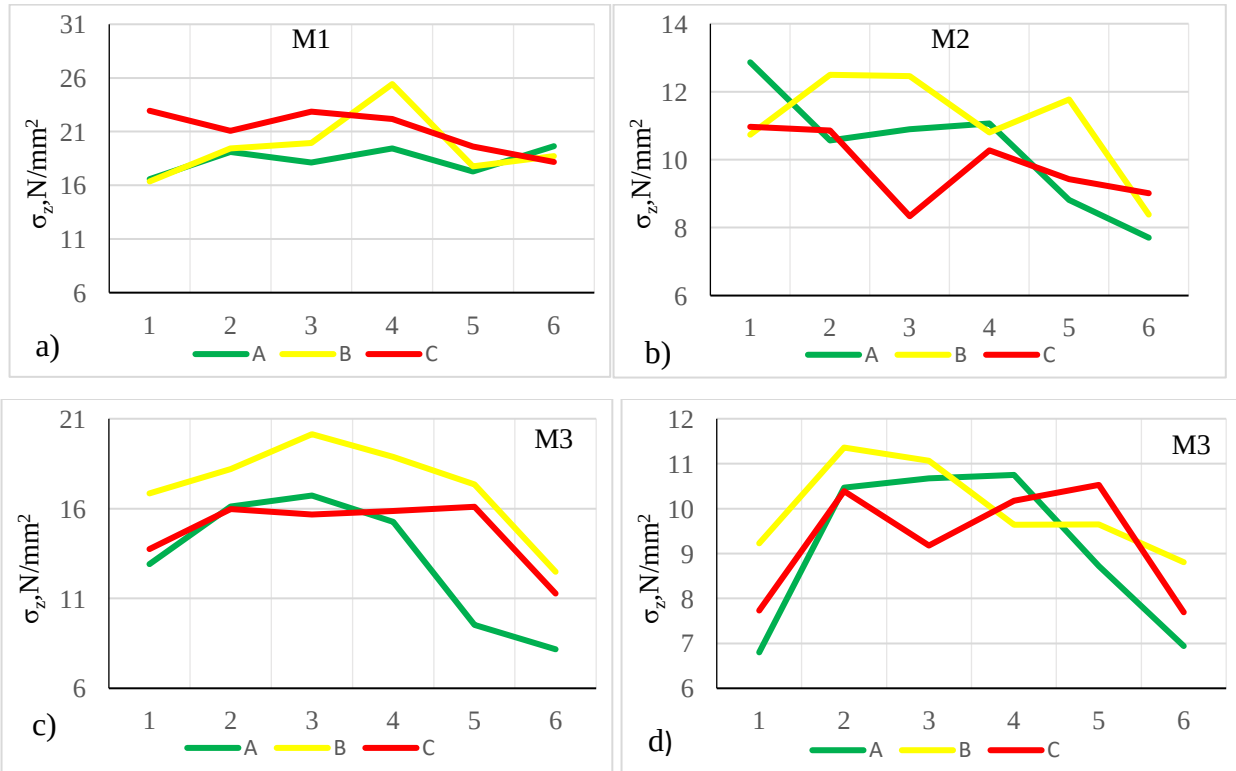
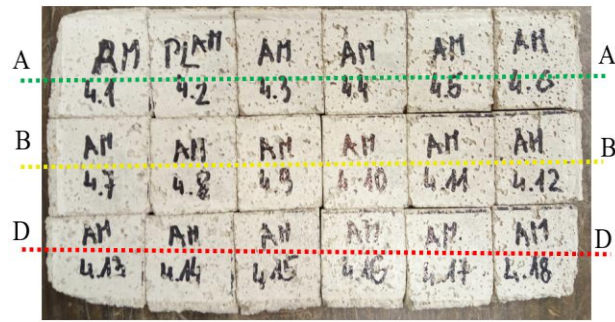
Norint iširti, kokią įtaką gniuždomajam stipriui daro mūro gaminių vandens įgertis iš skiedinio gulsčiosios siūlės, sudaryti 4 mūro fragmentai. Kiekvienas jų sudarytas iš 3 mūro gaminių ir 2 gulsčiųjų siūlių (žr. 2.10 pav.). Po 28 dienų skiedinio plokštelės išimamos iš mūro gaminių ir bandomos dvigubo praspaudimo tyrimu.



2.10 pav. Mūro bandiniai su plėvelės intarpu

2.3.2. Bandymo rezultatai

Atlikus gniuždomojo stiprio plokštelių bandymus dvipusiu gnuždymu, matoma tendencija, jog skiedinio stipris plokštelės plote pasiskirsto nevienodai. Kraštinių plokštelių gniuždomasis stipris $f_{m,pl}$ kina nuo 10 % iki 35 % ir yra mažesnis už plokštelių stiprį, kai jos yra siūlės vidurinėje dalyje (žr. 2.11 pav. B pjūvis). Plokštelės stipris $f_{m,pl}$ viduryje didesnis, kai naudojamas didesnio stiprio skiedinys. Tai rodo ir skirtingi M1 ir M2 skiedinių $f_{m,pl}$ procentiniai variacijos koeficientai (žr. 2.6 lentelė). Kuo mažesnis stipris, tuo didesnis procentinis variacijos koeficientas. Dėl tos priežasties tarp plokštelių stiprių yra didelis skirtumas. 2.11 paveiksle pateiktas skiedinio plokštelių stiprio kitimas siūlės plote, kuris patvirtina, jog vandens išgaravimas iš skiedinio, daro didelę įtaką mūro mechaninėms ir deformacinėms savybėms. Skiedinio tamprumo modulis nėra vienodas visoje skiedinio siūlėje, todėl mūro konstrukcijose, veikiant triašiam įtempių būviui, aprašytam 1.1 poskyryje, skiedinio sukeltos skersinės deformacijos, mūro gaminyje, pasiskirsto nevienodai per visą mūro gaminio kontakto su skiediniu zoną.



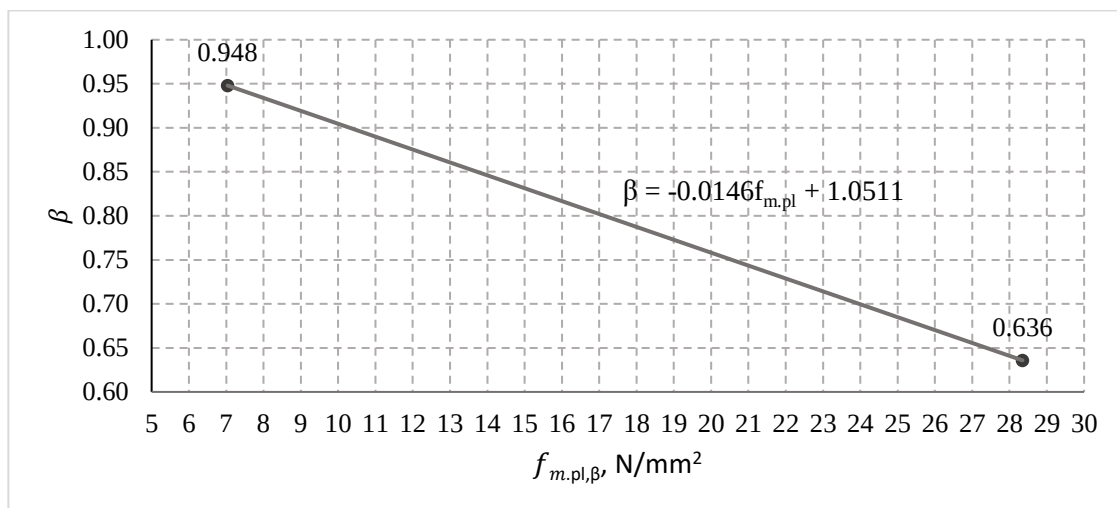
2.11 pav. Skiedinio gniuždomojo stiprio pasiskirstymas plokštelėse: a) kai naudojamas skiedinys M1; b) kai naudojamas skiedinys M2; c) kai naudojamas skiedinys M3 po 14 parų kietėjimo; d) kai naudojamas skiedinys M3 po 28 parų kietėjimo

2.6 lentelė. Skiedinio gniuždomųjų stiprių palyginimas

Skiedinio rūšis	Gniuždomasis stipris f_m , N/mm ² *	Gniuždomasis plokštelių stipris $f_{m,pl}$, N/mm ² *	Gniuždomasis plokštelių stipris su plėvelės tarpu $f_{m,pl,i}$, N/mm ² *	Mūro stipris $f_{mas,obs}$, N/mm ²
M1	30,53 (16,92 %)	18,87 (16,10 %)	36,42 (16,19 %)	17,74
M2	9,39 (13,94 %)	13,27 (22,44 %)	10,36 (15,60 %)	13,00
M3 (50 % f_m)	11,66 (10,59 %)	9,59 (14,65 %)	-	-
M3 (100 % f_m)	17,49 (10,51 %)	15,07 (21,04)	-	13,22
* – skliausteliuose pateiktas procentinis variacijos koeficientas				

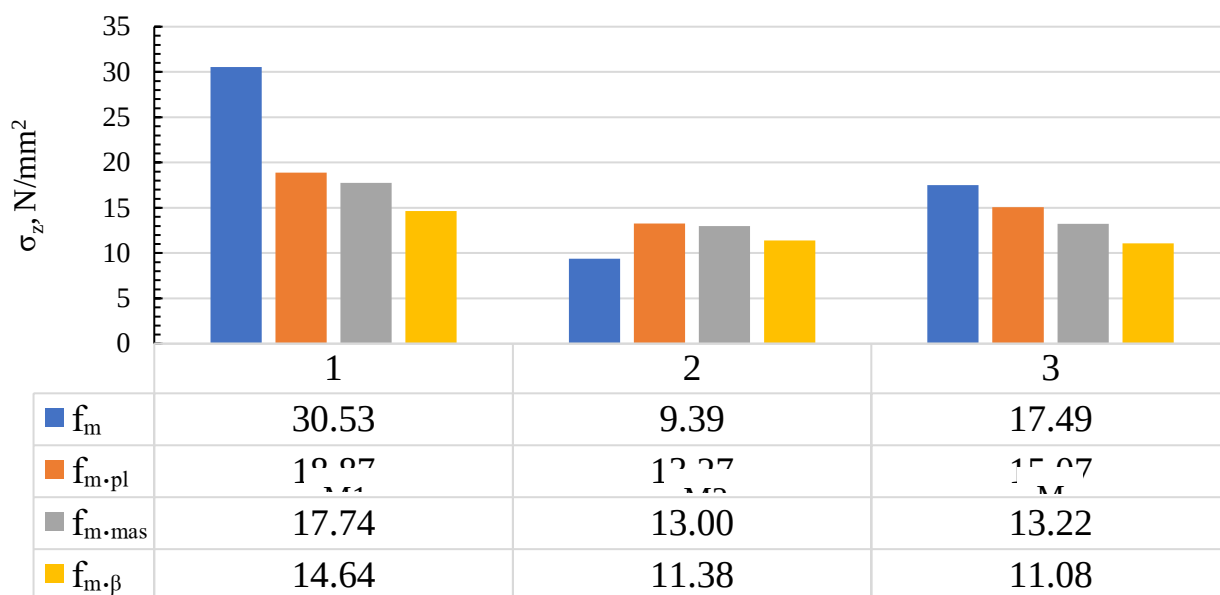
Cementinio skiedinio (M1) gniuždomasis stipris f_m , nustatytas gniuždant kontrolinius bandinius, yra 1,61 karto didesnis negu plokštelių, išimtų iš skiedinio siūlės, gniuždomasis stipris $f_{m,pl}$. Šis skirtumas atsiranda dėl nevienodų vandens įgėrio sąlygų bei dėl mažo bandinio aukščio (mastelio faktoriaus). Naudojant cementinį skiedinį (M2) gniuždomasis stipris f_m yra 0,70 karto mažesnis negu plokštelių gniuždomasis stipris $f_{m,pl}$. Mūro fragmente veikiantys ribiniai gniuždomieji įtempiai $\sigma_z = f_{mas,obs}$ yra nuo 0,75 iki 0,97 mažesni už skiedinio plokštelių gniuždomąjį stiprį $f_{m,pl}$. Taip nutinka dėl sudėtingo įtempių būvio, veikiančio mūro konstrukcijoje, kai mūro komponentus veikia priešingų ženklų įtempiai.

E. Galatilčio magistriniame darbe (Galatiltis 2017) atlikti tyrimai, kuriose aprašoma kokią įtaką skiedinio gniuždomajam stipriui turi mastelio efektas. Šiame darbe apskaičiuojamos skiedinio gniuždomojo stiprio redukcijos koeficiento β reikšmės su 95 % patikimumu. Koeficientas parodo gniuždomojo stiprio santykį tarp pagal LST EN 1015-11:2004 standarto reikalavimais ištirtų kontrolinių skiedinio bandinių ir skiedinio plokštelių, atpjautų iš skiedinio prizmės, ir išbandytų dvigubo gniuždymo metodu (žr. 2.12 pav.).



2.12 pav. Cementinio skiedinio gniuždomojo stiprio redukcijos koeficiento β priklausomybė nuo skiedinio plokštelių, atpjautų iš skiedinio prizmių, gniuždomojo stiprio $f_{m,pl,\beta}$ (Galatiltis 2017)

2.13 paveiksle palyginti skiedinio stipriai bandiniams suirus. Čia f_m – skiedinio stipris nustatytas gniuždant kontrolinius bandinius pagal LST EN 1015-11; $f_{m,pl}$ – skiedinio plokštelių išimtų iš skiedinio siūlės, gniuždomasis stipris, nustatytas taikant dvigubo gniuždymo metodą. $f_{m.mas,obs}$ – mūro fragmentų gniuždomasis stipris; $f_{m\beta}$ – skiedinio stipris pritaikius redukcijos koeficientą β .



2.13 pav. Skiedinio stiprių rezultatų palyginimas

Kaip matome iš 2.13 paveikslo, pritaikius redukcijos koeficientą β , skiedinio plokštelių gniuždomąjį stiprį $f_{m.pl}$ perskaičiavus į skiedinio gniuždomąjį $f_{m.β}$, stipris sumažėjo 14 – 26 %. Nustatytos β koeficiento reikšmės gali būti pritaikytos praktikoje, kai yra tiriamas eksploatuojamo mūro gulsčiosios siūlės skiedinio gniuždomasis stipris. (Galatiltis 2017)

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Eksperimentais nustatyta kad:

1. Per valandą kietėjant skiediniui, dėl kapiliarinių savybių, mūro gaminys įgeria nuo 35 iki 60 % vandens atitinkamai iš cementinio skiedinio M1 ir M2. Po valandos vandens įgerties gylis mūro gaminyje siekia 11 - 20 mm. Dėl vandens įgerties C/V santykis cemento smėlio skiedinyje M1 ir M2 sumažėja atitinkamai 1,5 ir 2,6 karto, o cemento kalkių smėlio skiedinyje (M3) - 2,3 karto lyginant su pradiniu C/V santykiu.

2. Dėl nevienodų kietėjimo sąlygų, skiedinio gniuždomasis stipris gulsčiojoje siūlėje pasiskirstęs nevienodai. Skiedinio gniuždomasis stipris $f_{m.pl}$, gulsčiosios siūlės ploto vidurinėje dalyje yra nuo 5 % iki 20 % didesnis už gniuždomąjį stiprį kraštinuose sluoksniuose.

3. EKSPERIMENTINIAI MŪRO TYRIMAI

3.1. Mūro gaminių mechaninių ir deformacinių savybių nustatymas

3.1.1. Bandiniai

Mūro fragmentų gamybai naudojamos pilnavidurės silikatinės plytos. Mūro gaminių parametrai pateikti 3.1 lentelėje. Plytų gamintojo deklaruojama stiprumo klasė 20. Analogiškai mūro gaminiai naudojami T. Šlivinsko ir kt. (Šlivinskas *et al.* 2016) tyrimuose. Toliau pateiktos silikatinės plytos deformacinės savybės, nustatytos T. Šlivinsko ir kt. atliktais bandymais.

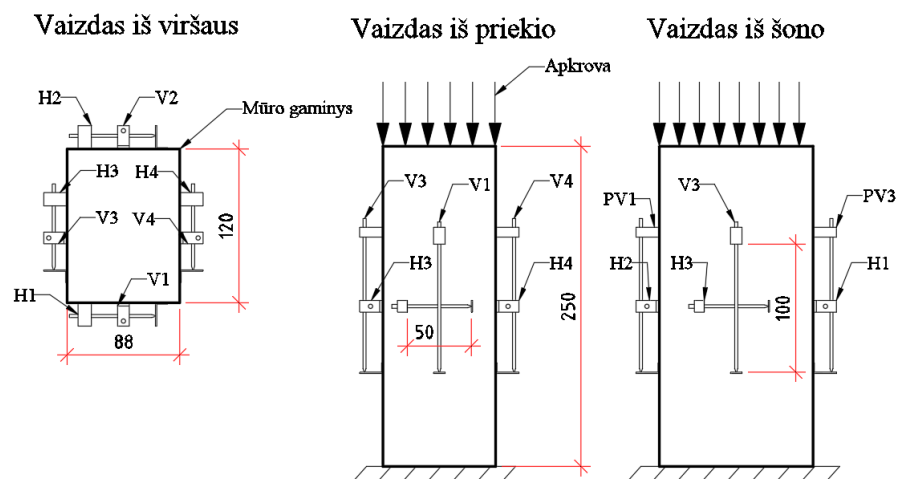
3.1 lentelė. Mūro gaminių parametrai

Gaminys	Gaminio matmenys, mm			Gamintojo deklaruota gaminio klasė	A_{net}^* , cm^2	Gaminio tankis, kg/m^3
	Ilgis	Plotis	aukštis			
B120	250	120	88	20	300	1900

A_{net} – guldymo paviršiaus plotas

3.1.2. Bandymų metodika

Iš viso išbandyti devyni mūro gaminiai. Bandymai atlikti pagal schemą pateiktą 3.1 paveiksle. Deformacijos matuojamos „Almemo“ sistema su 1 % tikslumo elektroniniais poslinkio matuokliais TR025. Plytos bandomos 0,5 tikslumo klasės LFM100kN presu. Mūro gaminių stipris ir tamprumo modulis nustatomas pagal LST EN 771 – 2 standarto reikalavimus, apkraunant plytas statine trumpalaike apkrova. Atlikus bandymus nustatyta, kad silikatinės plytos gniuždomasis stipris $f_{c,b}$, kai plyta gulsčia, lygus $31,8 N/mm^2$ ir $16,37 N/mm^2$, kai plyta gniuždoma statmenai.

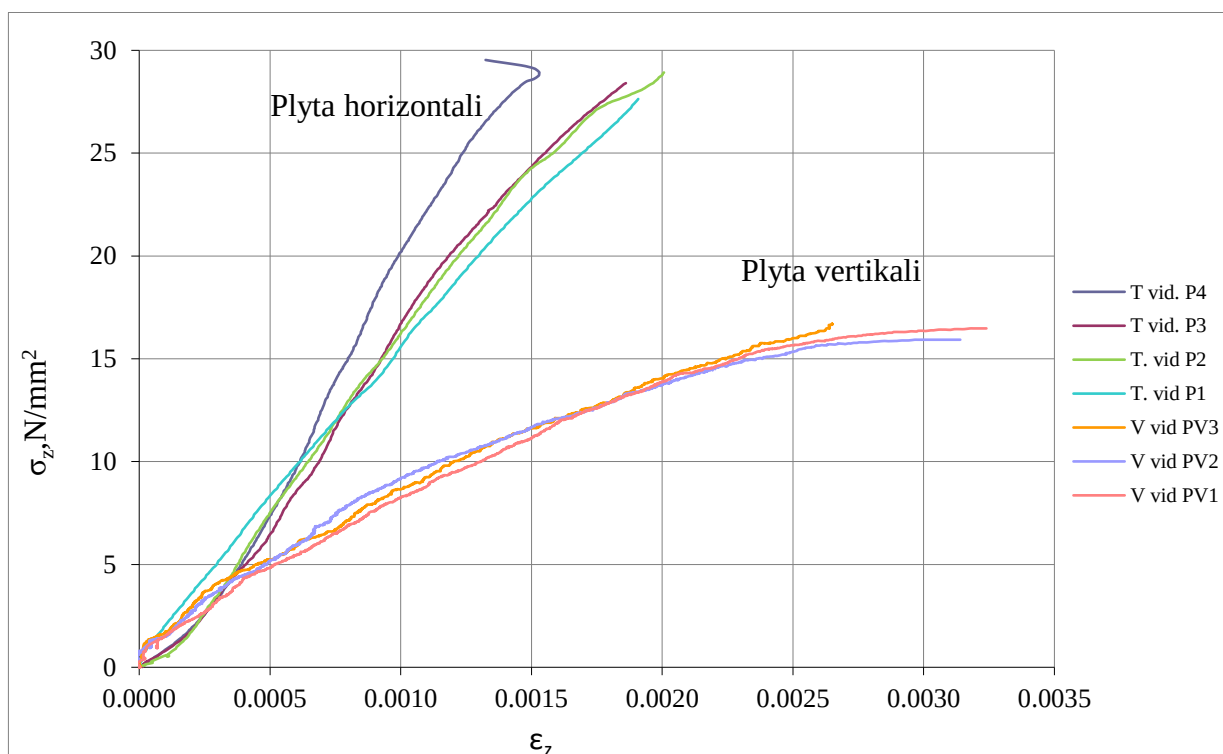


3.1 pav. Mūro gaminių bandymo schema kai plyta vertikali (Šlivinskas 2016)

3.1.3. Bandymų rezultatai

3.2 lentelė. Mūro gaminių tamprumo moduliai kai plyta gulsčia ir statmena (Šlivinskas *et al.*)

Bandymo kryptis	Bandinių skaičius	Plytų tamprumo modulis $E_b \times 10^{-3}$, N/mm^2	Procentinis variacijos koeficientas
Plyta gulsčia	4	15,78	18,7
Plyta statmena	3	9,79	18,2



3.2 pav. Mūro gaminių vidutinės $\sigma - \epsilon$ priklausomybių diagramos (Šlivinskas *et al.* 2016)

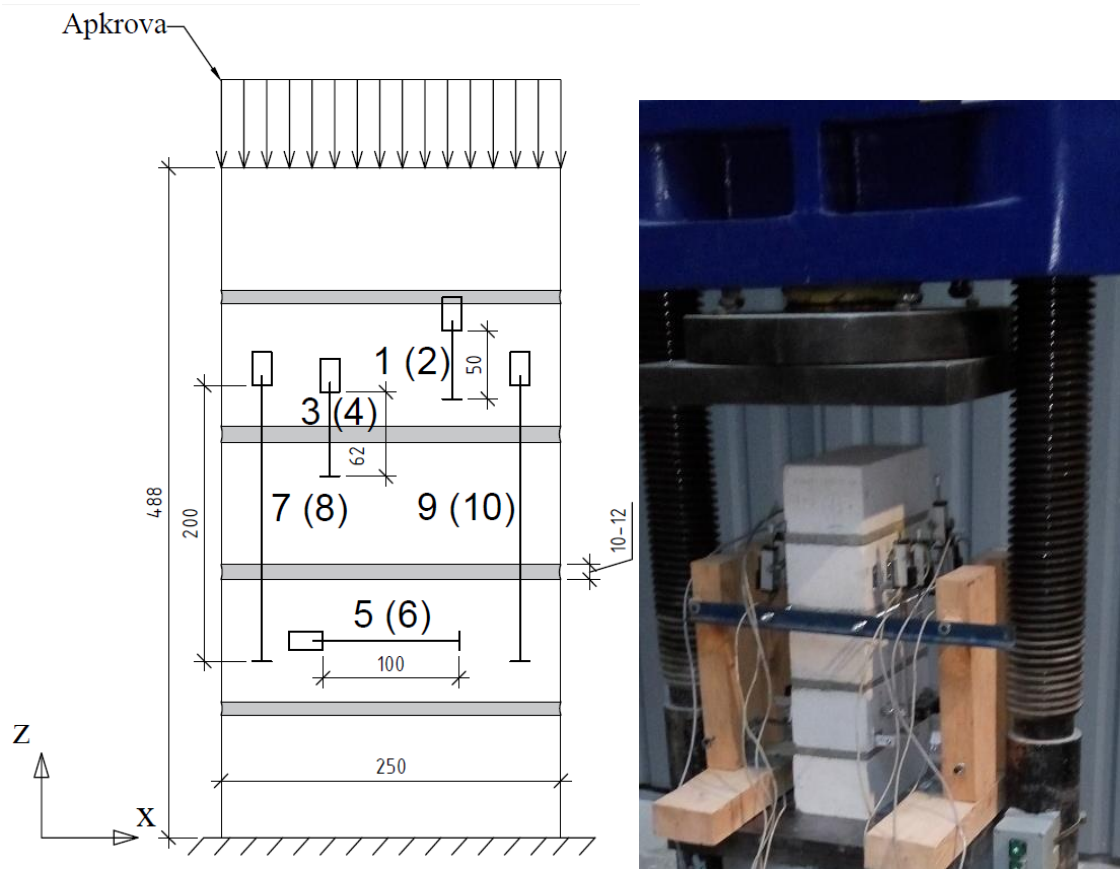
Atlikus plytų tamprumo modulio bandymus nustatyta, kad silikatinės plytos tamprumo modulis $E_{b,obs}$, kai plyta gulsčia, yra 37,9 % didesnis negu gulsčios plytos tamprumo modulis. (3.2 lentelė).

3.2. Mūro mechaninių ir deformacinių savybių nustatymas

3.2.1. Bandiniai ir bandymų metodika

Eksperimentinių mūro tyrimų objektas – silikatinė plytų mūro prizmė. Bandiniai sudaryti iš viena ant kitos sumūrytų plytų, o mūro fragmente nėra stačiosios siūlės. Literatūroje dažnai

pasitaiko tokio tipo mūro bandinių. 1.4 skyriuje apžvelgti kitų autorių atlikti panašūs tyrimai (Pela, *et al.*, 2016; Drougkas *et al.* 2015), kai analizuojamas mūro įtempių ir deformacijų būvis bei įvairių veiksnių įtaka mūro mechaninėms savybėms.



3.3 pav. Mūro fragmento bandymo daviklių išdėstymo schema ir bendras bandymo vaizdas

Mūro fragmentų tyrimai atliekami presu DIG 2000. Bandiniai apkrauti trumpalaikė statine apkrova 0,5k N/s greičiu, kad bandinys suirtų per 15-25 min. Bandymo elektroninių daviklių išdėstymo schema pateikta 3.3 paveiksle. Atliekant bandymą išilginės mūro deformacijos matuojamos 7, 8, 9 ir 10 matuokliais (3.3 pav.). Mūro gaminio deformacijos matuojamos 1 ir 2 davikliais (3.3 pav.), gulsčiosios siūlės 3 ir 4 davikliais (3.3 pav.) ir mūro gaminio skersinės deformacijos matuojamos 5 ir 6 davikliais (3.3 pav.). Eksperimentui pagaminti 6 mūro fragmentai, naudojant trijų skirtingų stiprių bendrosios paskirties 2.1.3 poskyryje aprašytus skiedinius. Gulsčiosios siūlės vidutinis storis h_m yra 12 mm. Šiame skyriuje nagrinėjama skiedinio stiprio įtaka bendram mūro deformacijų būviui ir stipriui. Mūro gniuždomojo stiprio bandymų rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

3.2.2. Bandymų rezultatai

3.3 lentelė. Silikatinių plytų mūro fragmentų tyrimų rezultatai

Serijos nr.	Mūro fragmentas	Vidutinis gulsčiosios siūlės storis h_m , mm	Skiedinio stipris N/mm^2	Mūro gniuždomasis stipris $f_{c,mas}$, N/mm^2	Vidutinis mūro gniuždomasis stipris $f_{c,mas,m}$, N/mm^2
B1/M1	B1.1/M1	11,75	30,53	19,03	17,74
	B1.2/M1	12		16,45	
B2/M2	B2.1/M2	12,5	9,39	15,16	13,00
	B2.2/M2	13		10,85	
B3/M3	B3.1/M3	12,5	17,49	13,78	13,22
	B3.2/M3	12		12,66	

Mūro gniuždomajam stipriui didelę įtaką turi ne tik gulsčiosios siūlės storis, bet ir skiedinio stipris. Vidutinis mūro gniuždomasis stipris, cementinio skiedinio stipriui kintant nuo 9,39 iki 30,53 N/mm^2 , padidėja 26,7 % (žr. 3.3 lentelę).

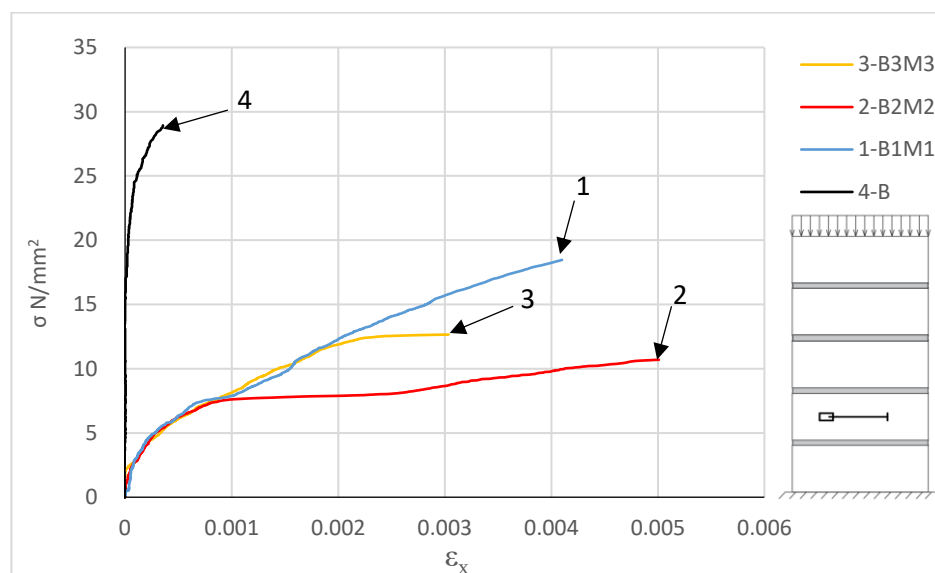


3.4 pav. Mūro fragmentai po suirimo: a) mūro irties pobūdis kai naudojamas skiedinys M1, b), c) mūro irties pobūdis kai naudojamas skiedinys M2

3.4 pav. a) pateiktas mūro fragmentas, pagamintas naudojant stipriausią ir standžiausią cementinį skiedinį M1, kurio nustatytas tamprumo modulis $E_m=16,5$ GPa, ir naudojant mūro gaminius, kurių nustatytas tamprumo modulis $E_b=15,78$ GP. Pagal Halerio modelį (žr. 1.2 pav.)

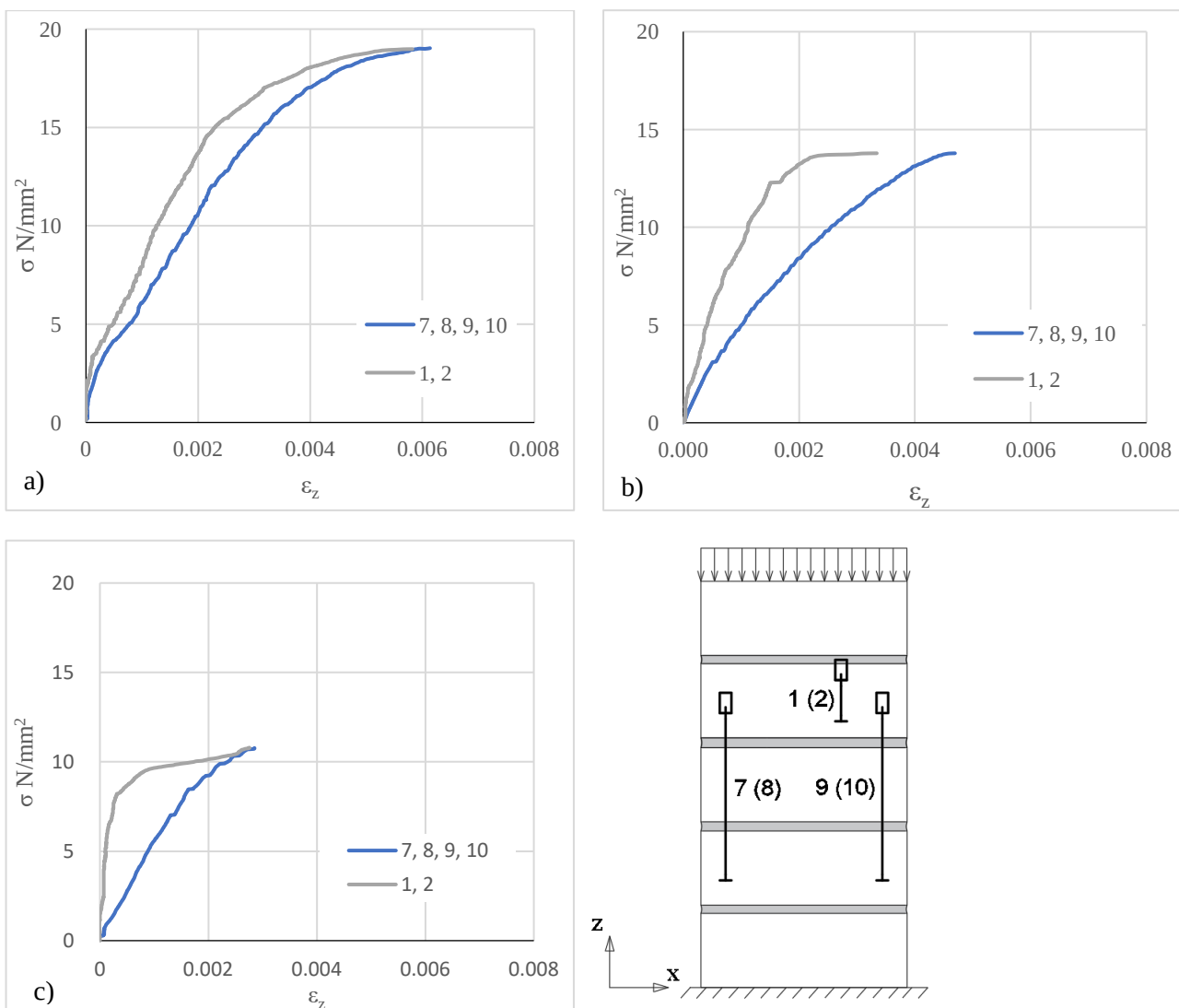
kai $E_m < E_b$ mūro gaminys skersine kryptimi yra tempiamas, o skiedinys gniuždomas. Bandant mūro fragmentą parodytą 3.4 pav. a), kurio $E_m > E_b$ veikė atvirkščias įtempių būvis. Šį teiginį galima patvirtinti ir tiesiogiai, kadangi mūro gaminiai gniuždomi, o ne tempiami, plyšiai mūro fragmente nesiveria, energija nedisipuoja ir mūras suyra nepasiekęs plastinių deformacijų. Prieš pat suirimą, skersai per visą mūro gaminį, atsiveria didelis plyšys ir mūro fragmentas suyra žr. (3.4 pav. a).

3.4 paveiksle b ir c pavaizduotas mūro fragmento irties pobūdis, kai $E_m < E_b$. 3.4 pav. c) matoma, kad plyšiai pradeda vertis ties mūro gaminio viduriu ir plečiasi aukštyn ir žemyn prizmėje, kol mūro fragmentas suyra. Tai patvirtina 1.1 poskyryje aprašytas mūro deformacinis būvis, kai mūras suyra dėl skiedinio sukeltų skersinių deformacijų mūro gaminyje.



3.5 pav. Gniuždomųjų įtempių σ_z ir skersinių deformacijų ϵ_x priklausomybės kai naudojami skirtingi skiediniai 1, 2, 3 kreivės ir atskiro mūro gaminio skersinės deformacijos 4 kreivė

Iš 3.5 paveiksle pateikto grafiko (1,2,3 kreivės) matoma, kad skersinės mūro gaminio deformacijos, bandant mūro fragmentą iki 7 MPa stiprio, kinta visiškai vienodai. Susiglemžus skiediniui ar atsiradus mikroplyšiams, deformacijos x kryptimi pradeda ženkliai didėti ir priklauso nuo skiedinio stiprio. Aiškiai pastebima, kad kuo stipresnis skiedinys, tuo skersinės mūro gaminio deformacijos mažesnės. Bandant atskirai, mūro gaminį ir matuojant skersinių deformacijų priklausomybę, nuo vertikalinių įtempių (žr. 3.5 pav. 4 kreivė), matoma, kad mūro gaminio deformacijos nykstamai mažos, lyginant su plytos skersinėmis deformacijomis mūro fragmente. Taip nutinka dėl to, jog bandant mūro gaminį, preso plokštumos suvaržo mūro gaminio skersines deformacijas.



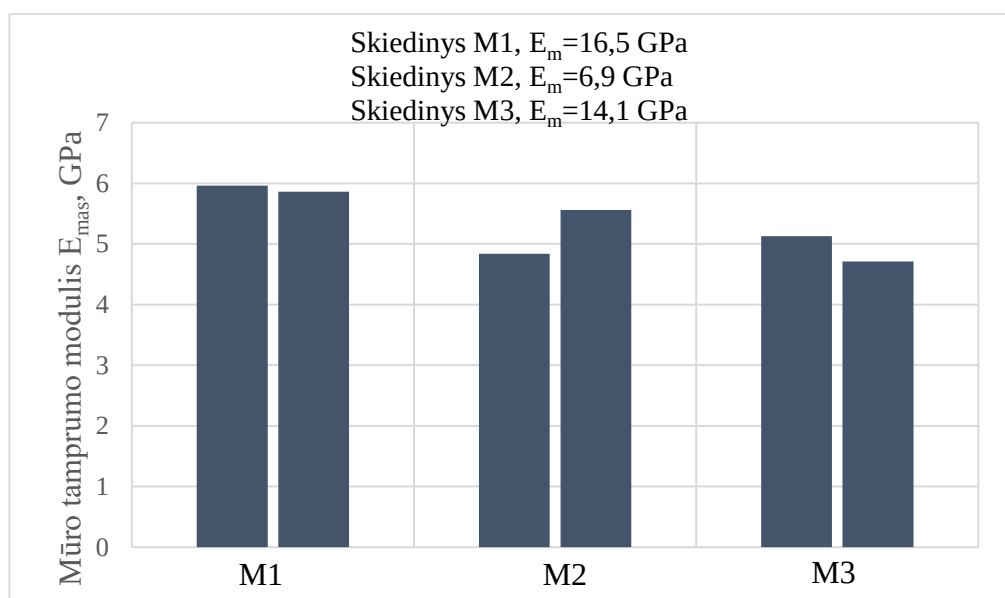
3.6 pav. Mūro fragmento (7-10) ir mūro gaminio (1, 2) įtempių ir deformacijų priklausomybės: a) Mūro fragmentas B1.1M1, b) mūro fragmentas B3.1M3 ir c) mūro fragmentas B2.1M2

Norint teisingai suprojektuoti naujas konstrukcijas ar patikrinti esamų konstrukcijų laikomąją galią, labai svarbu teisingai nustatyti mūro deformacines savybes, kurios priklauso nuo daugelio veiksnių, tokių kaip atskirų mūro komponentų deformacinės savybės ir kontakto zonos tarp jų (Zavalis 2013). 3.6 paveiksle pateiktos įtempių ir deformacijų priklausomybės, kai naudojami skirtingų stiprių skiediniai, iš grafikų matyti, kad mūro fragmentų deformacijos, matuojamos pagal 3.3 paveikslo schemą, beveik nuo pat pradžių kinta netiesiškai (3.6 pav. a ir b). Galimai mūro gaminio ir skiedinio kontakto zonoje, nuo pat bandymo pradžios, vystosi plastinės deformacijos. Tai patvirtina ir mokslininko R. Zavalio (Zavalis 2003) atlikti tyrimai su silikatiniais tuštymėtais blokais. Iš 3.6 paveikslo c) matoma, kad esant silpnam skiediniui (9,39 MPa), bandymo pradžioje mūro gaminio ir mūro deformacijos, po pirminio skiedinio susiglemžimo,

aprašyto 1.1 skyriuje, kinta pagal tiesinį dėsnį, o tik atsiradus plyšiams, pradeda veikti plastinės deformacijos ir bandinys suyra.

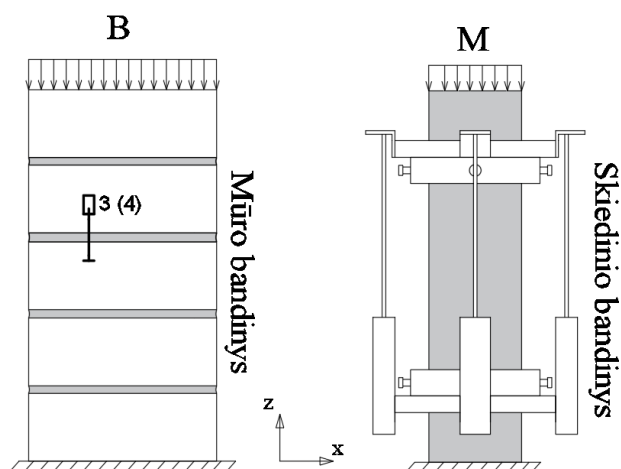
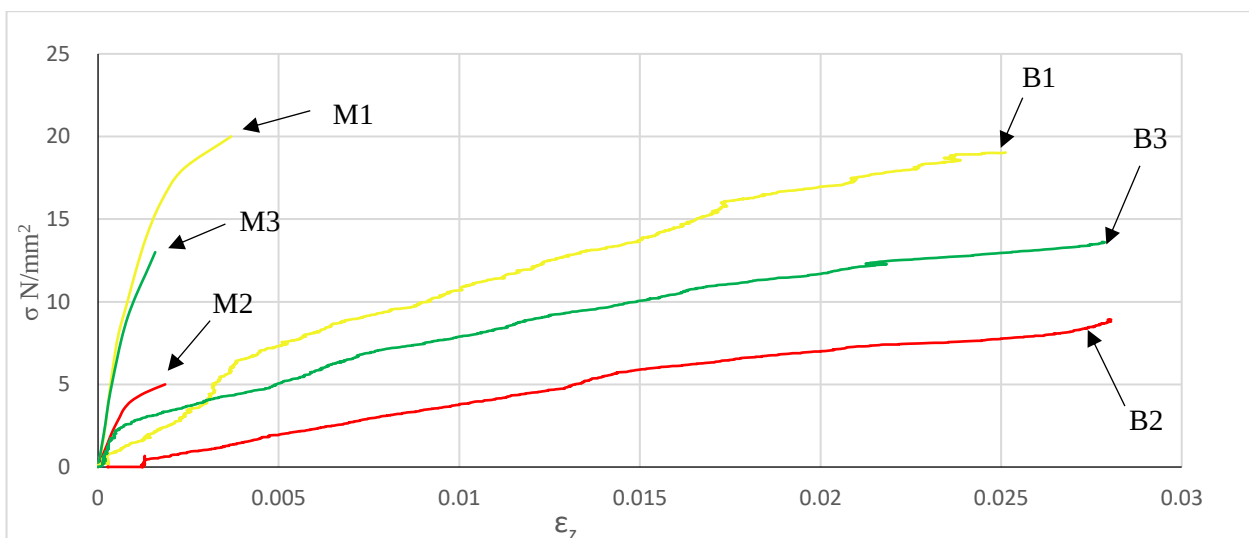
3.4 lentelė. Mūro fragmentų tamprumo modulio rezultatų suvestinė

Serijos Nr.	Mūro fragmentas	Vidutinis gulsčiosios siūlės storis h_m , mm	Skiedinio tamprumo modulio GPa	Mūro tamprumo modulio E_{mas} , GPa	Vidutinis mūro tamprumo modulio E_{mas} , GPa
B1/M1	B1.1/M1	11,75	16,5	5,96	5,91
	B1.2/M1	12		5,86	
B2/M2	B2.1/M2	12,5	6,9	4,84	5,20
	B2.2/M2	13		5,56	
B3/M3	B3.1/M3	12,5	14,1	5,13	4,92
	B3.2/M3	12		4,71	



3.7 pav. Pilnavidurių silikatinių plytų fragmentų tamprumo modulio kitimas kai keičiamas skiedinio stipris

Atlikus mūro bandymus gauta, kad mūro prizmių B1.1/M1 ir B1.2/M1 tamprumo modulio E_{mas} naudojant cementinį skiedinį M1 yra 15 % mažesnis negu mūro prizmių su cementiniu skiediniu M2 (3.4 lentelė). Mūro fragmentų su mišrios sudėties skiediniu (M3) deformacinės savybės negali būti lyginamos su mūro savybėmis, kuriame naudojamas cementinis skiedinys M1 ir M2.



3.8 pav. Skiedinio kontrolinių bandinių (M) ir gulsčiosios siūlės (B) įtempių bei deformacijų priklausomybės

3.8 paveiksle palygintos gulsčiosios siūlės ir skiedinio kontrolinių bandinių deformacijos. Iš bandymų rezultatų matoma, kad deformacijos nustatytos, kai įtempiai sudaro $0,33\sigma_{amx}$, yra iki 14 kartų didesnės už skiedinio kontrolinių bandinių deformacijas. Mokslininko R. Zavalio (Zavalis 2013) atlikti silikatinų tuštymėtų blokų bandymai parodo iki 10 kartų didesnę skirtumą tarp šių deformacijų.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Eksperimentais nustatyta kad:

1. Mūro fragmentų su bendrosios paskirties cementiniu skiediniu, kai (gulsčiosios siūlės storis 11-12mm), gniuždomasis stipris padidinus skiedinio stiprį f_m nuo 9,39 MPa (M2) iki 30,53 MPa (M1) padidėja 27 %.
2. Gulsčiosios siūlės skiedinio išilginės deformacijos, kai gniuždomieji įtempiai sudaro 33% maksimalių įtempių, yra iki 14 kartų didesnės už skiedinio kontrolinių bandinių santykinės deformacijas.
3. Skiedinio gniuždomasis stipris f_m neturi didelės įtakos mūro tamprumo moduliui E_{mas} . Skiedinio stipriui padidėjus nuo 9,39 MPa (M2) iki 30,53 MPa (M1), mūro tamprumo modulis padidėja 12 %.

4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ BEI TEORINIŲ METODŲ VERTINIMAS

4.1. Silikatinių pilnavidurių plytų mūro gniuždomojo stiprio skaičiavimas pagal EC6.

Pagal atliktus mūro konstrukcijų bandymus matoma, kad mūro stipris priklauso nuo daugelio įvairių veiksnių, todėl nėra lengva užrašyti visiems atvejams tinkamą matematinę išraišką, norint įvertinti visus veiksnius darančius įtaką mūro stipriui. Mūro gniuždomajam stipriui apskaičiuoti dažniausiai taikomos empirinės priklausomybės ir įvairūs koeficientai skiedinio ir mūro gaminio savybėms, tokioms kaip tuštymėtumui, medžiagų tipui, konstrukciniam sprendinių tipui, skiedinio siūlės storio įtakai įvertinti. (Zavalis 2013)

Bendruoju atveju mūro charakteristinis gniuždomasis stipris aprašomas tokia funkcija (Zavalis 2013):

$$f_f = F(f_{c,b}, f_{c,m}, h_m, K), \quad (4.1)$$

čia

K – empirinis koeficientas, įvertinantis mūro gaminių tipą, tuštymėtumą ir medžiagos tipą;

$f_{c,b}$ ir $f_{c,m}$ – mūro gaminių ir skiedinio gniuždomieji stipriai;

h_m – gulsčiosios siūlės storis.

$$f_{k,obs} \leq \begin{cases} f_{vid}/1,2 \\ f_{min} \end{cases}, \quad (4.2)$$

čia:

f_{vid} – vidutinis mūro fragmento gniuždomasis stipris;

f_{min} – atskiro bandinio mažiausioji gniuždomojo stiprio reikšmė.

EN1996-1-1 (EC6) 3.6.1.2 (i) poskyris teigia, kad remiantis EN 1052-1 normomis, pagal kurias galima atlikti bandymus ir taip nustatyti mūro charakteringąjį stiprį pagal formulę (4.2). Šis metodas reikalauja daug medžiagų sąnaudų ir laiko, todėl, kai tam tikro konstrukcinio sprendinio mūras naudojamas ilgą laiką bei jo mechaninės ir deformacinės savybės žinomos, mūro charakteristinį stiprį f_k galima apskaičiuoti pagal EC6 pateiktą formulę, kurios išraiška yra tokia:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta, \quad (4.3)$$

čia

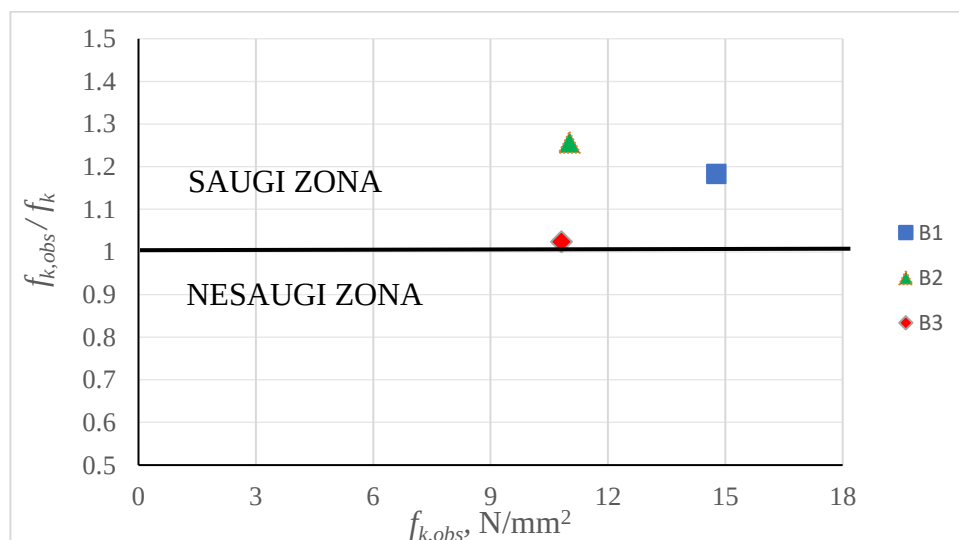
K – koeficientas įvertinantis anksčiau minėtus veiksnius (4.1),

α ir β – empiriniai laipsnio rodikliai, kuriais įvertinamas skiedinio tipas ir gulsčiųjų siūlių storis, reikšmės pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Koeficientų α ir β reikšmės

Skiedinio tipas	Reikšmė
Bendrosios paskirties skiedinys	$\alpha = 0,7$ ir $\beta = 0,3$
Lengvasis skiedinys	$\alpha = 0,7$ ir $\beta = 0,3$
Mūras su plonasluoksnio skiedinio gulsčiosiomis siūlėmis ($h_m \leq 3 \text{ mm}$) silikatiniams, betoniniams su užpildais, autoklaviniams, aktytojo betono gaminiams bei 1 ir 4 grupės keraminiams mūro gaminiams	$\alpha = 0,85$ ir $\beta = 0$
Mūras su plonasluoksnio skiedinio gulsčiosiomis siūlėmis ($h_m \leq 3 \text{ mm}$) 2 ir 3 grupės keraminiams mūro gaminiams	$\alpha = 0,7$ ir $\beta = 0$

Lygtis (4.3) (EC6) yra empirinė, išvesta remiantis eksperimentiniais tyrimais. Naudojant naujus konstrukcinių sprendinių mūro gaminius ar naujas medžiagas priklausomybė (4.3) ne visais atvejais tinkamai įvertina mūro gniuždomąjį stiprį (Zavalis 2013). Mūro charakteristinė gniuždomojo stiprio reikšmė f_k apskaičiuota pagal (4.3) lygtį, dažnai viršija eksperimentiniais bandymais nustatytas mūro charakteristines gniuždomojo stiprio reikšmes $f_{k,obs}$.



4.1 pav. Eksperimentinės ir teorinės charakteristinės mūro stiprio santykio $f_{k,obs}/f_k$ priklausomybės nuo eksperimentinės mūro charakteristinės reikšmės $f_{k,obs}$

Naudojant (4.2) formulę nustatytas pilnavidurių silikatinių plytų charakteristinis stipris $f_{k,obs}$, lyginamas su charakteristinėmis gniuždomojo stiprio reikšmėmis f_k apskaičiuotomis pagal (4.3) lygtį. Charakteristinio gniuždomojo mūro stiprio $f_{k,obs}$, nustatyto eksperimentiškai, reikšmių santykis su apskaičiuotu stipriu f_k pateikas 4.1paveiksle. Mūro stiprio analizė parodė, kad naudojant pilnavidures silikatines plytas eksperimentiškai nustatytos mūro gniuždomojo stiprio reikšmės yra nuo 2,3 iki 20,4 % didesnės už apskaičiuotas pagal EC6 (4.3) formulę.

4.2. Deformacinių mūro savybių vertinimas

4.2.1. Analitinis deformacinių mūro savybių vertinimas

Mūro tamprumo modulis yra svarbiausia charakteristika, norint teisingai įvertinti mūro deformacines savybes ir mūro poveikį kitoms konstrukcijoms. Mūro tamprumo modulį galima apskaičiuoti taikant sluoksniuotų konstrukcijų teoriją, literatūroje autorių (Grambarotta 2005; Francis *et al.* 1971, Jonaitis *et al.* 2001) (4.6,(4.7) pateiktos tokios skaičiavimo išraiškų priklausomybės:

$$E_{mas,cal} = \frac{1}{2} \left(E_b \frac{h_b}{h_{sum}} + E_m \frac{h_m}{h_{sum}} + \frac{E_b E_m}{E_m \frac{h_b}{h_{sum}} + E_b \frac{h_m}{h_{sum}}} \right), \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{E_{mas,cal}} = \frac{\eta_b}{E_b} + \frac{\eta_m}{E_m} + 2 \eta_b \eta_m \cdot \frac{v_b E_m - v_m E_b}{\eta_m (1 - v_b) E_m + \eta_b (1 - v) E_b} \left(\frac{v_m}{E_m^2} - \frac{v_b}{E_b^2} \right), \quad (4.5)$$

čia $E_{mas,cal}$ – apskaičiuotas mūro tamprumo modulis; η_b ir η_m – mūro gaminio aukščio ir gulsčiosios skiedinio siūlės storio santykiai; v_m ir v_b skiedinio ir mūro gaminio Puasono koeficientai.

Skaičiuojant pagal (4.4 ir 4.5) formules vertinamos mūro komponentų deformacinės savybės: gulsčiosios siūlės storis, mūro gaminio aukštis ir bendra mūro komponentų, kaip kompozitinės medžiagos įtaka mūro tamprumo moduliui. Skirtingai negu kitų autorių pasiūlytas mūro tamprumo skaičiavimo būdas, (4.5) formulė įvertina mūro komponentų Puasono koeficiento įtaką.

Tamprumo moduliui skaičiuoti pateikiamos empirinės priklausomybės, dažniausiai išvestos remiantis tyrimų rezultatais. Autorių Ciesielski, Matyesk ir Brooks mūro tamprumo moduliui skaičiuoti priklausomybės pateiktos formulėse (4.6; 4.7; 4.8).

$$E_{mas,cal} = \frac{1,20 E_b E_m}{0,2 E_b + E_m}, \quad (4.6)$$

$$E_{mas,cal} = \frac{1,25 \xi + 1}{1,25 \xi E_b + \beta} E_b, \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{E_{mas,cal}} = \frac{0,86}{E_b} + \frac{0,14}{E_m} \quad (4.8)$$

čia E_b – mūro gaminio tamprumo modulis, E_m – skiedinio tamprumo modulis, ξ – mūro gaminio aukščio h_b ir skiedinio siūlės storio h_m santykis, β – mūro gaminio skiedinio tamprumo modulių santykis.

Analizuojant pilnavidurių plytų mūrą su bendrosios paskirties skiediniu Kuczma, Wybranowska 2005 palygino, pagal (4.6; 4.8) formules analitiškai gautų tamprumo modulių reikšmes, su reikšmėmis, gautomis skaitinio modeliavimo būdu, gautos reikšmės skyrėsi nedaug.

Visos aptartos mūro tamprumo modulio skaičiavimo formulės (4.4 – 4.8) vertina mūro komponentų mechanines savybes, nustatytas bandant kontrolinius skiedinio bandinius. Mūro gaminio deformacinės savybės, kai gaminyje mūro konstrukcijoje ir atskiras, keičiasi nedaug, o skiedinio savybės esančio mūre ir kontrolinių bandinių, kaip parodė tyrimai (Zavalis 2013, Lourenco 2006) gali skirtis iki 14 kartų, todėl norint apskaičiuoti tikrąsias mūro deformacines savybes reikia įvertinti gulsčiosios siūlės esančios mūre tikrąjį tamprumo modulį.

Marčiukaitis et al. (2004) pateikė tamprumo modulio priklausomybę kuri įvertina skiedinio siūlės efektyvųjį tamprumo modulį $E_{m,eff}$ (4.9).

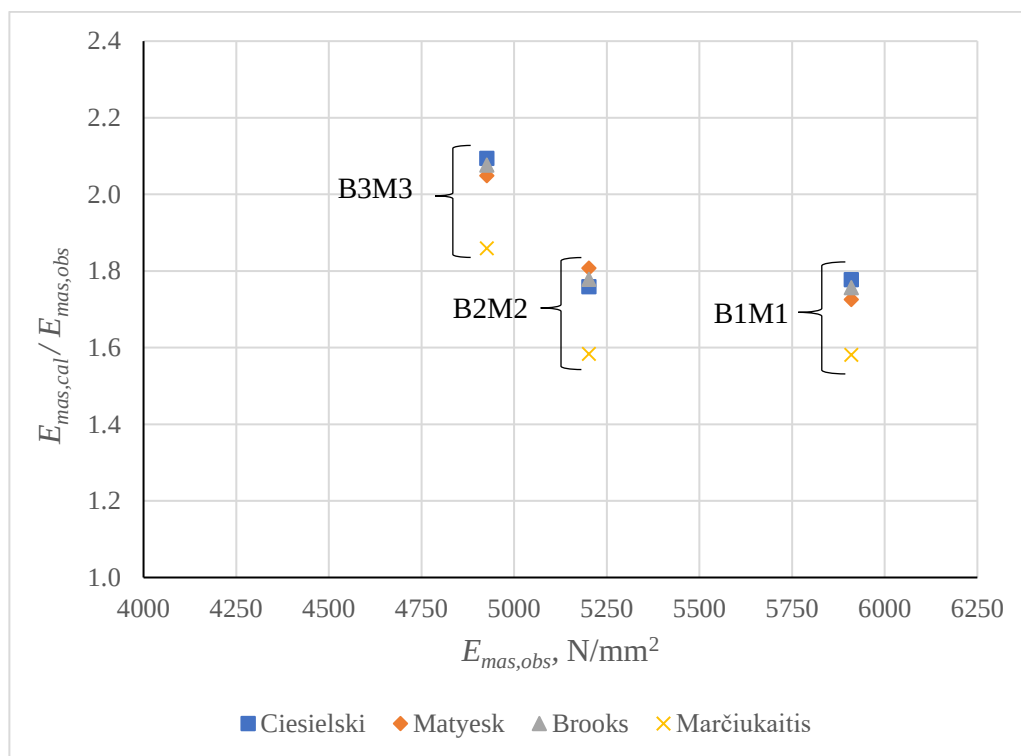
$$E_{mas,cal} = \frac{1}{2} \left(E_b \frac{h_b}{h_{sum}} + E_{m,eff} \frac{h_m}{h_{sum}} + \frac{E_b E_{m,eff}}{E_{m,eff} \frac{h_b}{h_{sum}} + E_b \frac{h_m}{h_{sum}}} \right), \quad (4.9)$$

Efektyvusis tamprumo modulis $E_{m,eff}$ įvertina sąlyčio zonos tarp mūro gaminio ir skiedinio poveikį (Marčiukaitis 2004). Efektyvusis skiedinio siūlės tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal (4.10) priklausomybę.

$$E_{m,eff} = \frac{h_m - 2a}{2h_m} \quad (4.10)$$

čia a – sąlyčio zonos tarp skiedinio ir mūro gaminio dydis; E_m – skiedinio tamprumo modulis nustatytas bandant standartinius bandinius. Sąlyčio zonos dydį rekomenduojama apskaičiuoti pagal formulę

$$a = 0,33 \cdot h_m^{0,5} \quad (4.11)$$



4.2 pav. Eksperimentinių ir teorinių, apskaičiuotų pagal 4.6 – 4.9 formules, mūro tamprumo modulio reikšmių palyginimas

Iš 4.2 paveikslo matoma, kad pagal (4.6) formules apskaičiuoto ir nustatyto tamprumo modulio santykis $E_{mas,cal}/E_{mas,obs}$ kinta nuo 1.7 iki 2.1, tai reiškia, kad šios skaičiavimų metodikos pervertina mūro tamprumo modulį. Apskaičiuotosios mūro tamprumo modulio reikšmės $E_{mas,cal}$, eksperimentais nustatytas reikšmės $E_{mas,obs}$ viršija iki 100 procentų. Taip yra todėl, kad skaičiuojant šiais metodais neįvertinamos tikrosios gulsčiosios siūlės deformacinės savybės. Pagal G. Marčiukaičio pasiūlytą mūro tamprumo modulio metodiką (4.9), apskaičiuoto analitiškai ir nustatyto eksperimentiškai tamprumo modulio santykis yra vidutiniškai 8,3 - 12,4 % mažesnis negu skaičiuojant pagal 4.7 ir 4.8 formules. Taip yra todėl, nes pagal G. Marčiukaičio pateiktą metodiką įvertinamas sąlyčio zonos tarp mūro gaminio ir skiedinio poveikis.

4.2.2. Analitinis gulsčiosios skiedinio siūlės deformacinių savybių vertinimas

Gulsčiosios siūlės tamprumo modulis bandant mūro fragmentus gali būti apskaičiuojamas iš bendrosios mūro deformacijos atimant mūro gaminio deformaciją. Bendra mūro deformacija susideda iš mūro gaminio deformacijos ir skiedinio siūlės deformacijų (žr. 4.3 pav.):

$$\Delta h'_{sum} = \Delta h'_b + \Delta h_m, \quad (4.12)$$

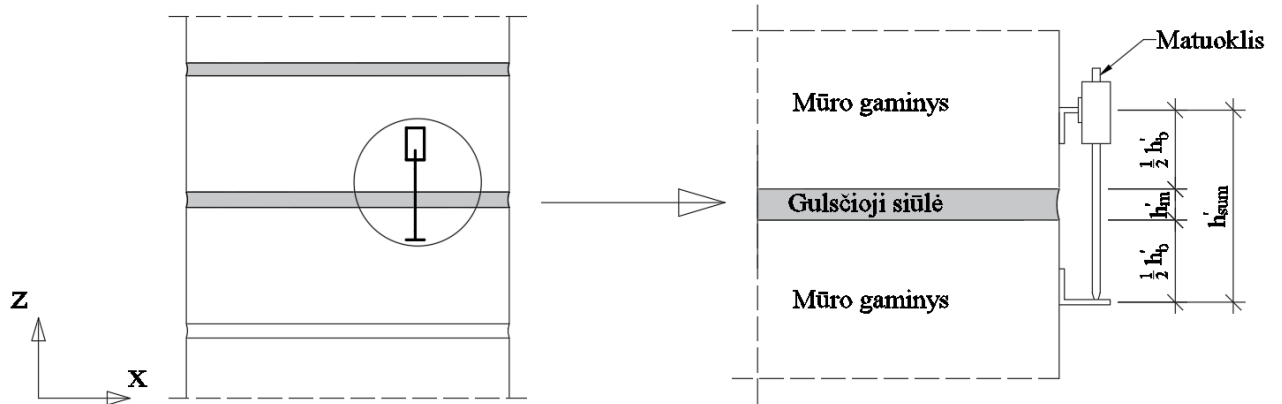
čia

$\Delta h'_{sum}$ - vertikalioji mūro deformacija;

$\Delta h'_b$ – į gulsčiosios skiedinio siūlės deformacijų matavimų bazę patenkančio mūro gaminio dalies deformacija;

Δh_m – gulsčiosios skiedinio siūlės vertikalioji deformacija.

Vertikalūs gniuždomieji įtempiai skiedinio ir mūro kontakto zonoje perduodami netolygiai, dėl skiedinio siūlės nelygumų ir nevienodų zonų kuriose susidaro įtempių koncentracijos. Gulsčiosios siūlės skiedinio sąlyčio zonoje susidaro pereinamasis sluoksnis, o šios zonos savybės skiriasi nuo siūlės vidurinių sluoksnių savybių (Zavalis 2013) (žr. 4.4 pav.).



4.3 pav. Skiedinio siūlės apibendrinto tamprumo modulio nustatymo schema

Nėra metodikos, kaip nustatyti sąlyčio zonos ir skiedinio, esančio siūlėje, deformacijas. Todėl dažniausiai (Vermeltfoort 2005; Lourenco 2006) taikomos vidutinės skiedinio siūlės vertikaliosios deformacijos Δh_m , šios deformacijos susideda iš skiedinio $\Delta h'_m$ ir mūro gaminių sąlyčio zonų $\Delta h_{m,con}$ deformacijos:

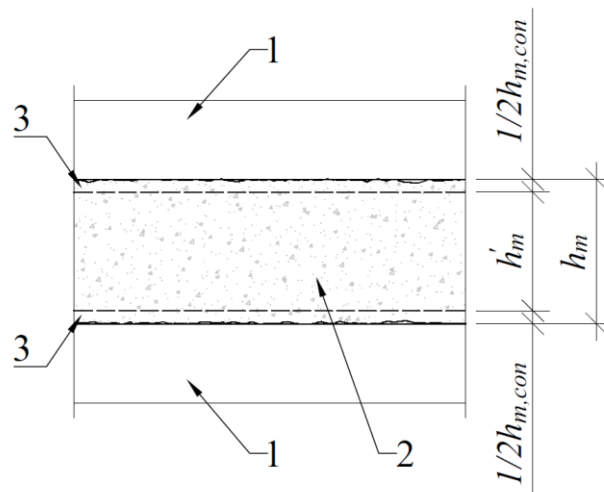
$$\Delta h_m = \Delta h'_m + \Delta h_{m,con}. \quad (4.13)$$

Pertvarkius formulę (4.13) ir taikant Huko dėsnį, galima išreikšti apibendrintą gulsčiosios skiedinio siūlės tamprumo modulį $E_{m,s,obs}$ (Zavalis 2013):

$$E_{m,s,obs} = \frac{h_m E'_{mas} E'_b}{E'_b (h_m + h'_b) - E'_{mas} h'_b} \quad (4.14)$$

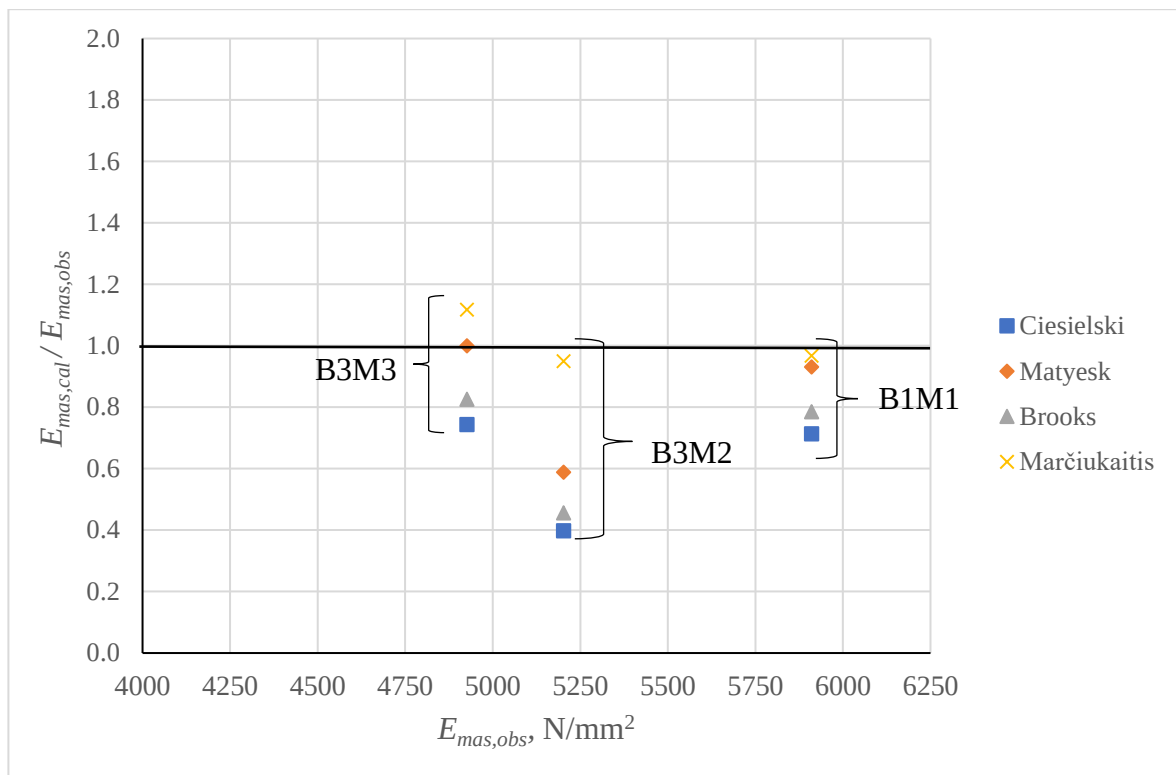
čia E'_{mas} - mūro, matuojant išilgines deformacijas ruože $h'_{m,sum}$ pagal 4.4 paveiksle (3.2.1 skyrelis, 3.3 pav., 3,4 jutikliai) pateiktą schema tamprumo modulis, h'_b - į deformacijų matavimo zoną patenkančio mūro gaminio dalis (žr. 4.4 pav.), E'_b - į matavimų bazę patenkančio mūro gaminio dalies tamprumo modulis.

Pagal (4.14) gaunamas apibendrintas gulsčiosios siūlės tamprumo modulis, kuris įvertina kontakto zonos ir skiedinio savybių pokyčio poveikį bendroms mūro deformacijoms (Zavalis 2013).



4.4 pav. Mūro gaminių ir skiedinio sąlyčio zonos schema: 1) mūro gaminys; 2) skiedinio sluoksnis; 3) sąlyčio zona (Zavalis 2013)

Pagal (4.14) formulę apskaičiuotos skiedinio gulsčiosios siūlės apibendrinto tamprumo modulio $E_{m,s,obs}$, reikšmės įstatytos į 4.6 – 4.9 formules ir gautas apskaičiuoto ir nustatyto tamprumo modulio santykis $E_{mas,cal}/E_{mas,obs}$. Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.5 pav.



4.5 pav. Eksperimentinių ir teorinių, apskaičiuotų pagal 4.6 – 4.9 formules, mūro tamprumo modulio reikšmių palyginimas, įvertinus apibendrintą skiedinio siūlės tamprumo modulį

Paveiksle 4.5 pateiktas apskaičiuoto ir eksperimentiškai išmatuoto tamprumo modulių santykis $E_{mas,cal}/E_{mas,obs}$, pagal Ciesielski, Matyesk ir Brooks metodikas (4.6 – 4.9 formules), kinta nuo 0,40 iki 1,02. Šios reikšmės yra nuo 3,8 iki 1,6 karto mažesnės lyginant su $E_{mas,cal}/E_{mas,obs}$ santykiais pateiktais 4.2 paveiksle, tai reiškia, kad įvertinus gulsčiosios siūlės tikrąsias deformacines savybes, mūro tamprumo modulio skaičiavimo metodikos, (žr. 4.6 – 4.9 formules) pateikia tikslesnius rezultatus.

4.2.3. Silikatinų pilnavidurių plytų mūro tamprumo modulio skaičiavimo pagal EC6 vertinimas

Visus aukščiau aprašytus mūro tamprumo modulio skaičiavimo metodus taikyti praktikoje yra sudėtinga, todėl praktikoje taikomi supaprastinti mūro tamprumo modulio skaičiavimo metodai. EC6 pateikia mūro tamprumo modulio skaičiavimo priklausomybę, tamprumo modulį išreiškiant mūro stiprio f_k ir mūro tamprumo koeficientu K_E , kurio rekomenduojama reikšmė pagal EC6 yra 1000. Tamprumo modulio koeficientas K_E rodo, kiek kartų mūro tamprumo modulis yra didesnis už mūro stiprį f_k . Pagal EC6 mūro tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal

$$E_{mas,cal} = K_E \cdot f_k \quad (4.15)$$

Pagal eksperimentiškai gautus mūro su bendrosios paskirties skiediniu gniuždomuosius stiprius galima apskaičiuoti tamprumo modulio charakteristikas K_E .

4.2 lentelė. Mūro tamprumo modulio charakteristikos K_E rezultatai

Serijos Nr.	Vidutinis mūro gniuždomasis stipris $f_{c,mas,m}$, N/mm ²	Vidutinis mūro tamprumo modulis E_{mas} , GPa	Tamprumo modulio charakteristikas K_E
B1/M1	17,74	5,91	334
B2/M2	13,00	5,20	400
B3/M3	13,22	4,92	373

Pagal bandymų rezultatus, matoma, kad EC6 rekomenduojama tamprumo modulio charakteristikos reikšmė, kuri lygi 1000, daugiau kaip 2 kartus pervertina mūro tamprumo modulį. Norint sužinoti tikslesnes mūro tamprumo modulio charakteristikų reikšmes pilnavidurių silikatinių plytų mūrai, reikia atlikti daugiau bandymų.

4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Pilnavidurių silikatinių plytų mūro gniuždomasis stipris nustatytas eksperimentais yra nuo 2,3 iki 20,4 % didesnis už apskaičiuotą pagal EC6 metodiką.

2. Atlikus mūro fragmentų iš pilnavidurių silikatinių plytų eksperimentinius bandymus nustatyta, kad apibendrintas gulsčiosios siūlės tamprumo modulis yra 10 - 14 kartų mažesnis už skiedinio tamprumo modulį nustatytą bandant kontrolinius bandinius. Todėl analitiniais metodais apskaičiuojant mūro tamprumo modulį būtina atsižvelgti į tikrąsias gulsčiosios siūlės deformacines savybes.

3. Silikatinių pilnavidurių plytų mūro tamprumo modulis nustatytas eksperimentais yra iki 3 kartus mažesnis už apskaičiuotą pagal EC6 metodiką. Todėl projektuojant pilnavidurių silikatinių plytų mūro konstrukcijas pagal EC6 metodiką rekomenduojama mūro tamprumo charakteristiką priimti lygią 400.

5. BENDROSIOŠ IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad gulsčiosios siūlės mechaninės ir deformacinės savybės turi didelę įtaką mūro mechaninėms savybėms. Gulsčiosios siūlės poveikis mūro mechaninėms savybėms priklauso nuo mūro gaminio kapiliarinių įgerties savybių, mūro gaminio formos, tuštymėtumo. Literatūroje nėra pakankamai eksperimentinių duomenų apie silikatinų pilnavidurių plytų mūro elgseną.

2. Mūrijimo skiedinio gulsčiųjų siūlių savybės turi didelę įtaką ne tik mechaninėms mūro savybėms, bet ir mūro elgsenai. Dėl nevienodos cemento hidratacijos gulsčiojoje siūlėje, skiedinio sąlytyje su mūro gaminiu, susidaro skirtingo standumo ir sukibties zonos.

3. Literatūroje pateikta daug bandymų rezultatų, kurie įrodo, kad gulsčiosios siūlės deformacijos ženkliai skiriasi nuo tokio pat storio sluoksnio skiedinio deformacijų. Tačiau literatūroje nėra pakankamai duomenų, kurie leistų nustatyti skiedinio siūlėje savybes, įvertinant kontakto zonos įtaką.

4. Per valandą kietėjant skiediniui, dėl kapiliarinių savybių, mūro gaminys įgeria nuo 35 iki 60 % vandens atitinkamai iš cementinio skiedinio M1 ir M2. Po valandos vandens įgerties gylis mūro gaminyje siekia 11 - 20 mm. Dėl vandens įgerties C/V santykis cemento smėlio skiedinyje M1 ir M2 sumažėja atitinkamai 1,5 ir 2,6 karto, o cemento kalkių smėlio skiedinyje (M3) - 2,3 karto lyginant su pradiniu C/V santykiu.

5. Dėl nevienodų kietėjimo sąlygų, skiedinio gniuždomasis stipris gulsčiojoje siūlėje pasiskirstęs nevienodai. Skiedinio gniuždomasis stipris $f_{m,pl}$, gulsčiosios siūlės ploto vidurinėje dalyje yra nuo 5 % iki 20 % didesnis už gniuždomąjį stiprį kraštiniuose sluoksniuose.

6. Mūro fragmentų su bendrosios paskirties cementiniu skiediniu, kai (gulsčiosios siūlės storis 11-12mm), gniuždomasis stipris padidinus skiedinio stiprį f_m nuo 9,39 MPa (M2) iki 30,53 MPa (M1) padidėja 27 %.

7. Gulsčiosios siūlės skiedinio išilginės deformacijos, kai gniuždomieji įtempiai sudaro 33% maksimalių įtempių, yra iki 14 kartų didesnės už skiedinio kontrolinių bandinių santykinės deformacijas.

8. Skiedinio gniuždomasis stipris f_m neturi didelės įtakos mūro tamprumo moduliui E_{mas} . Skiedinio stipriui padidėjus nuo 9,39 MPa (M2) iki 30,53 MPa (M1), mūro tamprumo modulis padidėja 12 %.

9. Pilnavidurių silikatinių plytų mūro gniuždomasis stipris nustatytas eksperimentais yra nuo 2,3 iki 20,4 % didesnis už apskaičiuotą pagal EC6 metodiką.

10. Atlikus mūro fragmentų iš pilnavidurių silikatinių plytų eksperimentinius bandymus nustatyta, kad apibendrintas gulsčiosios siūlės tamprumo modulis yra 10 - 14 kartų mažesnis už skiedinio tamprumo modulį nustatytą bandant kontrolinius bandinius. Todėl analitiniais metodais apskaičiuojant mūro tamprumo modulį būtina atsižvelgti į tikrąsias gulsčiosios siūlės deformacines savybes.

11. Silikatinių pilnavidurių plytų mūro tamprumo modulis nustatytas eksperimentais yra iki 3 kartus mažesnis už apskaičiuotą pagal EC6 metodiką. Todėl projektuojant pilnavidurių silikatinių plytų mūro konstrukcijas pagal EC6 metodiką rekomenduojama mūro tamprumo charakteristiką priimti lygią 400.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

- Anson, M. 1964. An investigation into hypothetical deformation and failure mechanism for concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 16, nr. 47, 73-82p.
- Balen, K. Van. 1991. Karbonatatie van Kalkmortel en haar invloed of historishe structuren, Thesis, Kath. Univ. Leuven, 1991.
- Chahine, G. N. 1989. *Behaviour characteristics of face shell mortared block masonry under axial compression*: Master Thesis, McMaster University. Prieiga per internetą: <<http://digitalcommons.mcmaster.ca/opendissertations>>
- Ciesielski, R. 1999. O dynamicznych modułach sprężystości murów z cegły, in XLV *Konferencja Naukowa Wrocław – Krynica*, Krynica: 117–124.
- Drougkas A., Roca P., Molins C. 2015. Compressive strength and elasticity of pure lime mortar masonry, *Materials and Structures* (2016).
- Francis, A., Horman, C., Jerem, L. 1971. The effect of joint thickness and other factors on compressive strength of brickwork, in 2nd *Int. Brick Masonry Conference*. British Ceramic Research Association: 31-37.
- Hobbs, B., 1991. Development of a construction quality control procedure using ultrasonic testing, 9th *IBMaC, Berlin*, 636 – 644.
- Galatiltis E. 2017. Magistro darbas. *Mūrijimo skiedinio gulsčiojoje siūlėje mechaninių savybių analizė*, VGTU.
- Groot, C.J.W.P., 1993. *Effects of water on mortar-brick bond*, PhD Thesis, Delft.
- Hendry, A.W., Sinha, B.P. and Davies, S.R., 1987. *Load Bearing Brickwork design, 2nd. Edition*, Ellis Horwood Ltd, ISBN 0740183.
- Hilsdorf, H. 1969. An investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in uniaxial compression. Designing, in *Designing, Engineering and Construction with Masonry products*. Houston: FB Jonhson.
- Huster, U. 2000. *Tragverhalten von Einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung: Entwicklung und anwendung eines Finite-Elemente*: PhD thesis. Universitat Gesamthochschule Kassel. Prieiga per internetą <<http://www.uni-kassel.de>>
- Jonaitis, B., Marčiukaitis, G., Papingis, V., Valivonis, J. 2001. *Mūro iš tuštymėtų blokelių konstrukcinių savybių ypatumai ir jų įvertinimas*, *Civil Engineering* 7(5):386-390p.
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., Jain, S. K. 2007. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9): 728-739p.

Kubica, Jan; Mojsilovic, Nebojša, 2012. Masonry under compression and shear, *15th International Brick and Block Masonry Conference*.

Kuczma, M., Wybranowska, K. 2005. Numerical homogenization of elastic brick masonry: Civil and Environmental Engineering Reports. Prieiga per internetą: <http://www.ceer.uz.zgora.pl>

Lourenço, P. B., Pina-Henriques, J. 2006. Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry, *Computers & Structures* 84(29–30): 1977–1989.

LST EN 1996—1-1. *Eurokodas 6: Mūrinių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios armuotųjų ir nearmuotųjų mūrinių konstrukcijų taisyklės*. Vilnius, 2005.

LST EN 777-2. *Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 2 Dalis. Silikatiniai mūro gaminiai*. Vilnius, 2011.

LST EN 1015-11. *Mūro skiedinio bandymo metodai. 11 dalis. Sukietėjusio skiedinio stiprio lenkiant ir gniuždant nustatymas*. Vilnius, 2004.

LST EN 1015-11. *Mūro skiedinio bandymo metodai. 1 dalis. Stiprio gniuždant nustatymas*. Vilnius, 2004.

Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B; Valivonis, J.: Peculiarities of Masonry Deformation Properties from Hollow Calcium Silicate Blocks. *Proc. of the Theoretical Foundations of Civil Engineering*.

McNarny, W.S, Abrams, D.P. 1985. Mechanics of masonry in compression, *Jornal of structural engineering*. Warsaw – Dnepropetrovsk: Polish – Ukranian Transactions, 910 – 918.

Pela, L., Canella, E., Aprile, A., Roca, P. 2013 Compression test of masonry core samples extracted from existing brickwork, *Construction and building materials*.

Rozenbliumas, A. 1956. *Mūrinės konstrukcijos*. Vilnius, Politinės ir mokslinės literatūros leidykla, 443 p.

Sabha, A., abt Schone, I., 1994. Untersuchungen zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Elbesandstein, *Bautechnik* (Ernst & Sohn Verlag) Nr 71, pp. 161.. 166p.

Sassoni, E., Mazzotti, C., Pagliai, G. 2014. Comparisom between expermental methods for evaluating the compressive strength of existing masonry buildings.

Šlivinskas T., Jonaitis B, Drobiec, L., 2016. Assessment of bed joints behavior of calcium silicate brick masonry during execution, *Engineering structures and technologies*, 08-2016.

Vermeltfoort, A. T. 2005. *Brick-mortar interaction in masonry under compression*: PhD thesis. Eindhoven University of Technology. Prieiga per internetą: <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:library.tue.nl:589402>.

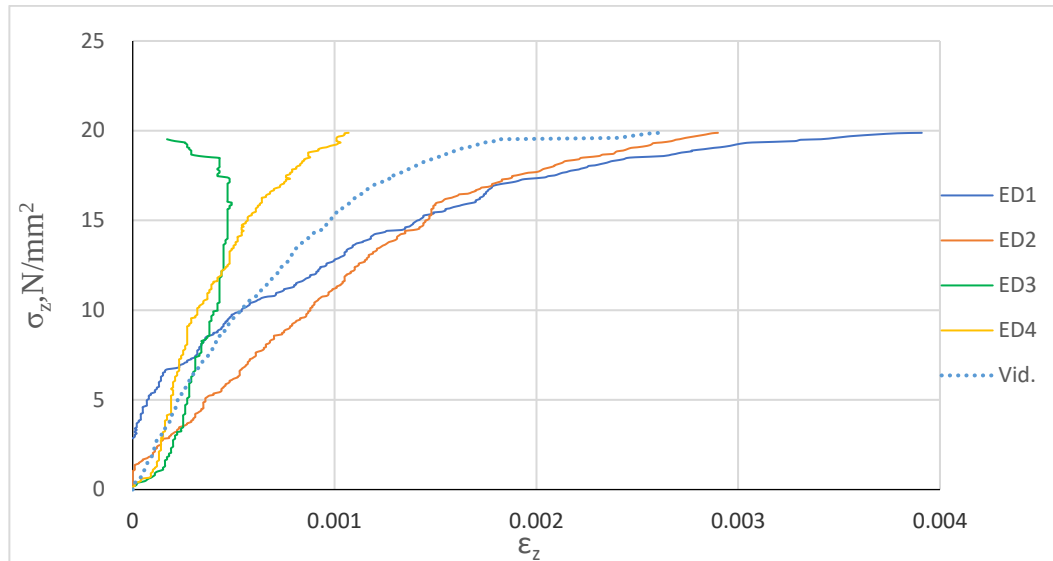
Waters, E.H. 1959. A note on the tensile strenght of concrete across construction joints, *Mag. Of concrete Research*, Vol. 11, nr. 3 163-164p.

Witman F.H., Zaitsev J. 1974. *Bestimmung physicalische Eigenschaften des Zementsteins*, 1-64p.

Zavalis, R., Jonaitis, B. 2011. Mūro gaminiu ir gulsčiųjų siūlių įtempių deformacijų būvio ypatumų analizė, *Engineering Structures and Technologies* 3(3): 105–111. ISSN 2029–2317.

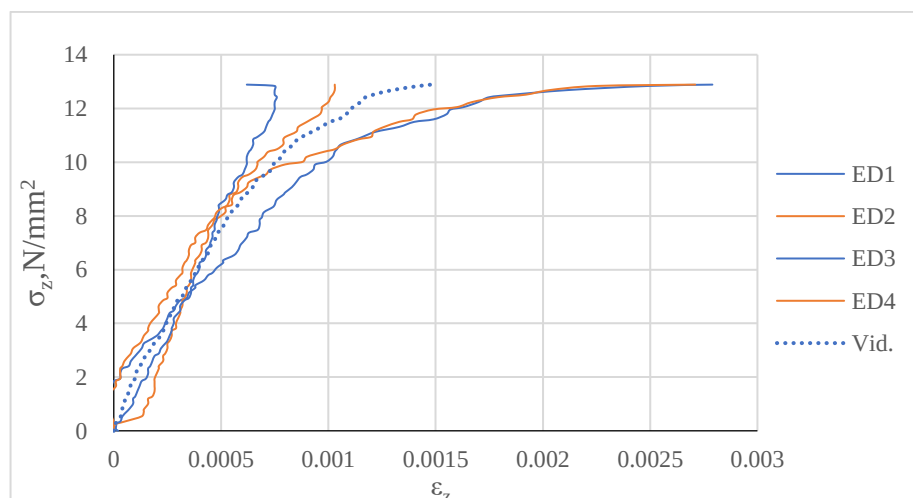
Zavalis, R. 2013. *Gniuždomo tuštymėtųjų silikatinių blokų mūro įtempių būvio analizė*, daktaro disertacija, VGTU.

A.1 Siedinio tamprumo modulio nustatymo bandymo rezultatai

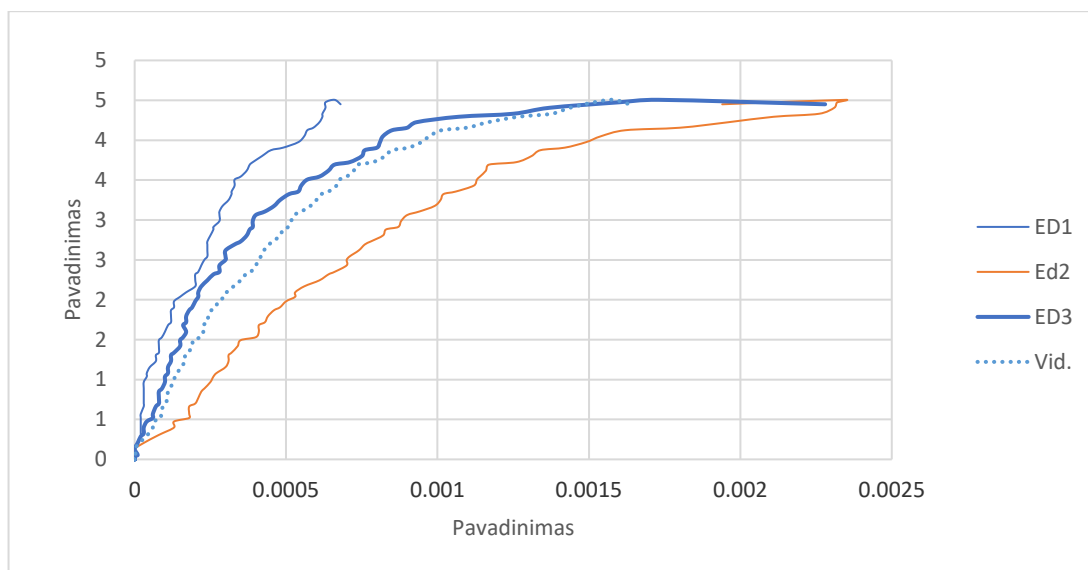


A.1 pav. M1 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \varepsilon$ priklausomybė, ED1...4 elektroninių matuoklių numeriai

Paveiksle **A.1** pavaizduotos vienos prizmės pagamintos iš M1 skiedinio visų 4 daviklių $\sigma - \varepsilon$ diagramos. Iš grafiko matome kad ED1 ir ED2 davikliai pasiekė žymiai didesnes deformacijas (0,0038 % ir 0,0029 %) negu matuokliai ED3 ir ED4 (0,0005 ir 0,0011). Tai galimai nutiko dėl kelių priežasčių: skiedinys nebuvo tolygiai sutankintas, bandinio prizmės išcentruoti taip, kad visi 4 davikliai būtų tolygiai gniuždomi neįmanoma dėl mažų kontrolinių bandinių gabaritų.



A.2 pav. M3 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \varepsilon$ priklausomybė, ED1...4 elektroninių matuoklių numeriai



A.3 pav. M2 skiedinio prizmės elektroninių matuoklių $\sigma - \epsilon$ priklausomybė, ED1...3 elektroninių matuoklių numeriai