

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Šarūnas SKUODIS

SMĖLIO DALELIŲ MORFOLOGINIŲ
PARAMETRŲ ĮTAKOS GRUNTO
MECHANINĖMS SAVYBĖMS
EKSPERIMENTINIAI IR SKAITINIAI TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2015

Disertacija rengta 2011–2015 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Arnoldas NORKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Konsultantas

dr. Darius MARKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

prof. dr. Zdenek KALA (Brno technologijos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

dr. Jonas SATKŪNAS (Vilniaus universitetas, geologija – 05P),

doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2015 m. lapkričio 30 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. spalio 29 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2350-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-861-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2015

© Šarūnas Skuodis, 2015

sarunas.skuodis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Šarūnas SKUODIS

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL
INVESTIGATIONS OF SAND PARTICLES
MORPHOLOGICAL PARAMETERS
INFLUENCE ON SOIL MECHANICAL
PROPERTIES**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2015

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2015.

Scientific supervisor

Prof. Dr Arnoldas NORKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Consultant

Dr Darius MARKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof. Dr Habil. Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Informatics Engineering – 07T),

Prof. Dr Zdenek KALA (Brno University of Technology, Civil Engineering – 02T),

Dr Jonas SATKŪNAS (Vilnius University, Geology – 05P),

Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 30 November 2015**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 29 October 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმė

Disertacijoje nagrinėjama smėlinių gruntų elgsena tiesiogiai įvertinant morfologinius dalelių parametrus. Pagrindiniai tyrimai susideda iš trijų etapų: morfologinių parametrų tyrimai vaizdų analizės programa ir skenuojančiu elektroniniu mikroskopu; eksperimentiniai grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymai; skaitiniai modeliuojamo grunto bandymai ir rezultatų gretinimas. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti morfologinių parametrų įtaką grunto mechaninėms savybėms bei sudaryti modeliuojamo grunto diskretinį ir matematinius modelius. Įgyvendinant pagrindinį tikslą sukurti grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo metodikų patobulinimai.

Darbe sprendžiami du pagrindiniai uždaviniai: eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatų palyginimas bei spūdumo rezultatų priklausomybės nuo morfologinių grunto dalelių parametrų analizė. Pirmasis uždavinys suformuluotas, atsižvelgiant į palyginti mažą tokių tyrimų skaičių. Antrasis siejasi su grunto diskretiniu modeliu, skaitiniu modeliavimu diskrečiųjų elementų metodu įvertinant deformuojamo grunto spūdumo elgseną.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas tirtų gruntų inžinerinių geologinių sąlygų, eksperimentinių ir skaitinių tyrimų apžvalgai. Jame pateikta literatūros analizė ir dalis eksperimentinių duomenų. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikta atliktų eksperimentinių ir skaitinių bandymų apžvalga apie grunto morfologinių parametrų nustatymą, tirtų gruntų spūdumo ir kerpamojo stiprio savybes bei skaitinio modeliavimo rezultatai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Trečiajame skyriuje pateiktas eksperimentinių ir skaitinių grunto tyrimų rezultatų palyginimas, įvertinantis 1–2 skyriuose pateiktus duomenis.

Disertacijos tema paskelbta 19 straipsnių: keturi – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI duomenų bazėje, keturi – kitų tarptautinių duomenų bazių cituojamuose žurnaluose, du – recenzuojamose konferencijų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti 8 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

The dissertation investigates soil morphology parameters influence for mechanical properties with evaluation of examined sand engineering geological conditions. The main objects of research: morphology parameters investigation with view analysis program and SEM; experimental soil compression and direct shear tests; numerical soil compression simulation and results validation with experimental. The primary purpose of this dissertation is to investigate morphology parameters influence for sand mechanical properties and to determine optimal spheres quantity for single particle shape subscription.

The paper approaches a few major tasks such as detecting the experimental and numerical tests validation and compression tests results dependences from changing morphology parameters. The first objective is formulated considering comparatively a small scale similar research works presentation. The second is related to the problem of DEM modeling peculiarities.

The dissertation consists of three parts including introduction, 3 chapters, Conclusions, References.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises examined soil types engineering geology conditions, morphology parameters determination with SEM, experimental and numerical soil testing and used literature. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapters 2 represents experimental and numerical soil testing research. Suggestions for improvement of soil compression and direct shear testing procedures are given in this chapter.

Chapter 3 represents experimental and numerical soil testing results validation.

19 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: 4 articles – in the Thomson ISI register, 1 article – in conference material and scientific papers in Thomson ISI data base, 4 articles – in the journal quoted in other data bases, 2 articles – in material reviewed during international conferences. 8 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

a – į dalelės projekciją įbrėžtos elipsės trumposios ašies ilgis;

A – kintamas kirpimo plotas;

A_0 – pastovus kirpimo plotas;

A_{2D} – dalelės plotas dvimatėje erdvėje;

b – į dalelės projekciją įbrėžtos elipsės ilgosios ašies ilgis;

c – grunto sankiba;

c_k – charakteristinė grunto sankibos reikšmė;

c_m – vidutinė grunto sankibos reikšmė;

$c_{m,min}$ – vidutinė mažiausia grunto sankibos reikšmė;

$c_{m,max}$ – vidutinė didžiausia grunto sankibos reikšmė;

C_{2D} – apskritumo koeficientas dvimatėje erdvėje;

$d_{ekv,2D}$ – ekvivalentinis dalelės skersmuo dvimatėje erdvėje;

d_{max} – dalelės projekcijos didžiausio skersmens apskritimo besiliečiančio su dalelės išore skersmuo;

d_{min} – įbrėžto į dalelę mažiausio apskritimo skersmuo besiliečiančio su dalelės vidine kontūro dalimi;

D – odometro žiedo skersmuo;

e – poringumo koeficientas;

e_o – pradinis poringumo koeficientas;

E – deformacijų modulis;

E_{oed} – odometrinių deformacijų modulis;

E_p – modeliuojamos dalelės deformacijų modulis;

G – šlyties modulis;

h – bandinio aukštis;

H – odometro žiedo aukštis;

I – dalelės plotis;

I_d – tankio indeksas;

$K_{f,2D}$ – formos koeficientas dvimatėje erdvėje;

L – dalelės ilgis;

n – dalelių skaičius;

N – dalelės projekcijoje išmatuotų kampų skaičius;

P_d – dalelės projekcijos perimetras dvimatėje erdvėje;

P_{ekv} – ekvivalentis dalelės perimetras dvimatėje erdvėje;

r_i – į atskirus dalelės išgaubimus įbrėžtų apskritimų spinduliai, kurie yra mažesni negu didžiausio į dalelę įbrėžto apskritimo spindulys R ;

R – didžiausio į dalelę įbrėžto apskritimo spindulys;

R_{min} – mažiausios modeliuojamos dalelės spindulys;

S – dalelės aukštis;

S_d – projekcinis dalelės plotas dvimatėje erdvėje;

S_{ekv} – ekvivalentinis dalelės plotas;

s_0 – staigieji nuosėdžiai;

s_1 – konsolidacijos nuosėdžiai;

s_2 – valkšnumo nuosėdžiai;

S_{2D} – sferiškumo koeficientas dvimatėje erdvėje;

T_R – Rayleigh laiko perskaičiavimo žingsnis;

q_c – kūginis stipris;

Q_{2D} – apvalumo koeficientas dvimatėje erdvėje;

t – laikas;

t_α – statistinis kriterijus;

U – konsolidacijos laipsnis;

u_h – horizontalus poslinkis;
 v – apkrovimo greitis;
 v_{ij} – pradinis dalelės greitis;
 Z – laikomosios galios atsarga;
 ρ – grunto tankis;
 ρ_s – kietųjų dalelių tankis;
 ρ_{unsat} – tankis drenuojančiomis sąlygomis;
 ε – deformacija;
 Δt – laiko perskaičiavimo žingsnis;
 ε_v – tūrinės deformacijos;
 σ – normaliniai įtempiai;
 τ – kerpamasis stipris;
 τ_f – pikinis kerpamasis stipris;
 ν – Puasono koeficientas;
 μ – trinties koeficientas;
 μ_r – riedėjimo trinties koeficientas;
 ψ_m – vidutinė dilatacijos laipsnio reikšmė;
 φ – vidinės trinties kampas;
 φ_k – charakteristinė vidinės trinties kampo reikšmė;
 φ_m – vidutinė vidinės trinties kampo reikšmė;
 $\varphi_{m,min}$ – vidutinė mažiausia vidinės trinties kampo reikšmė;
 $\varphi_{m,max}$ – vidutinė didžiausia vidinės trinties kampo reikšmė.

Santrumpos

BEM – baigtinių elementų metodas;
DEM – diskrečiųjų elementų metodas;
SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas;
v. j. l. – virš jūros lygio.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	6
Disertacijos struktūra	6
Padėka	6
1. GRUNTŲ INŽINERINIŲ GEOLOGINIŲ SĄLYGŲ, MORFOLOGINIŲ PARAMETRŲ, EKSPERIMENTINIŲ IR SKAITINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Tirtų gruntų inžinerinės geologinės sąlygos	8
1.2. Grunto morfologiniai parametrai	12
1.2.1. Morfologinių parametru nustatymas geometrinio metodu	15
1.2.2. Morfologinių parametru nustatymas dalelių palyginimo su etalonu metodu	19
1.3. Kompresiniai spūdumo bandymai	20

1.4. Grunto kerpamojo stiprio nustatymas tiesioginio kirpimo aparatu	22
1.5. Skaitinis grunto modeliavimas	27
1.5.1. Grunto modeliavimas baigtinių elementų metodu	28
1.5.2. Grunto modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu	28
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	32
2. GRUNTO ELGSENOS PARAMETRŲ EKSPERIMENTINIAI IR SKAITINIAI TYRIMAI	33
2.1. Tirtų gruntų granulimetrinė sudėtis	34
2.2. Geometriniu metodu nustatytų morfologinių parametrų rezultatai	36
2.2.1. Grunto morfologinių parametrų nustatymo ypatumai	40
2.2.2. Morfologinių parametrų nustatytų geometriniu metodu rezultatai	45
2.3. Kompresiniai spūdumo bandymai su ometru	47
2.3.1. Grunto spūdumo bandymo metodikos patobulinimas	51
2.3.2. Grunto dalelių formos kitimas prieš ir po spūdumo bandymų	55
2.4. Grunto kerpamasis stipris tiesioginio kirpimo aparatu	58
2.4.1. Tiesioginio kirpimo aparato netikslumai ir atlikti patobulinimai	59
2.4.2. Bandymų kiekio ir vertikalų apkrovų įtaka kerpamo grunto stiprio parametrams	69
2.5. Grunto spūdumo modeliavimas baigtinių elementų metodu	74
2.6. Grunto spūdumo modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu.....	77
2.7. Antrojo skyriaus išvados	86
3. EKSPERIMENTINIŲ IR SKAITINIŲ TYRIMŲ GRETINIMAS	89
3.1. Eekspirimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas	89
3.2. Trečiojo skyriaus išvados	94
BENDROSIOS IŠVADOS	95
LITERATŪRA	97
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	107
SUMMARY IN ENGLISH	111
PRIEDAI*	127
A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	128
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	143

*Priedai pateikiami kompaktiniame diske

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The objectives of the thesis	3
The research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	4
Practical novelty of the thesis	5
Defended statements	5
Approval of the research findings	6
The structure of the dissertation	6
Acknowledgements	6
1. OVERVIEW OF SOIL ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS, MORPHOLOGY PARAMETERS, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL TESTS	7
1.1. Examined soil engineering geological conditions	8
1.2. Soil morphology parameters	12
1.2.1. Determination of morphology parameters via geometrical method	15
1.2.2. Determination of morphology parameters via comparison with ethalon method	19
	xiii

1.3. Compaction tests	20
1.4. Direct shear tests	22
1.5. Numerical simulation of soil tests	27
1.5.1. Simulation of compression test with FEM	28
1.5.2. Simulation of compression tests with DEM	28
1.6. Conclusions of chapter 1 and formulating tasks for the dissertation	32
2. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SOIL BEHAVIOUR PARAMETERS	33
2.1. Investigated soil granulometric composition	34
2.2. Morphology parameters determination according to geometrical method	36
2.2.1. Peculiarities of morphology parameters determination	40
2.2.2 Results of morphology parameters determined with geometrical method	45
2.3. Compression tests with oedometer	47
2.3.1. Compression methodology improvement	51
2.3.2. Particle shape evaluation before and after compression test	55
2.4. Soil shearing strength determined with direct shear device	58
2.4.1. Direct shear device errors and improvement	59
2.4.2. Test quantity and stress influence for shearing strength results	69
2.5. Simulation of oedometer test with FEM	74
2.6. Simulation of oedometer test with DEM	77
2.7. Conclusions of chapter 2	86
3. VALIDATION OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS.....	89
3.1. Comparison of experimental and numerical tests results	89
3.2. Conclusions of chapter 3	94
GENERAL CONCLUSIONS	95
REFERENCES	97
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF DISSERTATION	107
SUMMARY IN ENGLISH	111
ANNEXES*	127
Annex A. Agreements of co-authors to provide published material in the thesis.....	128
Annex B. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the dissertation	143

*Annexes are provided in the attached compact disk

Įvadas

Problemos formulavimas

Smėlius sudaro atskiros skirtingos formos ir dydžių dalelės. Deformuojantis smėliniams gruntams, dalelių persiskirstymas lemia spūdumo elgseną. Spūdumo elgsenos parametrus kokybiškai įvertinti ir paaiškinti galima tik vadovaujantis dalelių mechanikos dėsniais, tiesiogiai įvertinat dalelių morfologinius parametrus. Šitaip suformuluotas uždavinys išsprendžiamas tik skaitiškai, panaudojant diskrečiųjų elementų metodą.

Viena aktualiausių problemų atliekant grunto skaitinį modeliavimą diskrečiųjų elementų metodu – grunto atskirų dalelių formos (diskretinio modelio) ir granulimetrinės sudėties atitiktis (atskirų dalelių visumos) aprašymas, t. y. nėra žinomų rekomendacijų, kiek reikia naudoti sferų aprašant vieną modeliuojamo grunto dalelės formą. DEM metodas yra pakankamai naujas, tačiau šį metodą galima plačiai taikyti tiek homogeninėse medžiagose, tiek dispersinėse. Aprašant gruntą DEM metodu iškyla kelios aktualios problemos – kokį modeliujamų dalelių dydį, formą (morfologinius parametrus) ir fizinius parametrus naudoti. Sumodeliuoti realių matmenų uždavinius yra įmanoma, jei modeliujamų dalelių kiekiai pakankamai maži. Didelio dalelių kiekio sumodeliuoti nėra įmanoma, dėl per mažai išvystytos kompiuterinio skaičiavimo gebos. Laukiant

revoliucijos kompiuteriniame skaičiavime, tenka priimti tam tikrus uždavinių supaprastinimus, tokius kaip: mastelio faktoriaus įvedimas, mažo dalelių kiekio naudojimas, fizinių parametrų mažinimas arba didinimas ir t. t. Visi supaprastinimai yra priimami norint sumažinti sprendžiamo uždavinio skaičiavimo laiką. Kita aktuali problema atsirandanti dėl aukščiau išvardintų priežasčių – mažai autorių yra linkę atlikti ir eksperimentinius, ir skaitinius tyrimus bei juos palyginti tarpusavyje. Šis faktas tik patvirtina, kad dispersinių sistemų DEM modeliavime dar daug problemų yra neišspręsta.

Disertacijoje numatoma atlikti eksperimentinius grunto morfologinių parametrų tyrimus, eksperimentinius grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymus ir palyginti gautus rezultatus palyginti su skaitiniais grunto spūdumo tyrimų rezultatais. Remiantis eksperimentinių ir skaitinių tyrimų duomenimis ištirti morfologinių parametrų įtaką grunto mechaninėms savybėms ir sudaryti modeliuojamo grunto dalelių diskretinius modelius parenkant racionalų sferų skaičių, kuriuo aprašoma atkuriamą vieną grunto dalelę. Taip pat, patobulinti eksperimentinių grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymų metodikas.

Darbo aktualumas

Morfologinių parametrų įtaka grunto mechaninėms savybėms – tai plati mokslinių tyrimų problema, kuri apima pagrindinius eksperimentinių ir skaitinių bandymų tarpusavio sugretinimo klausimus. Šios problemos sprendimo rezultatai turi didelę reikšmę kuriant patikimą skaitinio modeliavimo DEM metodiką.

Sprendžiant DEM uždavinius, dažnai būtina nustatyti modeliuojamo grunto morfologinius parametrus, tokius kaip dalelių dydis, forma, kampuotumas, apvalumas, sferiškumas ir pan. Tokių uždavinių sprendime, tai yra tik dalis pradinių įvesties parametrų, kurie būna derinami su fizinėmis modeliuojamų dalelių savybėmis. DEM metodo taikymo sritys yra praktiškai neribojamos, esminė problema – kompiuterinių resursų skaičiavimo laikas. Mažinant skaičiavimo laiką yra priimama daugelis supaprastinimų uždavinio sprendime ir gaunami rezultatai, tam tikrais atvejais neatspindi realių sąlygų, kai yra lyginami eksperimentiniai ir skaitiniai rezultatai. Dėl DEM uždavinių sudėtingumo, eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimai dažnai nėra atliekami, nes gauti vienodus rezultatus yra pakankamai sudėtinga.

DEM uždavinių sprendime taikomi lygiagrečiųjų skaičiavimo klasteriai gali per tą patį laiko tarpą išspręsti kelis ar net keliolika kartų didesnės apimties uždavinius. Tačiau klasterių naudojimas vis dar negali pakankamai sumažinti skaičiavimo laiko. Todėl dabartiniu metu yra laukiama kompiuterių skaičiavimo našumo ženklaus padidėjimo, kad būtų įmanoma spręsti didelių apimčių uždavinius, imituojančius realias situacijas.

Taikant supaprastinimus DEM uždavinių sprendime, būtina gretinti gaunamus rezultatus lyginant su eksperimentiniais arba su BEM. Netaikant rezultatų gretinimo, didėja skaitinio modeliavimo išeities duomenų nepatikimumas. Iki šiol nėra bendros nuomonės ar pasiūlymų, kiek reikia naudoti sferų, kad būtų pakankamai tiksliai aprašyta modeliuojama grunto dalelė, kuri turėtų pakankamą morfologinių parametrų ir skaitinių rezultatų panašumą į eksperimentinių bandymų. Todėl DEM uždavinių sprendimo srityje dar reikia atlikti daug tyrimų, norint sėkmingai toliau vystyti ir taikyti šį metodą inžinerinėje praktikoje.

Tyrimų objektas

Disertaciniame darbe nagrinėjami suardytos struktūros orasausių rupių gruntų morfologiniai parametrai, eksperimentiniai grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymai bei jų metodikos. Tiriama eksperimentiškai nustatyti grunto spūdumo rezultatai bei jų panaudojimo galimybės modeliavime baigtinių elementų metodu ir diskrečiųjų elementų metodu. Nagrinėjami eksperimentinių bandymų metodikų ir skaitinio spūdumo modeliavimo DEM patobulinimai.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – kokybiškai įvertinti ir patobulinti eksperimentinius grunto spūdumo ir kirpimo bandymų bei skaitinio spūdumo modeliavimo metodikas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti būtinas šių uždavinių sprendimas:

1. Parinkti skirtingas smėlinių gruntų slūgsojimo vietas ir atlikti gruntų morfologinių parametrų nustatymo tyrimus, taikant vaizdų analizės programą „STIMAN“ ir skenuojantį elektroninį mikroskopą. Pagal morfologinių parametrų rezultatus atrinktam gruntui sudaryti diskrečiųjų modelių ir sumodeliuoti DEM.
2. Kompresiniu aparatu atlikti smėlinio grunto eksperimentinius spūdumo bandymus, patobulinti bandymo metodiką.
3. Atlikti smėlinio grunto eksperimentinius tiesioginio kirpimo bandymus, patobulinti bandymo metodiką.

4. Skaitiniais metodais sumodeliuoti grunto spūdumo bandymą BEM, gautus rezultatus palyginti su eksperimentiškai nustatytais ir DEM, pateikti grunto deformacijų modulio nustatymo metodikos patobulinimus.
5. Skaitiniais metodais sumodeliuoti grunto spūdumo bandymą DEM ir gautus rezultatus palyginti su BEM ir eksperimentiškai nustatytais, pateikti smėlinio grunto dalelių morfologinių parametrų ir spūdumo priklausomybes.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi: vaizdų analizės metodas (morfologijos tyrimams), mažiausių kvadratų metodas (charakteristinių verčių nustatymui), skaitinio modeliavimo metodai (BEM ir DEM), palyginimo metodas (eksperimentiniams ir skaitiniams tyrimams). Eksperimentiniai bandymai atlikti su standartine bandymų įranga patobulintus bandymų metodikas. Atliktas eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatų gretinimas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Atlikta tirtų smėlinių gruntų morfologinių parametrų verčių dvimatė ir trimatė analizė taikant vaizdų analizės programą „STIMAN“. Pagal vaizdų analizės duomenis, morfologinių parametrų nustatytų dvimatisėje erdvėje tikslumas yra pakankamas sudaryti patikimą diskretinį modelį. Tai leidžia ženkliai sumažinti tyrėjo laiko resursus skiriamus vaizdų analizei ir morfologinių parametrų nustatymui.
2. Sukurti eksperimentinių grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymo metodikų patobulinimai, leidžiantys tiksliau įvertinti eksperimentiškai nustatytas grunto mechanines savybes: deformacijų modulį, vidinės trinties kampą, sankibą. Pateikti pasiūlymai charakteristinių grunto kerpamojo stiprumo reikšmių įvertinimui, išvengiant statistinio kriterijaus t_α įtakos.
3. Gauti rezultatai pagal sukurtą grunto eksperimentinio spūdumo bandymo metodikos patobulinimą sutampa su nustatytais diskrečiųjų elementų metodu.

4. Naudojant programinį paketą DEMMAT ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto klasterį VILKAS sudarytas matematinis modelis ir skaičiavimo algoritmas, leidžiantis modeliuoti realios granulometrinės sudėties grunto daleles, taikant lygiagrečiuosius skaičiavimo metodus.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Eksperimentinių grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo tyrimų rezultatai gali būti pritaikyti geotechninių konstrukcijų projektavimo ir grunto bandymų normatyviniuose dokumentuose. Skaitinių tyrimų rezultatai gali būti pritaikyti DEM tolimesniame vystyme, nes patobulinta eksperimentinio spūdumo bandymo metodika leidžia skaitiniame bandyme keisti tik spaudžiamo grunto daleles aprašančius morfologinius parametrus, kai fizinės ir mechaninės savybės išlieka vienodos.

Ginamieji teiginiai

1. Dalelių morfologiniai parametrai lemia deformuojamo smėlinio grunto elgseną, todėl interpretuojant eksperimentinių tyrimų rezultatus bei modeliuojant grunto elgseną DEM morfologiniai parametrai turi būti kokybiškai įvertinti.
2. Norint kokybiškai analizuoti ir interpretuoti gautus rezultatus, būtini standartinės eksperimentinių grunto spūdumo ir kirpimo bandymų metodikų bei naudojamų prietaisų patobulinimai.
3. Pasiūlyta patobulinta grunto spūdumo metodika leidžia panaikinti kontaktinės plokštumos tarp grunto ir porinio akmens įtaką spūdumo rezultatams.
4. Pasiūlyta patobulinta grunto tiesioginio kirpimo bandymo metodika kompleksiskai įvertina kintamą grunto kirpimo plokštumos plotą, bandymų kiekio ir kirpimo įtempių dydžio įtaką kerpamajam stipriui.
5. Vertinant grunto elgsenos pokyčius dėl dalelių persiskirstymo, grunto spūdumo skaitinis modeliavimas BEM yra nepakankamas. Kokybiškam spūdumo elgsenos vertinimui būtina atlikti grunto modeliavimą DEM, sukuriant smėlinio grunto spūdumo bandymo diskretinį ir matematinį modelius.
6. Pasiūlyti patobulintų eksperimentinių ir skaitinių spūdumo bandymų metodikų rezultatai tarpusavyje sutampa.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinta 19 mokslinių straipsnių: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą; keturi – mokslo žurnaluose, cituojamuose kitose tarptautinėse duomenų bazėse, vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje, įtrauktoje į ISI Proceedings sąrašą, dešimt – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti aštuoniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“ 2011–2013 m. Vilniuje (penki pranešimai);
- Tarptautinėje konferencijoje „*Modern building materials, structures and techniques*“ 2013 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Innovative materials, structures and technologies*“ 2013 m. Rygoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*23rd European Young Geotechnical Engineers Conference*“ 2014 m., Barselonoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Darbo apimtis yra 125 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 11 numeruotų formulių, 93 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 124 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacinio darbo autorius išreiškia padėką savo mokslinio darbo vadovui, Geotechnikos katedros vedėjui prof. dr. Arnoldui Norkui už rekomendacijas ir pagalbą rengiant disertaciją.

Už pagalbą ir draugiškumą doktorantūros studijų metu, darbo autorius dėkoja Geotechnikos katedros darbuotojams, ypač doc. dr. Jonui Amšiejui ir doktorantams. Taip pat disertacinio darbo autorius dėkoja kolegoms: prof. dr. Alessandro Mandolini ir jo kolegoms iš Neapolio II universiteto, prof. dr. Norbert Vogt ir jo kolegoms iš Miuncheno technikos universiteto, prof. dr. Zbigniew Sikora ir jo kolegoms iš Gdanskio technikos universiteto bei Wille Geotechnik įmonės darbuotojams, ypač dr. Martin Tazl, kurie konsultavo stažuotės metu.

Disertacinio darbo autorius išreiškia padėką Lietuvos mokslo tarybai už finansinę paramą doktorantūros studijų metu.

Gruntų inžinerinių geologinių sąlygų, morfologinių parametrų, eksperimentinių ir skaitinių tyrimų analizė

Skyriuje analizuojama literatūros šaltiniuose paskelbta informacija apie tiriamų smėlinių gruntų vietovių inžinerines geologines sąlygas, genetinių tipų tyrimų rezultatus, smėlių kilmę ir susidarymo būdus, dūlėjimo aplinką, granulimetrinę sudėtį, morfologinius parametrus, plačiau apžvelgiamos Holoceno amžiaus jūrinės nuogulos (mIV) ir pagrindinė šio grunto sudėtis. Dar, analizuojama grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymų metodika bei apžvelgiama skaitinio modeliavimo baigtinių ir diskrečiųjų elementų metodu problematika.

Šių tyrimų tikslas – parinkti vieną smėlinio grunto rūšį, pagal jo kilmę ir granulimetrinę vienodos sanklodos kreivę, kuri toliau bus analizuojama eksperimentiškai ir skaitiškai kituose skyriuose.

Skyriaus tematika paskelbti šeši autoriaus straipsniai (Skuodis, Amšiejus 2011; Kavrus, Skuodis 2012; Skuodis *et al.* 2013; Vitale, Skuodis 2013; Skuodis, Norkus 2014; Skuodis, *et al.* 2014).

1.1. Tirtų gruntų inžinerinės geologinės sąlygos

Lietuvoje smėlio dariniai dengia kiek daugiau nei 30 % šalies teritorijos (Gasiūnienė 1998; Žaržojus 2006). Visi žvyro ir smėlio telkiniai, susidarę per kvartero periodą yra naudojami kelių tiesimui, pagalbiniam statybos darbams, statybinių medžiagų pramonėje (pvz. skiedinių ir betono gamybai, molio liesinimui, silikatiniams dirbiniams ir pan.). Jie sutinkami Aukštaitijos, Dzūkijos, Sūduvos, Žemaitijos aukštumose, smėlingose lygumose ir upių slėniuose (Prušinskienė 2012). Daugiausia smėlio darinių susidarymas susijęs su vandens – ledynų tirpimo, upių srautų, ežerų ir jūros veikla (Prušinskienė 2012).

Pagal kilmę smėlio gruntai skirstomi į eolinius (vIV), jūrinius (mIV), dabartinio aliuvio (aIV), senojo aliuvio (aIIIbI), fluvio-glacialinius (fIIIbI), kraštinių darinių (gtIIIbI), limnoglacialinius (lgIIIbI) ir technogeninius (tIV) gruntuos, o pagal slūgsojimą – viršutinio ir vidurinio pleistoceno tarpmoreninius (agIII md-gr, agII žm-md, agI-II dn-žm). Daugiausia yra aliuvinės (apie 10 %), fluvio-glacialinės (~11 %) ir limnoglacialinės (~11 %) kilmės smėlių. Kitos genezės smėliai sudaro apie 0,5 % (Valiūnas 2005). Žemiau pateikiama trumpa įvairių Lietuvos genetinių tipų smėlių tyrimų (Dundulis *et al.* 2004; Gasiūnienė 1998) rezultatų apžvalga.

Holoceno amžiaus eoliniai smėliai (vIV) susiformavo iš skirtingo tipo pradinės medžiagos – Baltijos jūros priekrantinių nuogulų ($S_{2D} = 0,84$) ir fluvio-glacialinių zandrų ($S_{2D} = 0,73$). Perpustymo trukmė buvo skirtinga, bet jų dalelių morfologija yra vienoda ($S_{2D} = 0,81–82$). Eolinėse nuogulose vyrauja dvi frakcijos (0,25–0,5 mm ir 0,1–0,25 mm), nes mažesnės dalelės būna išpustytos. Vidutinis poringumo koeficientas $e = 0,67$. Iki 4–5 m gylio šie gruntai yra puresni ($I_d = 0,39$; $q_c = 3–4$ MPa), o giliau dėl geostatinio slėgio jų stiprumas didėja ($q_c = 7,5$ MPa). Dabartiniai jūriniai smėliai (mIV) formavosi priekrantinėje zonoje. Jiems būdingas ypač didelis sferiškumas ($S_{2D} = 0,84$) ir nedidelis poringumo koeficientas $e = 0,64$, mažas spūdimas ($E = 32$ MPa). Sutankėjimą lėmė tanki nuogulų sandara, kurią suformavo priekrantinė bangų mūša.

Jūros smėlis pačioje Lietuvos šiaurėje paleoįrėžiuose ir iki jūrinio reljefo pažemėjimuose iškilusiose jūros amžiaus nuogulose yra kvarcinio smėlio. Dangos nuogulų storio vidurkis 4–6 m, naudingojo klogo 10–13 m. Naudingasis klogas slūgso žemiau gruntinio vandens lygio. Čia aptinkamas kvarcinis smėlis su vyraujančiomis 0,6–0,3 ir 0,3–0,15 mm frakcijomis. Vidutinis SiO₂ kiekis smėlyje yra apie 95 % (kinta nuo 91 iki 97 %). Nedidelė organinių dulkių priemaiša (1,3–1,6 %) suteikia smėliui juosvai rusvą atspalvį.

Dabartinio aliuvio smėliai (aIV) sudaro pirmąją viršsalpinę ir salpinę terasas. Jos susidarė iš pradinės glaciogeninių darinių medžiagos, todėl šių nuogulų dalelės išsiskiria mažu sferiškumu ($S_{2D} = 0,74–75$). Šie smėliai slūgso upių pirmoje ir antroje viršsalpinėse terasose, kur sedimentacijos metu jie gerai nesutankėja, todėl pasižymi dideliu poringumo koeficientu ($e = 0,75$) ir mažu tankumu ($I_d = 0,27$).

Tačiau šių gruntų mechaninės savybės nėra blogos ($q_c = 6,6$ MPa; $E = 30$ MPa) dėl mažo dalelių sferiškumo ir įvairios granulometrinės sudėties. Kadangi šiose nuogulose yra molio dalelių, jų paviršiuje susiformuoja plėvelės, dėl kurių kiek padidėja šių smėlių struktūrinis stipris (vid. 0,09 MPa).

Senajo aliuvio smėliai (aIIIbl) sudaro aukštesnes didžiųjų Lietuvos upių (Nemuno, Neris) viršsalpines terasas. Jie susiformavo veikiami pastovių ledynų tirpsmo vandens srautų. Šios nuogulos pasižymi mažesniu negu dabartinio aliuvio smėliai grūdėlių sferiškumu ($S_{2D} = 0,73-74$) ir poringumo koeficientu ($e = 0,70$) bei tankesne sandara ($I_d = 0,52$). Stiprumas vidutinis, spūdumas mažas ($q_c = 6,3$ MPa; $E = 38$ MPa). Šiuose smėliuose būna silpnai cementuotų geležingų ir karbonatingų hipergenetinių darinių atmainų. Jų struktūrinis stipris vidutiniškai sudaro 0,13 MPa.

Fliuvioglacialiniai smėliai (fIIIbl) susidarė iš klajojančiųjų ir pastoviųjų ledyno tirpsmo vandens srautų nešamos medžiagos, jiems būdingas didžiausias dalelių skersmuo (0,17 mm) ir mažiausiais jų sferiškumas. Dalelių poringumo koeficientas ($e = 0,70$) ir tankumas ($I_d = 0,57$) vidutiniai, stipris ($q_c = 7,8$ MPa; $E = 38$ MPa). Vidutinis struktūrinis stipris dėl hipergenetinių geležingų, rečiau molingų darinių sudaro 0,13 MPa.

Limnoglacialiniai smėliai (lgIIIbl) klostėsi stambių prieleidyninių ežerų pakrantėse bei seklose. Nuolaužinė medžiaga buvo išplaunama iš moreninių nuogulų, kurios sudarė šių ežerų krantus. Šių darinių vidutinis dalelių skersmuo yra mažas (0,14 mm), jiems būdingas vidutinis sferiškumas ($S_{2D} = 0,76-77$), mažas poringumo koeficientas ($e = 0,62$), pakankamai didelis tankumas ($I_d = 0,62$). Stipruminės charakteristikos ($q_c = 9,1$ MPa; $E = 40$ MPa).

Kraštinių darinių smėliai (gtIIIbl) formavosi pačiame tirpstančiojo ledyno pakraštyje iš perplautos moreninės medžiagos. Jie artimi senajo aliuvio ir fliuvioglacialiniams smėliams. Šios nuogulos pasižymi vidutiniu poringumo koeficientu ($e = 0,70$) ir tankumu ($I_d = 0,68$). Jų stipruminės savybės sudaro ($q_c = 7,0$ MPa; $E = 46$ MPa), struktūrinis stipris 0,12 MPa.

Tarpmoreninių sluoksnių smėliai savo savybėmis skiriasi nuo jau aprašytųjų gruntų. Nors vieni jų susiformavo paleobaseinuose, kiti – paleosrautuose, visi šie gruntai pasižymi dideliu stiprumu ir mažu spūdumu. Tokias savybes nulėmė post-sedimentaciniai procesai – geostatinis viršuje slūgsančių nuogulų slėgis bei buvusių ledynų dangos svoris. Tarpmoreninių gruntų struktūrinį stiprį didina ir susiformavę hipergenetiniai dariniai.

Pagal Dundulį *et al.* (2004) ir Gasiūniene (1998) yra sudaryti skirtingų smėlinių gruntų genetinių tipų tyrimų rezultatai (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Skirtingų smėlių genetinių tipų rezultatai**Table 1.1.** Genetic types results of different sand

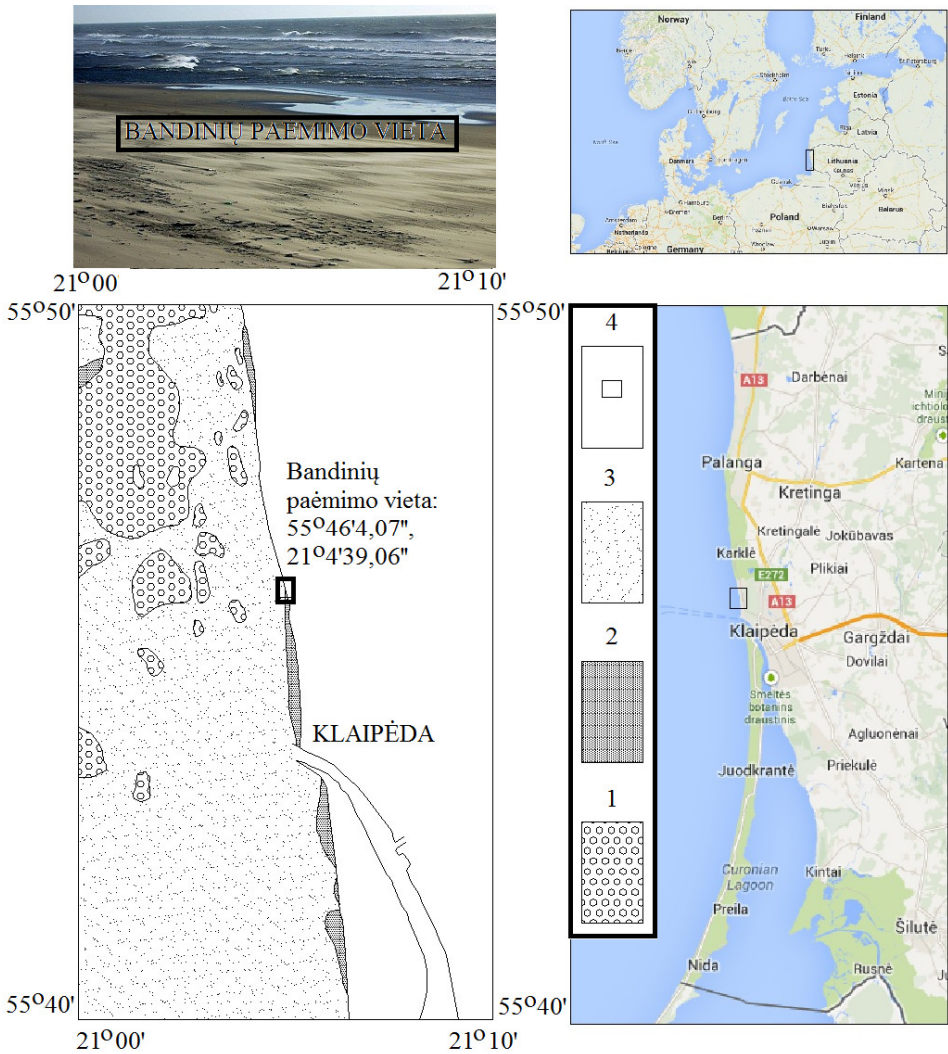
Smėlių genetinis tipas	S_{2D}	e
Eoliniai (vIV)	0,81–0,82	0,67
Jūriniai (mIV)	0,84	0,64
Aliuviniai (aIV)	0,74–0,75	0,75
Senojo aliuvio (aIIIbl)	0,73–0,74	0,70
Fliuvoglacialiniai (fIIIbl)	–	0,70
Limnoglacialiniai (lgIIIbl)	0,76–0,77	0,62
Kraštinių darinių (gtIIIbl)	–	0,70

Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad skirtingos kilmės smėlių geotechnines savybes lemia skirtingi jų susidarymo būdai. Eolinių, jūrinių ir dabartinio aliuvio smėlių savybės labiausiai priklauso nuo jų granulimetrinės sudėties, grūdelių morfologijos bei pradinio poringumo (Prušinskienė 2012).

Klaipėdos pakrantės inžinerinės geologinės sąlygos išskirtinai apžvelgiamos plačiau, nes šioje srityje esančio grunto elgsena įvertinant dalelių morfologinius parametrus yra tinkama skaitiniam modeliavimui diskrečių elementų metodu. Tirtu grunto slūgsojimo vieta yra Klaipėdos miesto šiaurinėje dalyje, Baltijos jūros pakrantėje (1.1 pav.). Tyrimams smėlis paimtas iš bangų skalaujamos zonos (14 kg, paėmimo gylis 0,4–0,5 m), kurioje slūgso Holoceno amžiaus jūrinės nuogulos (mIV).

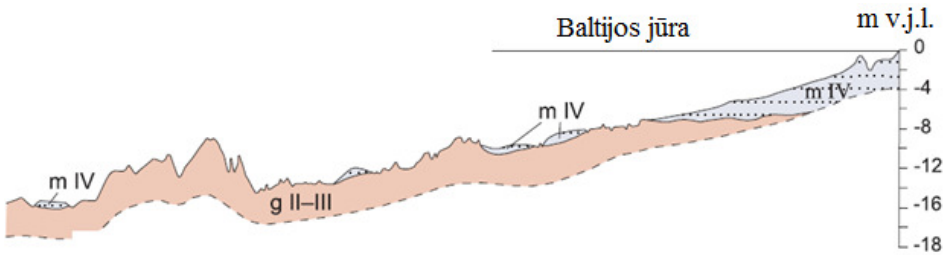
Nuosėdos, slūgsančios Baltijos paplūdimyje yra suformavusios per Kvartero laikotarpį. Geologiniu ir geomorfologiniu požiūriu Lietuvos pakrantė, sudaryta iš dviejų skirtingų sektorių: kontinentinio sektoriaus (prasidedantis nuo Klaipėdos šiaurės) ir Kuršių Nerijos sektoriaus. Kontinentinis Lietuvos paplūdimio sektorius geologiniu požiūriu labai įvairus. Šiaurinė ir pietinė šio sektoriaus dalys sudariusios iš smėlinių nuosėdų, kurios buvo suformuotos Litorinos ir Post-Litorinos jūrų ir jų lagūnų, o centrinėje ir pietinėje dalyje, vyrauja glacialinės nuogulos suformuotos vėlyvojo Nemuno ir Medininkų ledynmečiais (Bitinas *et al.* 2005; Jarmalavičius *et al.* 2011).

Tyrimų vieta yra kontinentinio sektoriaus pietuose, t. y. Klaipėdos šiaurėje. Šioje vietoje (Bitinas *et al.* 2005; Viška, Soomere 2013), priekrantėje yra nedidelė smėlio juosta (mIV), kuri tęsiasi maždaug iki 4–5 m gylio, giliau slūgso moreninės nuogulos (g II–III) (1.2 pav.).



1.1 pav. Grunto bandinių paėmimo vieta ir litologinės sąlygos: 1 – rieduliai (>64 mm) ir žvyras (64–2 mm); 2 – rupus (2–0,5 mm) ir vidutinio rupumo (0,5–0,25 mm) smėlis; 3 – smulkus smėlis (0,25–0,063 mm); 4 – bandinių paėmimo vieta (Skuodis *et al.* 2014)

Fig. 1.1. Lithological types of bottom surface sediments and location of sampling: 1 – boulders (>64 mm) and gravel (64–2 mm); 2 – coarse-grained (2–0.5 mm) and medium-grained (0.5–0.25 mm) sand, 3 – fine sand (0.5–0.063 mm); 4 – Location of investigation area (Skuodis *et al.* 2014)



1.2 pav. Tyrimų vietų nuogulos šalia Girulių (Bitinas *et al.* 2005; Skuodis, Norkus 2014)
Fig. 1.2. Bottom sediments on the underwater slope close to Giruliai
 (Bitinas *et al.* 2005; Skuodis, Norkus 2014)

Litorinos jūros (mIV_L) ir post–Litorinos (mIV_{PL}) smėlinės nuogulos sudarytos iš smulkaus ir dulkingo smėlio, tarpais su organinės medžiagos priemaiša. Taip pat, šiuose sluoksniuose pasitaiko ir rupesnių nuogulų (žvyringo smėlio). Vėlyviausios jūrinės nuosėdos (mIV) sudarytos daugiausia iš žvyringo, vidutinio rupumo ir smulkaus smėlio (Dundulis *et al.* 2006).

Jūrinių smėlinių nuogulų vidutinis dalelių tankis (ρ_s) yra apie $2,66 \text{ Mg/m}^3$. Nepriklausomai nuo jų genezės, mineralinė sudėtis taip pat yra labai panaši, ir vyrauja kvarcas ir feldšpatai. Natūralus šio smėlio gamtinis drėgnis, kuris priklauso nuo soties vandeniu laipsnio, kinta nuo 13,7 iki 22,5 %. Poringumo koeficientas (e) smulkiuose smėliuose kinta nuo 0,474 iki 0,778 (Dundulis *et al.* 2006). Dabartiniai jūriniai smėliai (mIV) formavosi priekrantės zonoje, todėl išskirtinis jų dalelių morfologijos bruožas yra ypač didelis sferiškumas $S_{2D} = 0,84$ (Dundulis *et al.* 2004).

1.2. Grunto morfologiniai parametrai

Smėlinius gruntus sudarančių dalelių išorinė išvaizda vadinama morfologija (Das 2007; Prušinskienė 2012, Šlečkuvienė 2013). Dažniausiai naudojami morfologiniai parametrai grunto dalelėms apibūdinti (Cavarreta 2009; Prušinskienė 2012; Das 2007; Rodriguez *et al.* 2008) yra šie:

- a) plotas;
- b) perimetras;
- c) ekvivalentinis skersmuo;
- d) formos koeficientas;
- e) sferiškumas;
- f) apskritumas;
- g) apvalumas (apzulinimas);
- h) izmoteriškumas;

- i) anizometriškumas;
- j) šiurkštumas.

Pastaba: šiame disertaciniame darbe izmoteriškumas, anizometriškumas ir šiurkštumas nebuvo tirtas ir vertinamas.

Nustatant grunto morfologinius parametrus, galima taikyti skirtingus metodus. Metodo pasirinkimas priklauso nuo pageidaujamo rezultatų tikslumo bei turimos įrangos ir laiko išteklių. Visi taikomi metodai turi pasižymėti šiais bruožais (Cavarreta 2009; Rodriguez *et al.* 2008):

- a) prieinamumu – lengvai taikomas laiko ir atminties išteklių atžvilgiu;
- b) tinkamumu – tiksliai apskaičiuoja morfologinius parametrus;
- c) jautrumu – užtikrina pakankamai tikslūs skaičiavimo rezultatus su sąlyga, kad įmanomi skaičiavimo rezultatų neįtakojantys nedideli dalelės formos pokyčiai.

Disertaciniame darbe naudotas vizualinis grunto morfologinių parametrų nustatymo metodas. Dažniausiai taikomus vizualius metodus galima suskirstyti į dvi grupes (Prušinskienė 2012; Mancino 1996; Rodriguez *et al.* 2008):

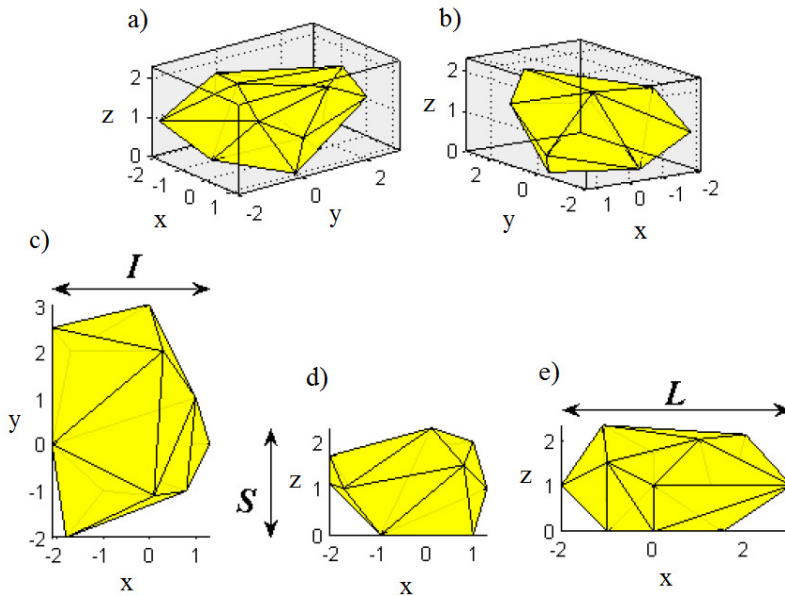
- a) geometrinis metodas;
- b) dalelių palyginimo su etalonu metodas.

Disertaciniame darbe kompleksiskai panaudotos abi aukščiau minėtos vizualinio grunto morfologinių parametrų nustatymo grupės. Kadangi dalelių palyginimo su etalonu metodas pasižymi ne itin dideliu tikslumu, šis metodas taikomas tik atlikus grunto dalelių analizę pagal geometrinį morfologinių parametrų nustatymo metodą.

Geometriniu dalelių morfologinių parametrų nustatymo metodu įsitikinta, kad tirtu grunto dalelės dažniausiai nukrenta didžiausia plokštuma ant tiriamojo stalo (Feda 1982). Dėl šios priežasties, racionaliai naudojant tyrimo resursus, grunto morfologiniai parametrai tirti tik dvimatėje erdvėje (Das 2007; Prušinskienė 2012) ir fotografuojant daleles tik iš viršaus.

Visas formules, skirtas morfologiniams parametrams nustatyti, galima suskirstyti į tris grupes (Cavarreta 2009):

- a) formulės, įvertinančios tikrus dalelių morfologinius parametrus pagal realią formą, turį ir paviršiaus plotą;
- b) formulės, skirtos taikyti tik pagal vieną didžiausią dalelės projekciją (2.5 pav. c) (Dvimatės erdvės formulės, taikytos disertaciniame darbe).
- c) formulės, kurias taikant, morfologinio parametro reikšmė gaunama išvedus to parametro reikšmių aritmetinį vidurkį (pseudotrimatės arba trimatės erdvės formulės), apskaičiuotų pagal pagrindinės dalelės plokštumų projekcijas (1.3 pav. c, d, e.), kuriose yra trys pagrindiniai dalelės matmenys (ilgis L , plotis I , aukštis S).



1.3 pav. Dalelės vaizdas: a) iš viršaus; b) iš apačios; c), d), e) iš šonų
(Cavarreta 2009; Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 1.3. Particle view: a) from top; b) from bottom; c), d), e) from sides
(Cavarreta 2009; Kavrus, Skuodis 2012)

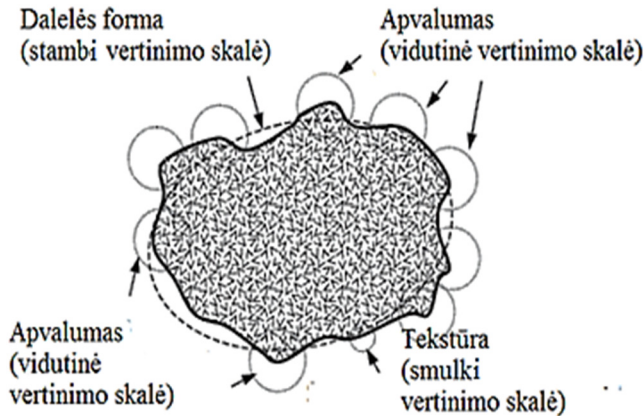
Tiek dvimatės, tiek trimatės erdvės formulės su tam tikru patikimumu įvertina dalelę kaip trimatį kūną, tačiau atskirais atvejais darbo supaprastinimui pakanka taikyti dvimatės erdvės formules (Šlečkuvienė 2013). Dvimatės erdvės formules taikyti yra žymiai paprasčiau. Trimatės erdvės formulių taikymui reikia papildomų tyrimų, kas tiesiogiai padidina dalelės geometrinių matavimų kiekį esant skirtingiems dalelės tyrimų kampams ir projekcijoms plokštumoje.

Dvimatės ir trimatės erdvės morfologiniai parametrai gali būti nustatomi naudojant skirtingus programinius paketus arba metodikas įvertinančias: dalelių morfologinius parametrus (Charpentier *et al.* 2013; Montenegro *et al.* 2013; Roussillon 2009; Mollon, Zhao 2013), statistinius parametrus (Alava *et al.* 2006), klasifikaciją (Blott, Pye 2008), kiekybinius parametrus (Tafesse *et al.* 2013), poras tarp grunto dalelių (Sokolov *et al.* 2007), automatinį didinimą (Graham *et al.* 2005); automatinį dalelių aptikimą (Detert, Weitbrech 2012).

1.2.1. Morfoloġinių parametų nustatymas geometrinu metodu

Morfologiniai parametrai dvimatės ir trimatės erdvės atveju, teoriškai gali būti nustatomi trimis skirtingomis vertinimo skalėmis. Šios trys skalės skirstomos pagal dydį į (1.4 pav.):

- a) stambi vertinimo skalė;
- b) vidutinė vertinimo skalė;
- c) smulki vertinimo skalė.



1.4 pav. Dalelių morfologinių parametų nustatymo skalės (Mitchell, Soga 2005)

Fig. 1.4. Particles morphology parameters determination scales

(Mitchell, Soga 2005)

Stambioje skalėje yra vertinami šie morfologiniai parametrai:

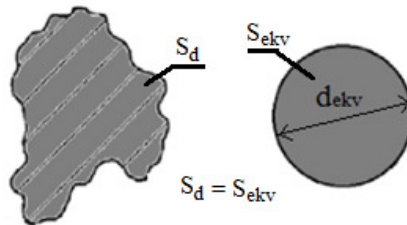
- a) dalelės forma;
- b) dalelės pailgumas (Žurauskienė *et al.* 2010);
- c) dalelės plokštumas;
- d) dalelės stambumas;
- e) dalelės apskritumas;
- f) dalelės plotas.

Vidutinėje skalėje vertinamas dalelės apvalumas (apzulinimas), smulkioje – dalelės paviršiaus ypatumai (tekstūra), kurie apibūdinami dalelės paviršiaus šiurkštumu, lygumu, galimomis mechaninių ir cheminių poveikių pasekmėmis (Cavarreta 2009; James, Soga 2005; Rodriguez *et al.* 2008).

Žinant dalelės projekcijos plotą, apskaičiuojamas ekvivalentinis skersmuo $d_{ekv,2D}$. Ekvivalentinis skersmuo (1.5 pav.) yra dalelės ekvivalentinio apskritimo

skersmuo, kurio plotas S_{ekv} lygūs dalelės projekcijos plotui S_d (Rodriguez *et al.* 2008):

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4S_d}{\pi}} \quad (1.1)$$

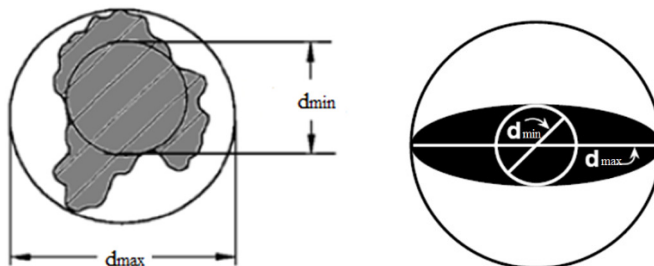


1.5 pav. Dalelės ekvivalentinio skersmens grafinis paaiškinimas (Rodriguez *et al.* 2008)

Fig. 1.5. Particle equivalent diameter graphical explanation (Rodriguez *et al.* 2008)

Ekvivalentinio dalelės skersmens nustatymo metodo taikymas nėra pakankamai tikslus, kai tiriamos dalelės yra pailgos. Šiuo atveju ekvivalentinis dalelės skersmuo netiksliai apibūdina dalelės tikrąjį dydį.

Sferiškumo parametras S_{2D} nusako tiriamos grunto dalelės formos atitikimo sferai laipsnį, t. y. apibūdinamas dalelės sferiškumas. S_{2D} yra apskaičiuojamas pagal tiriamos dalelės projekcijos didžiausio skersmens apskritimo besiliečiančio su dalelės išore skersmens ir įbrėžto į dalelę mažiausio apskritimo skersmens besiliečiančio su dalelės vidine kontūro dalimi (1.6 pav.) santykio kvadratinė šaknis.



1.6 pav. Dalelės didžiausias ir mažiausias skersmuo: kairėje dvimatis atvejis, dešinėje trimatis atvejis (Rodriguez *et al.* 2008; Cheel 2005)

Fig. 1.6. Particle maximum and minimum diameters: 2D approach (on left hand) 3D approach (on right hand); (Rodriguez *et al.* 2008; Cheel 2005)

Disertaciniame darbe sferiškumo parametro nustatymas atliktas pagal Riley (1941) formulę (Rodriguez *et al.* 2008; Dundulis, Gadeikis 2006; James, Soga 2005; Prušinskienė 2012):

$$S_{2D} = \sqrt{\frac{d_{min}}{d_{max}}}. \quad (1.2)$$

Tikrojo sferiškumo parametras apskaičiuojamas kaip sferos, kurios tūris yra lygus dalelės tūriui, paviršiaus ir dalelės paviršiaus plotų santykis (Wadell 1932). Pagal Wadel (1932) pasiūlytą sferiškumo parametro skaičiavimą, inžinerinėje praktikoje toks sferiškumo parametro skaičiavimo principas yra sunkiai pritaikomas.

Palengvinant uždavinį, sferiškumo parametą galima nustatyti tik dvimatėje erdvėje. Dvimatės ir trimatės erdvės sferiškumo parametro nustatymo rezultatų skirtumas siekia vos 5–10 % (Krumbein 1941; Riley 1941). Rezultatų skirtumas išauga tiriant plokščias daleles (Cavarreta 2009). Toks mažas dalelių sferiškumo parametų nustatymo nesutapimo procentas yra dėl krintačios dalelės ant tiriamojo stalo pozicijos, t. y. dalelė visada krenta tokioje pozicijoje, kur yra didžiausias jos svorio centras. Nukritusi dalelė lieka gulėti ant tiriamojo stalo su didžiausio pastovumo plokštuma (Feda 1982). Šiuo atveju dalelė guli ant stalo išorientuota taip, kad dalelės ilgiausias matmuo yra lygriagretus tiriamajam stalui, o dalelės statmenas matmuo tiriamajam stalui yra mažiausias. Taupant tyrimų laiko resursus, pasirinkta nustatyti grunto sferiškumo parametą tik dvimatėje erdvėje, kadangi skirtumas tarp dvimačio ir trimačio sferiškumo parametų nustatymo atveju tirtam gruntui yra mažas.

Kitas svarbus ir dažnai naudojamas morfologinis parametras – formos koeficientas ($K_{f,2D}$). Formos koeficientas yra apskaičiuojamas pagal į dalelės projekciją įbrėžtos elipsės trumposios ir ilgosios ašių santykį (Cil, Alshibli 2015; Sukumaran *et al.* 2006):

$$K_{f,2D} = \frac{a}{b}. \quad (1.3)$$

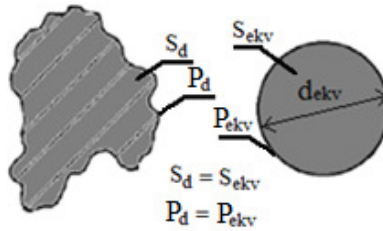
Pagal formos koeficientą dalelės klasifikuojamos į tris tipus (STIMAN 2010):

- a) izometrinės ($K_{f,2D} = 0,66-1,0$);
- b) anizometrinės ($K_{f,2D} = 0,66-0,1$);
- c) nuolaužų tipo ($K_{f,2D} < 0,1$).

Apskritimo parametras C_{2D} – tai apskritimo, kurio plotas S_{ekv} yra lygus dalelės projekcijos plotui S_d , perimetro P_{ekv} santykis su dalelės projekcijos perimetru P_d (1.7 pav.). C_{2D} įvertina dalelės atitikimo apskritimui laipsnį projekcijoje ir yra

pskaičiuojamas taikant Cox (1927) formulę (Dundulis, Gadeikis 2006; Das 2007; Cavarreta 2009):

$$C_{2D} = \frac{P_{ekv}}{P_d} = \frac{4\pi S_d}{P_d^2}. \quad (1.4)$$



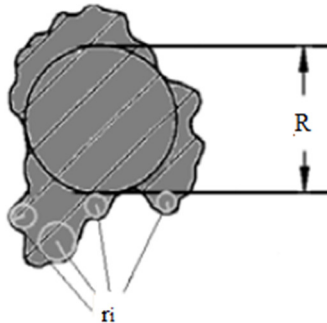
1.7 pav. Dalelės apskritumo parametro nustatymo grafinis paaiškinimas

(Rodriguez *et al.* 2008)

Fig. 1.7. Graphical explanation of particle circularity determination

(Rodriguez *et al.* 2008)

Apvalumo (apzulinimo) parametras Q_{2D} – tai dalelės projekcijos kampų kreivių spindulių r_i aritmetinio vidurkio santykis su didžiausiu į dalelės kontūrą įbrėžto apskritimo spinduliu R (1.8 pav.).



1.8 pav. Dalelės apvalumo (apzulinimo) parametro nustatymo grafinis paaiškinimas (Rodriguez *et al.* 2008)

Fig. 1.8. Graphical explanation of particle roundness determination

(Rodriguez *et al.* 2008)

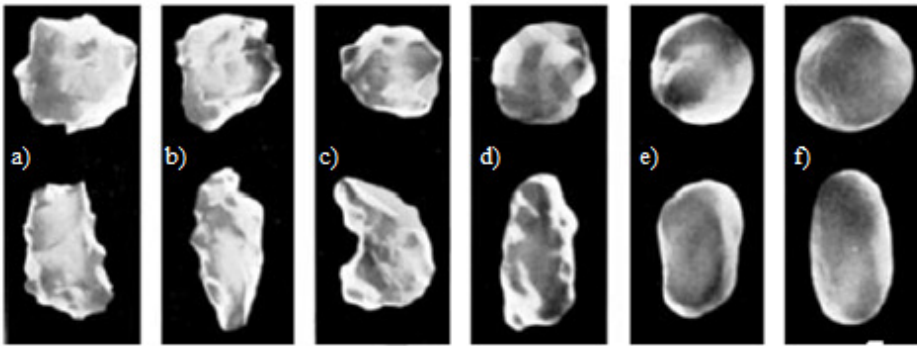
Q_{2D} apskaičiuojamas taikant Wadell (1932) formulę (Prušinskienė 2012; Das 2007; Cavarreta 2009; Rodriguez et al 2008):

$$Q_{2D} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R}}{N}. \quad (1.5)$$

Vertinant apvalumo (apzulinimo) parametą Q_{2D} reikia nepamiršti dalelės didinimo laipsnio, nes prie skirtingų didinimo dydžių gaunami skirtingi rezultatai. Esant mažam didinimo laipsniui gaunamas Q_{2D} yra didesnis nei esant didesniai didinimo laipsniui (Cavarreta 2009; Das 2007).

1.2.2. Morfologinių parametrų nustatymas dalelių palyginimo su etalonu metodu

Dalelių palyginimo su etalonu metodas tinkamiausias stambesnių nuolaužinių uolinių dalelių morfologiniams tyrimams. Taikant šį metodą, nustatomi sferiškumo ir apvalumo (apzulinimo) parametrai (Šlečkuvienė 2013). Šio metodo esmė – tiriamų dalelių formos palyginimas su skirtingais etalonais (1.9 ir 1.10 pav.).

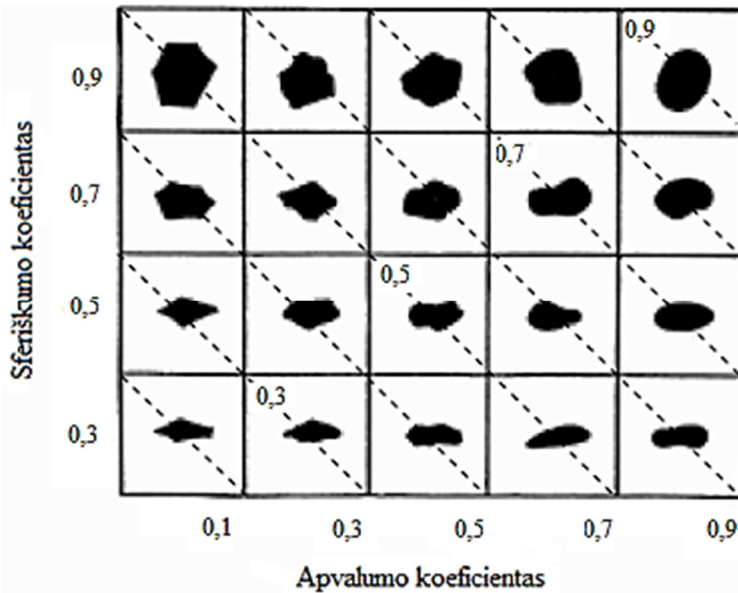


1.9 pav. Dalelių apzulinimo nustatymo etalonas (Powers 1953):

- a) – labai kampuotos; b) – kampuotos; c) – vidutinio kampuotumo;
- d) – vidutinio apvalumo; e) – apvalios; f) – labai apvalios

Fig. 1.9. Graphical explanation of particle roundness determination (Powers 1953): a) – very angular; b) – angular; c) – medium angularity; d) – medium roundness; e) – round; f) – very round

Atliekant vizualų dalelių vertinimą, kiekviena dalelė yra lyginama su etalone pateiktais skirtingais dalelių tipais ir yra ieškoma mažiausio tiriamos dalelės nuokrypio nuo pateikto etalono dalelės šablono. Šiuo būdu nustatomas dalelės kampuotumas ir apvalumas arba kitaip tariant dalelės sferiškumo ir apvalumo (apzulinimo) koeficientai. Šio metodo rezultatai subjektyvūs ir mažiau patikimi, nes labai prikaluso nuo tyrėjo kvalifikacijos.



1.10 pav. Dalelių formos pagal sferiškumą ir apvalumą nustatymo etalonas (Krumbein, Sloss 1951; Cho *et al.* 2006)

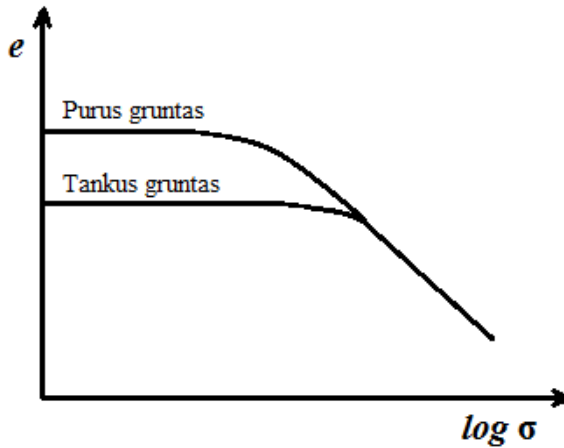
Fig. 1.10. Particle form determination according to sphericity and roundness coefficients (Krumbein, Sloss 1951; Cho *et al.* 2006)

Tiriant tas pačias daleles skirtingiems tyrėjams, gali būti nustatyti skirtingi rezultatai. Vienintelis šio metodo pranašumas prieš anksčiau išvardintus – tyrimų greitis. Disertaciniame darbe naudotas geometrinis dalelių morfologinių parametrų nustatymo metodas kartu su palyginimo su etalonu metodu. Naudojant abu metodus yra sumažinama tyrimų paklaida.

1.3. Kompresiniai spūdumo bandymai

Apkrovos veikiamas gruntas deformuojasi labiausiai dėl to, kad jis tankėja, mažėjant grunto porų tūriui. Ši grunto savybė vadinama suspaudžiamumu (Amšiejus *et al.* 2002). Dažniausiai literatūroje sutinkamas grunto spūdumo kreivės vaizdavimas yra pateiktas 1.11 paveiksle (1.11 pav.) (Uygar, Doven 2006; Amšiejus *et al.* 2002).

Tiriant grunto bandinių ospūdumu laboratoriniais metodais, esant mažiems įtempiams, pagal 1.11 paveiksle (1.11 pav.) pateiktą kreivę poringumo koeficientas nekinta ir tik apkrovus didesnės eilės įtempiais bandomą gruntą, poringumo koeficientas pradeda mažėti.



1.11 pav. Grunto poringumo koeficiento priklausomybė nuo įtempių
Fig. 1.11. Soil void ratio versus normal stress

Toks grunto spūdumo rezultatų vaizdavimas nėra patikimas dėl dviejų priežasčių:

1. Kontakto plokštumoje prie mažų vertikalinių įtempių, dėl netobulo grunto paviršiaus lygumo atsiranda grunto poslinkiai. Šių poslinkių atsiradimas užtikrina tinkamą gruntą spaudžiančio porinio akmens kontaktą su grunto bandiniu.
2. Jei yra bandomas molinis gruntas, kurio sudėtyje yra didelių dalelių, ruošiant tokį bandinį atsiranda šoninio paviršiaus netolygumai. Dėl šios priežasties, apkrovus gruntą vertikalia apkrova, gruntas plečiasi į šonus ir atsiranda vertikalus bandinio poslinkis.

Atliekant grunto pradinį apkrovimą, nukrovimą ir pakartotinį užkrovimą 1.11. paveiksle (1.11 pav.) pavaizduota kreivės forma yra teisinga tik pakartotinio užkrovimo atvaizdavimui. Tačiau net tarptautiniame odometrinio bandymo standarte (LST CEN ISO/TS 17892–5:2005) yra nekreipiama dėmesio į papildomus poslinkius atsirandančius dėl kontakto įtakos.

Kiti autoriai pateikia grunto spūdumo kreives nuo 5–10 kPa vertikalinių įtempių ribos (Sohby *et al.* 2005; Lupogo 2013; Comina *et al.* 2008; Tong, Yin 2011; Shipton, Coop 2012). Tai yra daroma dėl aukščiau išvardintų problemų atsirandančių tarp grunto ir jį spaudžiančio porinio akmens kontakto.

Atskirų grunto frakcijų spūdumo bandymų rezultatai parodė, kad spaudžiant atskiras grunto frakcijas gaunami skirtingi grunto spūdumo rezultatai, t. y. didžiausiu spūdumu pasižymi 1,18–0,6 mm grunto frakcija bei natūralios sudėties gruntas (Skuodis, Amšiejus 2011).

1.4. Grunto kerpamojo stiprio nustatymas tiesioginio kirpimo aparatu

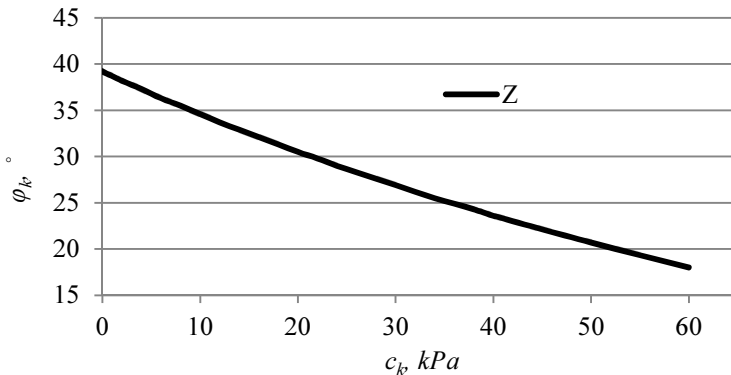
Atliekant grunto tiesioginio kirpimo bandymus, reikia gerai žinoti kokia metodika nukirpti grunto bandinius, kiek bandymų reikia atlikti, kad rezultatai būtų patikimi ir kokias apkrovas naudoti bandymo metu (Uchaipchat, Limsiri 2011; Rabbi *et. al.* 2011). Pasirenkant reikiamą bandymų kiekį, galima vadovautis Bond ir Haris (2008) pateiktu minimaliu tiesioginio kirpimo bandymų skaičiumi, kuris svyruoja nuo 2 iki 4. Kai atlikti tik 2 bandymai, vadovaujantis Mohr-Coulomb dėsnio (Rericha 2004; Shen *et. al.* 2012), galima apskaičiuoti grunto vidinės trinties kampo ir sankabumo reikšmes, išspręsdus lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \tau_{f,1} = \sigma_1 \cdot tg\varphi + c \\ \tau_{f,2} = \sigma_2 \cdot tg\varphi + c. \end{cases} \quad (1.6)$$

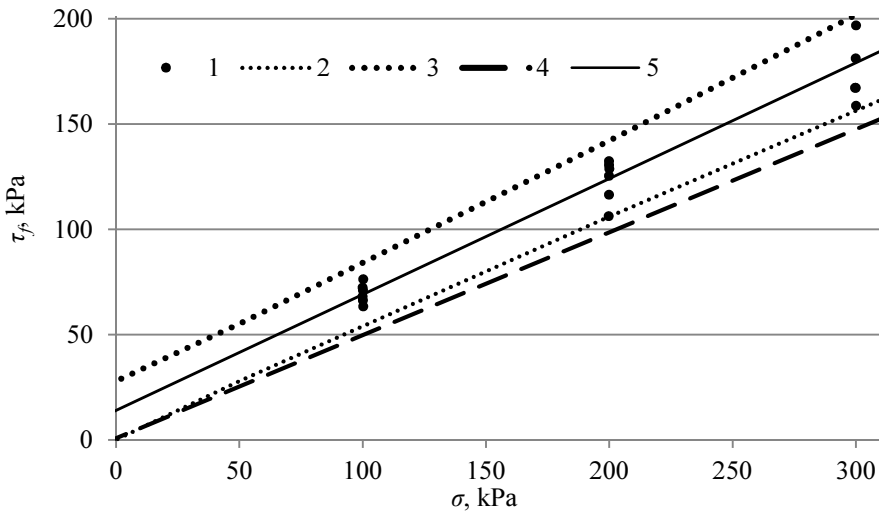
Naudojant tiek Mohr-Coloumb grunto stiprio kriterijų, tiek mažiausių kvadratų metodą (Skuodis, Norkus 2014), grunto pikinės kerpamojo stiprio reikšmės randamos pagal didžiausią τ/σ santykį. Esant didesniai negu 2 bandymų skaičiui, rezultatų apdorojimui taikomas mažiausių kvadratų metodas (Senatore, Iagnemma 2011). Kai yra atliktas tik vienas grunto kerpamojo stiprio bandymas, nustatyti vidinės trinties kampą ir sankabą galima naudojant tikimybinis metodus. Naudojant mažiausių kvadratų metodą galima apskaičiuoti ir charakteristines grunto kerpamojo stiprio vertes (Amšiejus *et al.* 2002; Amšiejus *et al.* 2006).

Disertaciniame darbe priimta, kad $tg\varphi$ ir c yra vienas nuo kito priklausomi dydžiai. Ši prielaida priimta, nes įvertinant kovariaciją tarp vidinės trinties kampo ir sankabumo reiškia, kad skaičiuojant pamato laikomosios galios stiprumo atsargą Z pagal LST EN 1997-1 (2006), esant dideliame vidinės trinties kampui ir mažam sankabumui bus užtikrinama ta pati laikomosios galios atsarga Z (Užpolevičius 2006), kaip ir esant mažam vidinės trinties kampui ir dideliame sankabumui (1.12 pav.)

Mažiausių kvadratų metodu nubraižomas kerpamojo stiprio grafikas ($t_\alpha = 0,95$), kuriame yra pateikiamos kerpamojo stiprio vertės, vidutinės vertės, pasikliautinių intervalų apatinė ir viršutinė riba ir charakteristinės grunto kerpamojo stiprio vertės (1.13 pav.).



1.12 pav. Laikomosios galios atsargos skaičiavimas su skirtingais φ_k ir c_k
 Fig. 1.12. Bearing capacity calculation according to different φ_k and c_k

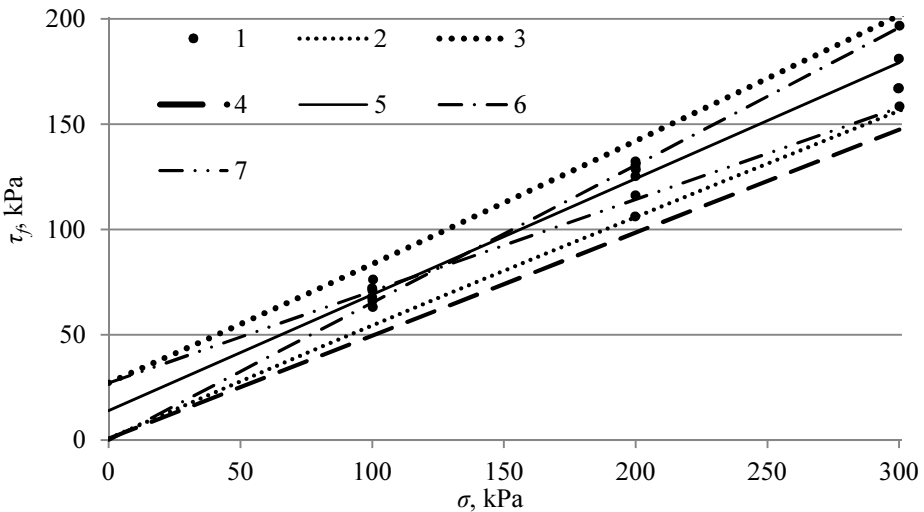


1.13 pav. Kerpamojo stiprio grafikas: 1 – pikinės kerpamojo stiprio reikšmės, 2 – apatinė pasikliautinių intervalų riba, 3 – viršutinė pasikliautinių intervalų riba, 4 – charakteristinės grunto kerpamojo stiprio vertės, 5 – vidutinės grunto kerpamojo stiprio vertės

Fig. 1.13. Shearing strength graphic: 1 – peak shearing strength; 2 – lower confidence limit; 3 – upper confidence limit; 4 – characteristic shearing strength; 5 – mean shearing strength

1.13 paveiksle (1.13 pav.) pateiktos charakteristinės grunto kerpamojo stiprio vertės niekada nekerta apatinės pasikliautinių intervalų ribos. Charakteristinių verčių priartėjimas prie apatinės pasikliautinių intervalų ribos yra dėl to, kad apatinė pasikliautinių intervalų riba yra ne tiesė, o lenkta kreivė, kaip ir viršutinė

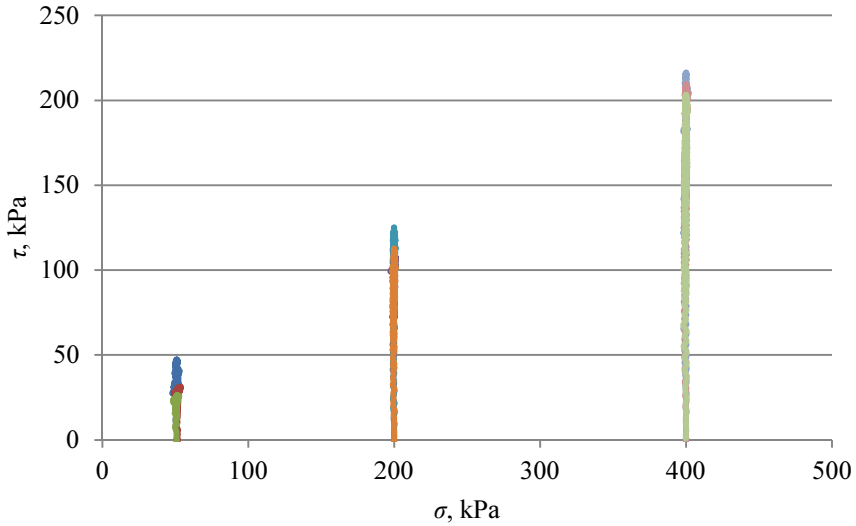
pasikliautinių intervalų riba. Apdorojant grunto kerpamojo stiprio rezultatus, priimtas tarp $\operatorname{tg}\varphi$ ir c kovariacijos momentas, kuris nėra lygus 0. Šiuo atveju skaičiuojant vidutines kerpamojo stiprio vertes grunto sankiba c_m ir vidinės trinties kampas φ_m yra tarpusavyje priklausomi dydžiai. Todėl c_m reikšmė gali įgauti didžiausią vertę, o $\operatorname{tg}\varphi_m$ mažiausią ir atvirkščiai (1.14 pav.).



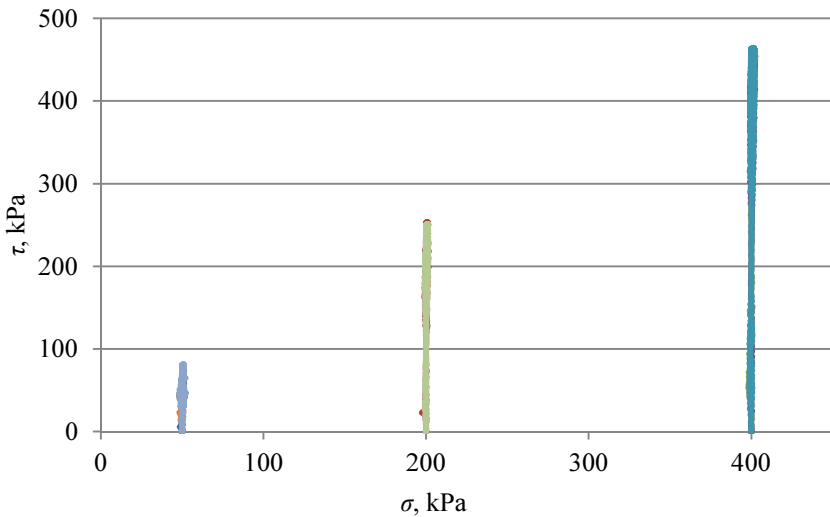
1.14 pav. Kerpamojo stiprio grafikas: 1 – pikinės kerpamojo stiprio vertės; 2 – apatinė pasikliautinių intervalų riba; 3 – viršutinė pasikliautinių intervalų riba; 4 – charakteristinės grunto kerpamojo stiprio vertės; 5 – vidutinės grunto kerpamojo stiprio vertės; 6 – $c_{m,\min}$ ir $\operatorname{tg}\varphi_{m,\max}$; 7 – $c_{m,\max}$ ir $\operatorname{tg}\varphi_{m,\min}$

Fig. 1.14. Shearing strength graph: 1 – peak shearing strength; 2 – lower confidence limit; 3 – upper confidence limit; 4 – characteristic shearing strength; 5 – mean shearing strength; 6 – $c_{m,\min}$ and $\operatorname{tg}\varphi_{m,\max}$; 7 – $c_{m,\max}$ and $\operatorname{tg}\varphi_{m,\min}$

Lietuvoje dažniausiai gruntas kerpamas kai įtempis bandinio viršuje ir horizontalus poslinkis yra pastovūs. Naudojant šią metodiką gaunami bendri pūraus (1.15 pav.) ir tankaus (1.16 pav.) smėlinio grunto kerpamojo stiprio grafikai. Šie grafikai praktiškai niekuo nesiskiria, tik esant tankiam gruntui reikia didesnės horizontalios jėgos jį nukirpti (Skuodis *et al.* 2013).



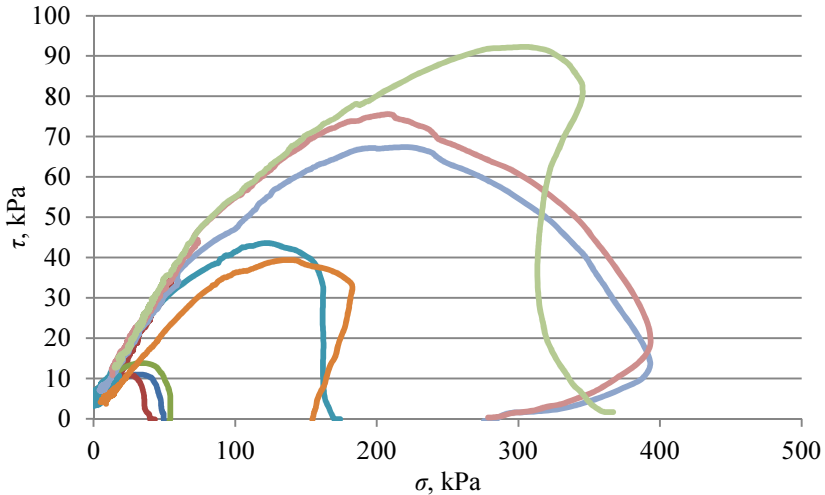
1.15 pav. Puraus smėlinio grunto kerpamojo stiprio grafikas
Fig. 1.15. Loose sand shearing strength path



1.16 pav. Tankaus smėlinio grunto kerpamojo stiprio grafikas
Fig. 1.16. Dense sand shearing strength path

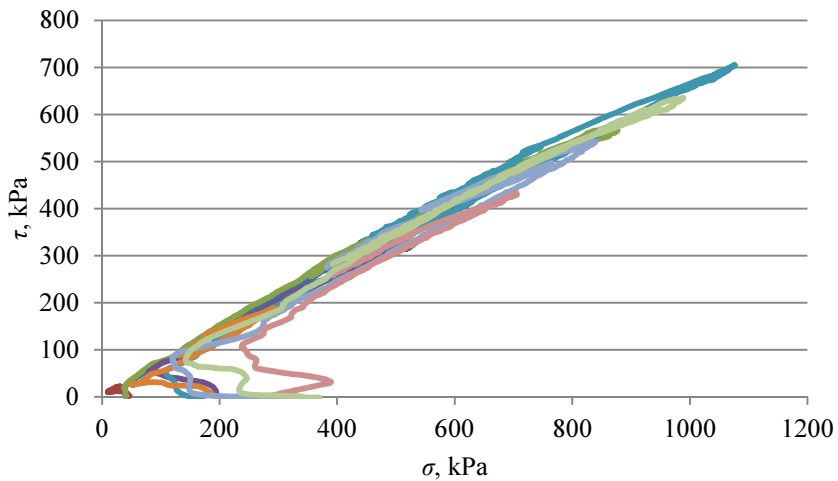
Kerpant gruntą prie pastovaus grunto tūrio ir horizontalaus poslinkio, kirpimo įtempių trajektorija skiriasi nuo pateiktų 1.15 ir 1.16 paveiksluose (1.15–

1.16 pav.). Puraus ir tankaus grunto kirpimo įtempių grafikai pateikti 1.17 ir 1.18 paveiksluose (1.17–1.18 pav.) (Skuodis *et al.* 2013).



1.17 pav. Puraus smėlinio grunto kerpamojo stiprio grafikas

Fig. 1.17. Loose sand shearing strength path



1.18 pav. Tankaus smėlinio grunto kerpamojo stiprio grafikas

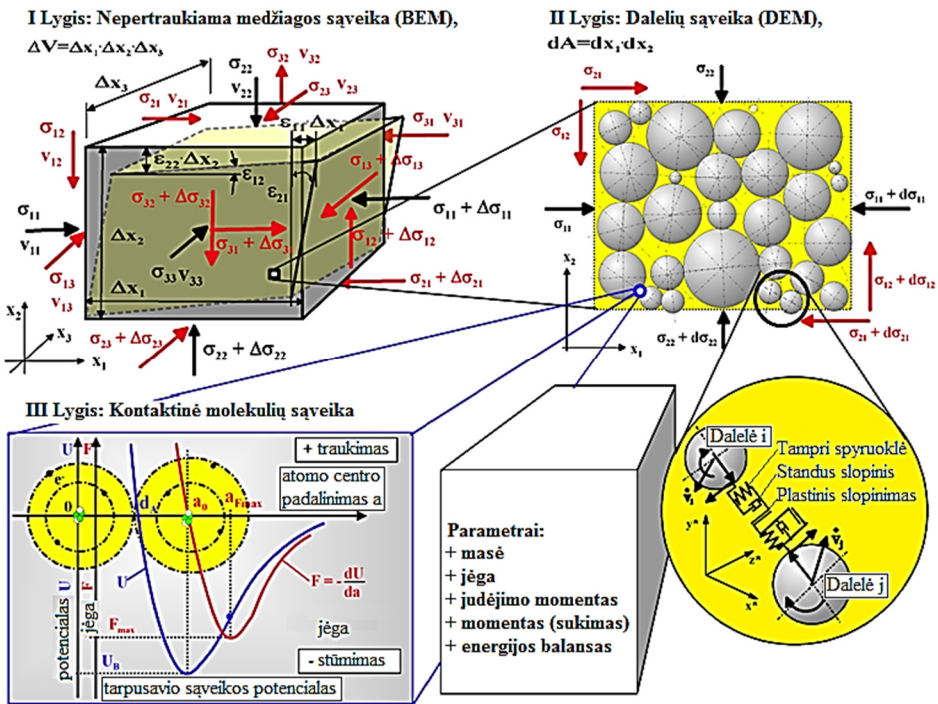
Fig. 1.18. Dense sand shearing strength path

Grunto kirpimo grafikai esant pastoviam tūriui priklausomai nuo kerpamo grunto tankio turi skirtingą įtempių kitimo trajektoriją. Kerpamas purus gruntas (1.17 pav.) iš pradžių tankėja, pasiekęs kritinę tankį – nusikerpa. Tankaus grunto

kirpimo atveju (1.18 pav.) kerpamas gruntas purenasi ir pasiekęs kritinį tankį nusikerpa. Kerpant itin tankius gruntuos kartais neįmanoma pasiekti kritinio kirpimo tankio dėl bandymą atliekančios įrangos ribojimų, t. y. pasiekiamas didžiausia leistina vertikalios apkrovos vertė.

1.5. Skaitinis grunto modeliavimas

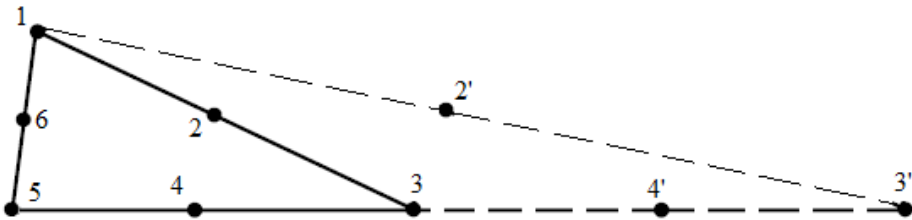
Disertaciniame darbe skaitiniam modeliavimui naudojamas baiginių elementų metodas (BEM) ir diskrečiųjų elementų metodas (DEM). BEM yra plačiai taikomas tiek konstrukcijų projektavime, tiek grunto elgsenos modeliavime, o DEM yra pakankamai naujas ir ne tiek išvystytas skaitinis metodas, kuris taikomas tikslesniam medžiagų elgsenos modeliavimui. DEM reikalauja nepalyginamai daugiau kompiuterinių resursų bei pradinių parametrų lyginant su BEM. BEM gauti rezultatai yra naudotini DEM modeliavimo rezultatų patikrai. Šių metodu grafiniai modeliai pateikti 1.19 paveiksle.



1.19 pav. Skaitinio modeliavimo metodų grafiniai modeliai
 Fig. 1.19. Graphical schemes for methods of numerical modeling

1.5.1. Grunto modeliavimas baigtinių elementų metodu

Baigtinių elementų metodo teoriniai pagrindai sudėtingi, bet BEM leidžia rasti apytikrą sprendinį iš karto – netaikant iteracijų. Disertaciniame darbe naudojama BEM programa „PLAXIS 3D Foundation“ (Vitale, Skuodis 2013). Pagrindinis šios programos trūkumas – negalima sumodeliuoti didelių grunto poslinkių (Zienkewicz, Taylor 2009; Schweiger 2005; Alkasawneh *et al.* 2008; Schweiger, Peschl 2005), ypač lokalesiose vietose (1.20 pav.). Jei baigtinio elemento vieno iš taškų poslinkis yra didesnis nei viso baigtinio elemento dydis, tuomet modeliuojant gruntą traktuojama, kad gruntas suiro arba pradėjo byrėti.



1.20 pav. Baigtinių elementų taškų poslinkiai
Fig. 1.20. Finite elements points displacements

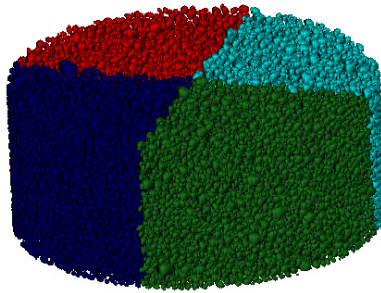
Iš dalies ši problema išsprendžiama sukuriant netaisyklingų formų ir nevienodų matmenų baigtinius elementus, t. y. tam tikrose vietose yra sutankinamas baigtinių elementų dalinimas arba galima įvertinti geometrinį netiesiškumą (Markauskas 2003). Dėl aukščiau išvardintų priežasčių, modeliuojant odometrinį grunto spūdumo bandymą BEM taikymas yra galimas.

1.5.2. Grunto modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu

Diskrečiųjų elementų metodas (DEM) – vienas iš skaitinių metodų, kuris skirtas nagrinėti didelio kiekio dalelių sistemos elgsenai. Metodas pirmą kartą pritaikytas Cundall ir Strack (1979) naudingųjų iškasenų elgsenai tirti. Nors DEM glaudžiai susijęs su klasikiniu molekulinės dinamikos metodu, nuo šio jis skiriasi dalelės laisvės laipsnių skaičiumi, sąlyčio su gretimomis dalelėmis dėsniais ir sudėtinga nagrinėjamų dalelių pavidalo forma. Vystantis skaičiavimo technikai šių uždavinių algoritmai tapo prieinami vieno procesoriaus kompiuteriams, kurie geba nagrinėti pakankamai didelio kiekio dalelių sistemas. Šiandien DEM tampa visuotinai pripažintu veiksmingu būdu spręsti inžinerijos problemas tokiose srityse, kuriose naudojamos dispersinės ir nevienalytės medžiagos. DEM metodas ypač plačiai taikomas nagrinėti dalelių srautus, miltelinių medžiagų apdirbimo technologijas, naudingųjų iškasenų mechaniką, atskirus trąšų gamybos etapus ir kt. DEM metodas leidžia modeliuoti tankias

dalelių sistemas kaip vientisą dalelių terpę. Vis dėlto, diskrečiųjų elementų metodas yra reiklus skaičiuojamiesiems ištekliams, o tai riboja arba skaitinio eksperimento trukmę arba sistemos dalelių skaičių.

Praktinei DEM pagrindu formuluotų uždavinių realizacijai, naudojamos įvairios techninės priemonės. Tarp jų – DEM programinė įranga, išnaudojanti lygiagrečių skaičiavimų galimybes (Balevičius *et al.* 2004). Naudojant lygiagrečių skaičiavimų algoritmus, atskirų kompiuterių procesoriai atlieka jiems skirtos modeliuojamo tūrio dalies skaičiavimus. Modeliuojamo tūrio sudalinimas skirtingiems procesoriams turi ir pranašumų ir trūkumų. Pagrindinis pranašumas – didelis skaičiavimo greitis. Tačiau šis pranašumas sąlyginis: jei modeliuojamas tūris padalinamas į per daug atskirų tūrių, tuomet tokiu atveju kompiuterių procesoriai daugiau skaičiavimo resursų išnaudoja duomenų apsikeitimui tarp procesorių, negu pačiam uždavinio sprendimui. Odometrinio spūdumo bandymo skaitinio realizavimo principas – sudalinti modeliuojamą tūrį į atskirus tūrius ir priskirti juos skirtingiems procesoriams (1.21 pav.).

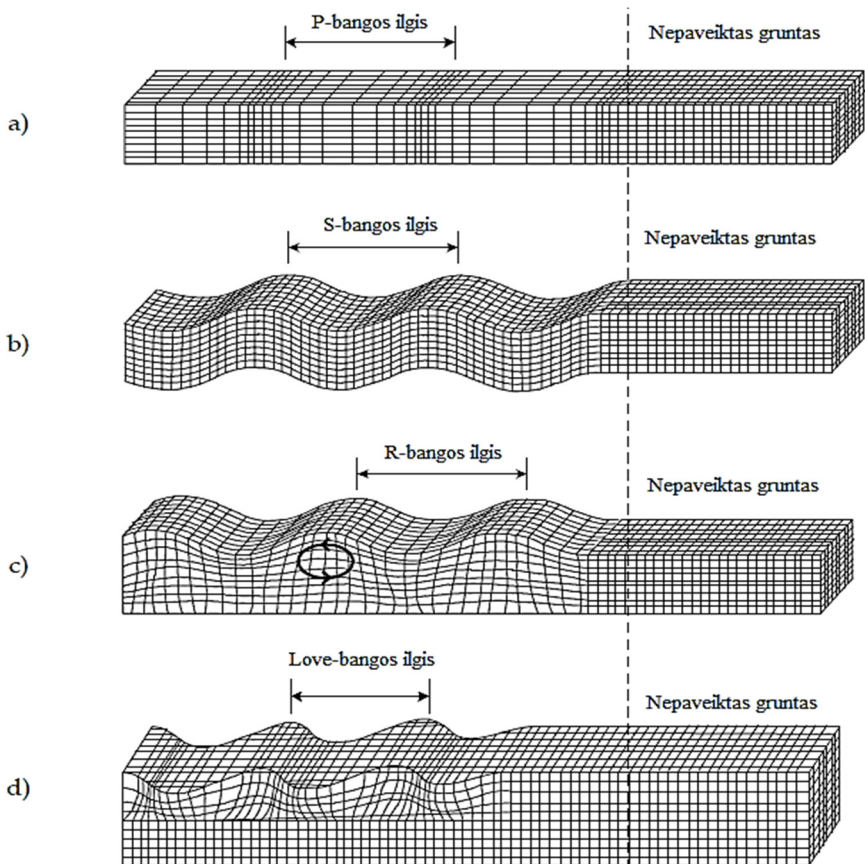


1.21 pav. Modeliuojamo odometro dalinimas į atskirus tūrius (Skuodis *et al.* 2014)

Fig. 1.21. Example of simulation process in cluster (Skuodis *et al.* 2014)

Taikant lygiagrečiųjų skaičiavimų metodą, skirtingais laiko tarpais kiekviename tūryje yra nevienodas modeliuojamų dalelių skiačius, nes judėdamos dalelės gali atsirasti kitame tūryje. Tokiu atveju, skirtingi procesoriai skaičiuoja nevienodus dalelių kiekius. Laiko tarpas, po kurio reikia atlikti dalelių pozicijų, greičių ir jėgų perskaičiavimą yra parenkamas pagal Rayleigh laiko perskaičiavimo žingsnį.

DEM Rayleigh laiko perskaičiavimo žingsnis yra parenkamas pagal bendrąsias grunte sklindančias vibracijas. Grunto vibracijos yra techninis terminas, kuris dažniausiai naudojamas apibūdinant sukeltų grunto dalelių atitinkamų greičių virpesius grunte. Grunto vibracijos yra susijusios su skirtingų bangų tipų ir kryptių sklidimu grunte (1.22 pav.).



1.22 pav. Poslinkių grunte priklausomybė nuo skirtingų bangų tipų: a) grunte sklindanti išilginė banga, b) grunte sklindanti skersinė banga, c) grunte sklindanti Rayleigh banga ir d) grunte sklindanti Love banga (Deckner 2013)

Fig. 1.22. Displacement characteristics of different wave types: a) P-wave, b) S-wave, c) R-wave, d) Love-wave (Deckner 2013)

Svarbiausias principas modeliuojant daleles DEM – dalelės būdamos tarpusavio kontakte turi išlikti pakankamą laiko tarpą, kad kontakto metu atsiradusios smūgio bangos ilgis nukeltų per visą modeliuojamos dalelės tūrį, taip pat labai svarbu yra perskaičiuoti dalelių pozicijas, greičius ir kontaktų jėgas pakankamai dažnai, kad nebūtų neįvertinti galimi dalelių tarpusavio kontaktai dėl per didelių laiko tarpų (Jensen *et al.* 2014). Laiko žingsnis, lemiantis skaičiavimų atlikimo dažnį, apskaičiuojamas pagal Rayleigh formulę:

$$T_R = \frac{\pi R \left(\frac{\rho}{G}\right)^{\frac{1}{2}}}{0,1631 \cdot \nu + 0,8766} \quad (1.7)$$

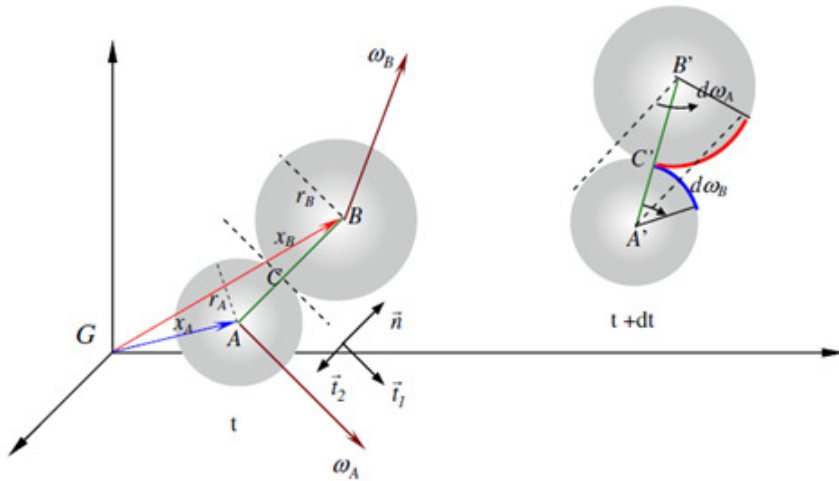
Reikia atkreipti dėmesį, kad 1.7 formulėje įrašomas ne bet koks dalelės spindulys, bet mažiausios modeliuojamos dalelės. Disertaciniame darbe laiko perskaičiavimo žingsnis yra apskaičiuojamas pagal Hertz (1882) formulę:

$$T_H = 2,87 \left(\frac{\frac{(v_i \rho)^2}{2v_i \rho}}{\frac{R_{min}^2}{2R_{min}} \frac{E_p^2}{2E_p(1-\nu^2)} v_{ij}} \right)^{0,2} \quad (1.8)$$

Siekiant užtikrinti rezultatų patikimumą, 1.8 formulėje apskaičiuotas laiko perskaičiavimo žingsnis T_H papildomai mažinamas ir gaunamas tikrasis laiko žingsnis Δt :

$$\Delta t = \frac{T_H}{10} \quad (1.9)$$

Dalelių pozicijų ir kontaktų jėgų pasikeitimas pagal apskaičiuotą modelavimo algoritmo perskaičiavimo žingsnį Δt yra pateiktas 1.23 paveiksle (1.23 pav.).



1.23 pav. Dalelių kontaktų ir naujų pozicijų skaičiavimas pasirinktu laiko žingsniu (Belheine *et al.* 2009)

Fig. 1.23. Particles contacts and new positions calculation at time t and Δt (Belheine *et al.* 2009)

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus tiriamų gruntų inžinerinių geologinių sąlygų, morfologinių parametrų, eksperimentinių ir skaitinių bandymų apžvalgą galima padaryti tokias išvadas:

1. Holoceno amžiaus jūrinės nuogulos (mIV) esančios bangų skalaujamoje zonoje dažniausiai pasižymi vienodo dydžio ir apvalumo grunto dalelėmis.
2. Lyginant tarpsusavyje tirtų gruntų granulimetrinės sudėties kreives, Klaipėdos pakrantės smėlinio grunto sudėtyje neaptikta mažesnių dalelių nei 0,063 mm. Klaipėdos pakrantės smėlinis gruntas pasižymi vienoda sankloda ir vidutinio rupumo grunto dalelėmis.
3. Tiriant purių gruntų spūdumo elgseną kompresiniu aparatu, spūdumo rezultatai priklauso nuo kontakto plokštumos tarp grunto ir jį spaudžiančio porinio akmens bei tuo metu gruntą veikiančių įtempių.
4. To paties grunto kerpamojo stiprio rezultatai priklauso nuo tiriamo grunto tankio, normalinių įtempių, bandymų skaičiaus ir bandymo metodikos.
5. Modeliuojant grunto spūdumo bandymą DEM, skaičiavimo greitis priklauso nuo modeliuojamų dalelių tankio, dalelių diskretinio modelio formos (sferų skaičiaus aprašančių vieną dalelę) ir jų kiekio.

Atsižvelgus į padarytas išvadas, šiame darbe numatoma patobulinti grunto eksperimentinius spūdumo ir tiesioginio kirpimo bandymus bei skaitinį DEM metodą grunto spūdumo modeliavimui. Šiam tikslui pasiekti numatyti tokie uždaviniai:

1. Atlikti morfologinių parametrų nustatymo tyrimus bei eksperimentinius ir skaitinius bandymus, atlikti rezultatų palyginimą bei suformuluoti principus racionalaus dalelių diskretinio modelio sudarymui.
2. Patobulinti grunto spūdumo bandymo metodiką ir pritaikyti eksperimentiniuose grunto spūdumo bandymuose.
3. Nustatyti grunto tiesioginio kirpimo netikslumus ir patobulinti grunto kerpamojo stiprio nustatymo metodiką. Nustatyti įtempių būvio ir bandymų skaičiaus įtaką grunto kerpamojo stiprio rezultatams.
4. Sumodeliuoti smėlinio grunto spūdumo bandymą skaitiniais BEM ir DEM metodais. Palyginti gautus rezultatus su eksperimentiniais.
5. Nustatyti racionalų sferų kiekį, reikalingą sudaryti grunto dalelės diskretiniam modeliui ir grunto spūdumu elgsenos modeliavimui DEM.

2

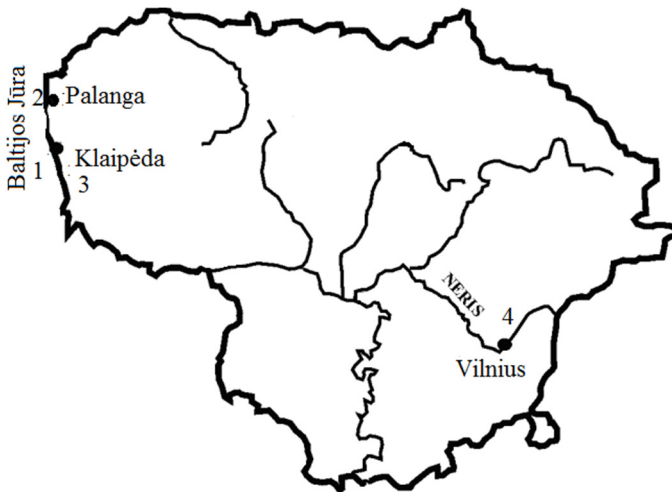
Grunto elgsenos parametrų eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai

Smėlinius gruntus sudarančių mineralų atskirų dalelių ir uolienuų nuolaužų ir / arba nuotrupų formos apibūdinimas suprantamas kaip jų išorinės išvaizdos charakterizavimas. Nuolaužinių ir / arba nuotrupinių dalelių išvaizdos apibūdinimas vadinamas morfologija. Tiriant dalelių išvaizdą, nagrinėjami šie pagrindiniai morfologiniai parametrai – dalelių formos koeficientas K_f ir jų paviršiaus pobūdžio ypatumai, t. y. dalelių sferiškumas, apvalumas, šiurkštumas ir kampuotumas. Morfologinių parametrų nustatymui atliekami morfometrijos ir morfoskopijos tyrimai: dalelių formos tyrimas vadinamas morfometrija, paviršiaus – morfoskopija (Prušinskienė 2012). Šiame skyriuje kontaktinė molekulių sąveika nenagrinėta ir apsiribota tik BEM ir DEM.

Skyriaus tematika paskelbta penkiolika autoriaus straipsnių (Skuodis, Amšiejus 2011; Skuodis, Kelevišius 2011; Skuodis 2011; Skuodis, Kavrus 2012; Kavrus, Skuodis 2012; Skuodis, Norkus 2012; Martinkus *et al.* 2012; Skuodis *et al.* 2013; Skuodis *et al.* 2013; Skuodis, Šlečkuvienė 2013; Šlečkuvienė, Skuodis 2013; Skuodis, Šlečkuvienė 2014; Skuodis, Norkus 2014; Skuodis, *et al.* 2014; Skuodis, Tamošiūnas 2014).

2.1. Tirtų gruntų granuliometrinė sudėtis

Disertaciniame darbe realaus smėlinio grunto pavyzdžių parinkimas darbui su mikroskopu neatsitiktinis. Nagrinėti grunto pavyzdžiai reprezentuoja skirtingas dūlėjimo aplinkas (2.1 pav.). Atlikta tirtų gruntų palyginamoji analizė, kurios pagrindu atrinktas vienas grunto tipas. Šiam grunto tipui sudarytas sudarytas diskretinis modelis, skaitiniais metodais ištirta grunto elgsena ir eksperimentiškai nustatytos mechaninės savybės.



2.1 pav. Smėlinių gruntų bandinių paėmimo vietos: 1 – Baltijos Jūros ties Klaipėdos pakrante; 2 – Baltijos Jūros ties Palangos pakrante; 3 – Klaipėdos kopų ties Pirmąja Melnrage; 4 – Neries pakrantės ties Valakampiais

Fig. 2.1. Location of sampling sites: 1 – Baltic sea–shore sand along Klaipėda; 2 – Baltic sea–shore sand along Palanga; 3 – Baltic sea–bank sand along Klaipėda; 4 – Neris river–shore sand

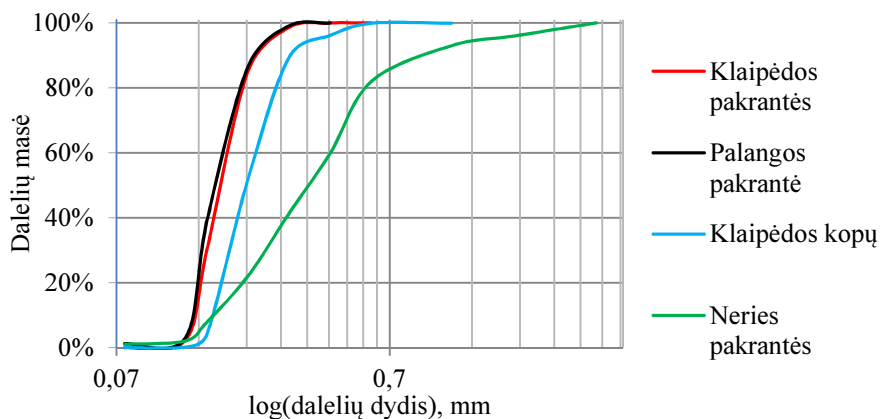
Atliekant sėjimo bandymus išskiriamos 9 smėlio frakcijos (2,00–1,18; 1,18–0,600; 0,600–0,425; 0,425–0,300; 0,300–0,212; 0,212–0,150; 0,150–0,125; 0,125–0,075; 0,075–0,063 mm), kitos stambesnės (>2,0 mm) bei smulkesnės (<0,063 mm). Didesnis frakcijų pasirinkimas leidžia tiksliau nustatyti atitinkamas frakcijas kiekį natūralios sudėties grunte, kas vėliau duoda galimybę tiksliau nustatyti vyraujančias dalelių formas tame grunte (Skuodis, Amšiejus 2011). Granuliometrinės sudėties nustatymo bandymo rezultatai pateikti 2.1 lentelėje ir 2.2 paveiksle. Naudoti sėjimo sietai atitinka BS ISO 3310-2:2013 standartą.

2.1 lentelė. Tiriamų smėlinių gruntų dalelių pasiskirstymas pagal frakcijas (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Table 2.1. Fractions of investigated sands particles (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Frakcijos sieto akutės dydis, mm	Smėlio kiekis ant sietų procentais nuo bendros sijotos masės, %			
	Klaipėdos pakrantės	Palangos pakrantės	Klaipėdos kopų	Neries pakrantės
>2,00	–	–	–	3,32
2,00–1,18	0,001	–	0,1	9,74
1,18–0,600	1,33	–	3,72	24,61
0,600–0,425	13,57	0,85	6,80	42,40
0,425–0,300	55,07	12,67	37,62	9,46
0,300–0,212	27,73	47,54	47,66	6,53
0,212–0,150	2,20	35,88	3,87	2,15
0,150–0,125	0,05	1,75	0,13	0,97
0,125–0,075	0,02	0,64	0,07	0,40
0,075–0,063	0,001	0,49	0,01	0,22
<0,063	–	0,15	0,02	0,20

Pagal 2.1 lentelę, 2.2 paveikslą (2.2 pav.) ir morfologinių parametru nustatymo duomenis, pasirinkta tirti Klaipėdos pakrantės smėlinį gruntą.

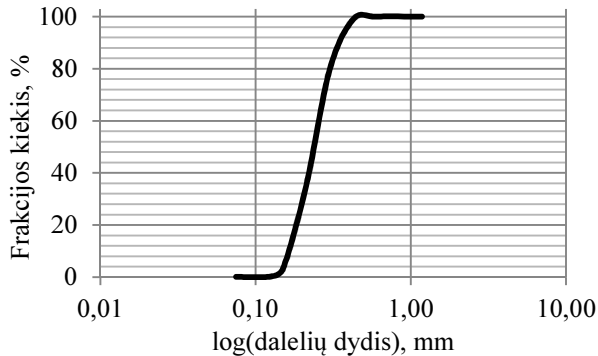


2.2 pav. Tiriamų gruntų granulimetrinės sudėties kreivės (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Fig. 2.2. Investigated soil grading curves (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Tiriamas Baltijos jūros pakrantės smėlinis gruntas ties Klaipėdos pakrante išdžiovinamas ir suskirstomas į atskiras frakcijas (LST EN ISO 14688-1:2007; LST

EN 1997-2, 2009). Sijojimui naudojami sietai atitinka BS ISO 3310–2:2013 standartą. Gruntą sudaro 1,34 % rupi, 96,38 % vidutinio rupumo ir 2,28 % smulki frakcija. Šio grunto granulimetrinė sudėtis pateikiama 2.3 paveiksle.

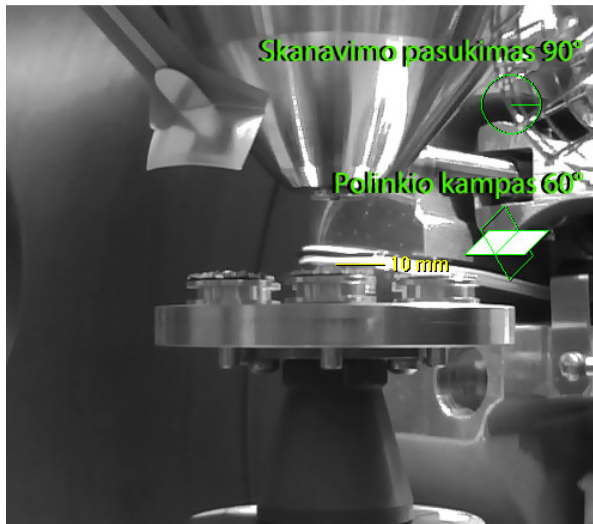


2.3 pav. Granulimetrinė sudėtis
Fig. 2.3. Soil grain size composition

Ties Klaipėdos pakrante paimtas gruntas yra natūraliai didesnio dalelių paviršiaus apgludrinimo laipsnio ir panašumo į rutulio (sferos) formą. Šio grunto pagrindinė sudėtis yra kvarcas (~85 %), žėrutis (6 %) ir kiti mineralai (Amšiejus *et al.* 2010). Eksperimentiškai nustatytas bandymuose naudojamo smėlinio grunto kietųjų dalelių tankis, $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ (Skuodis *et al.* 2013). Eksperimentiniuose bandymuose tirtas didžiausio pradinio poringumo smėlinis gruntas, kurio $e_o = 0,798$. Didžiausias poringumo koeficientas pasiekiamas pilant gruntą į prietaisą iš 1,5 cm aukščio. Visų eksperimentinių bandymų metu naudotas orasausis gruntas.

2.2. Morfologinių parametru nustatymas geometrinu metodu

Geometrinis metodas leidžia nustatyti grunto morfologinius parametrus pagal geometrinius atskiros dalelės matavimus (Prušinskienė 2012). Šie geometriniai matavimai nustatomi pagal dalelės projekcijos vaizdą nuotraukoje. Priklausomai nuo dalelės pozicijos, t. y. dalelės pasukimo ir polinkio kampo (2.4 pav.), galima gauti skirtingus tos pačios dalelės morfologinius parametrus (Skuodis, Šlečkuvienė 2014). Dažniausiai dalelė, kuri yra dedama ant tiriamojo stalo, nukrenta ties didžiausia plokštuma ir yra plokščios arba sferiškos formos (2.5 pav.).



2.4 pav. Grunto dalelių pasukimo ir polinkio kampai skenuojančio elektroninio mikroskopo kameroje (Skuodis, Norkus 2014)

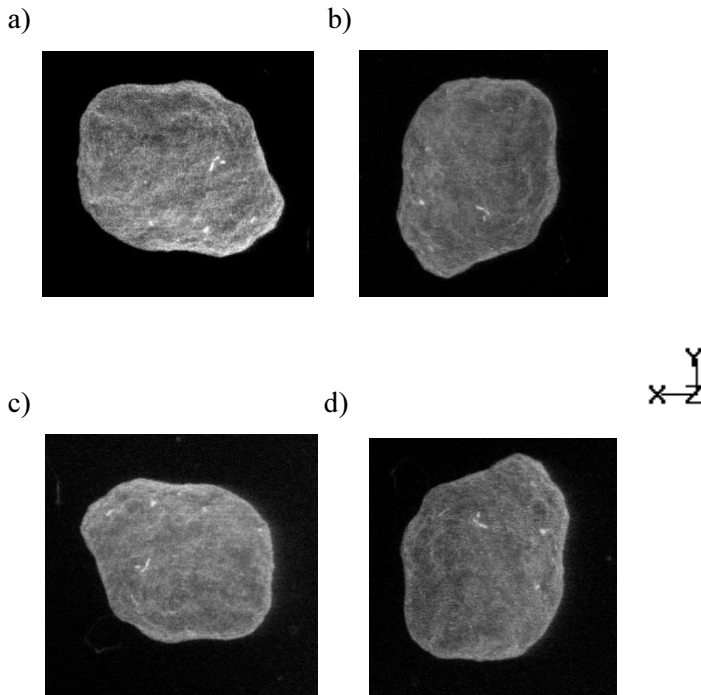
Fig. 2.4. Investigated sand particles tilt and rotation angles inside scanning electronic microscope (Skuodis, Norkus 2014)



2.5 pav. Plokščios (kairėje) ir sferiškos (dešinėje) dalelės forma (Prušinskienė 2012)

Fig. 2.5. Flat (on left hand) and spherical (on right hand) particle form (Prušinskienė 2012)

Grunto dalelių mikrostruktūros tyrimai atlikti naudojantis skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Atliekant tyrimus su šiuo prietaisu yra galimybė fotografuoti ir / arba filmuoti (Kavrus, Skuodis 2012). Siekiant nustatyti tiriamo grunto dalelių iškilumą/plokštumą (Prušinskienė 2012), grunto dalelės nufotografuojamos pasukant jas x ir y plokštumoje 0° ; 90° ; 180° ; ir 270° kampu (2.6 pav.).



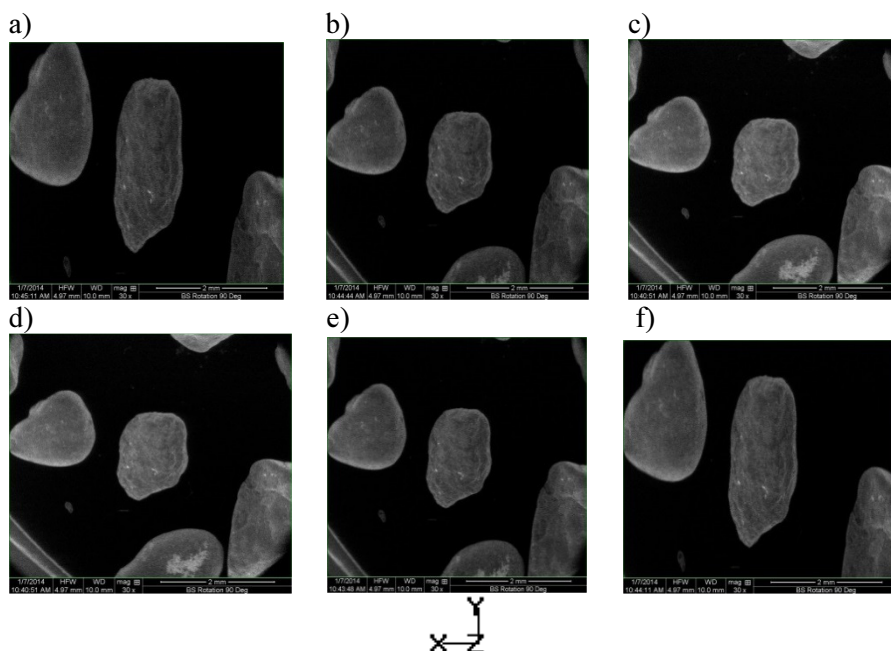
2.6 pav. Dalelių fotografavimas pasukant jas x ir y plokštumoje: a) pasukimas 0° ; b) pasukimas 90° ; c) pasukimas 180° ; d) pasukimas 270°

Fig. 2.6. Picture of particle from different rotation in x and y plane: a) rotation 0° ; b) rotation 90° ; c) rotation 180° ; d) rotation 270°

Nufotografavus grunto daleles esant skirtingiems pasukimo laipsniams (2.6 pav.), prie kiekvieno pasukimo laipsnio grunto dalelė fotografuojama iš skirtingų polinkio kampų (-60° ; -30° ; 0° ; 30° ; 60°) z ašies atžvilgiu (2.7 pav.), kad būtų galima nustatyti grunto morfologinius parametrus ne vien tik x ir y plokštumoje.

Nufotografavus atskiras grunto daleles, morfologiniai parametrai nustatomi naudojantis vaizdų analizės programa „STIMAN“. Remiantis 2.6 ir 2.7 paveiksluose (2.6–2.7 pav.) pateiktos dalelės vaizdais esant skirtingiems dalelės pasukimo ir polinkio kampams, nustatyti šios dalelės formos koeficientai $K_{f,2D}$ iš tirtų skirtingų pusių (2.2 lentelė).

Atskiros dalelės plotas S_d nustatomas pagal dalelių plotą nuotraukoje. Užimamas plotas matuojamas pikseliais, tuomet naudojant esamą dalelės vaizdo didinimo reikšmę, apskaičiuojamas dalelės plotas ir kiti morfologiniai parametrai.



2.7 pav. Dalelių fotografavimas pasukant jas z plokštumoje: a) polinkio kampas -60° ; b) polinkio kampas -30° ; c) polinkio kampas 0° ; d) polinkio kampas 30° ; e) polinkio kampas 60°

Fig. 2.7. Picture of particle from different tilt angle in z axis plane:
a) tilt angle -60° ; b) tilt angle -30° ; c) tilt angle 0° ; d) tilt angle 30° ;
e) tilt angle 60°

2.2 lentelė. Formos koeficiento priklausomybė nuo dalelės padėties

Table 2.2. Form coefficient dependence from particle position

Pasukimas x ir y plokštumoje, $^\circ$	Polinkio kampas z plokštumoje, $^\circ$	$K_{f,2D}$
0	-60	0,55
0	-30	0,83
0	0	0,79
0	30	0,83
0	60	0,56
90	-60	0,40

2.2 lentelės pabaiga
End of Table 2.2

Pasukimas x ir y plokštumoje, °	Polinkio kampas z plokštumoje, °	$K_{f,2D}$
90	-30	0,68
90	0	0,77
90	30	0,68
90	60	0,40
180	-60	0,56
180	-30	0,84
180	0	0,80
180	30	0,84
180	60	0,56
270	-60	0,40
270	-30	0,68
270	0	0,77
270	30	0,68
270	60	0,40

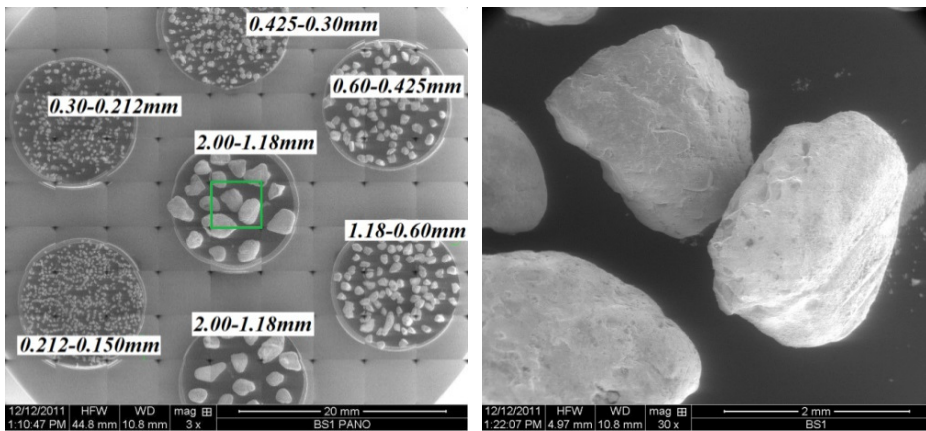
Tam tikrais atvejais, kai dalelės nufotografuojamos ne mikroskopu, esamas dalelių vaizdų nuotraukas galima panaudoti morfologinių parametų nustatymo tyrimui. Šiuo atveju, darant nuotrauką reikia fotografuoti ir matavimo liniuotę ar kitą žinomo matmens objektą, kad vėliau nuotraukoje išmatavus objekto ar liniuotės atstumą būtų aišku, kiek pikselių reikia tam atstumui užpildyti.

2.2.1. Grunto morfologinių parametų nustatymo ypatumai

Mikroskopiniai grunto dalelių tyrimai (Cheng *et. al.* 2009; Chang *et. al.* 2009; Salot *et. al.* 2009; Maeda *et. al.* 2009; Szarf *et. al.* 2011) nėra naujiena. Tačiau tiriant Lietuvos teritorijoje vyraujančius gruntus iki šiol nebuvo atliekamas pakankamo grunto sudarančių dalelių tyrimų kiekis ir jų tiesioginės įtakos mechaninėms savybėms tyrimų duomenų analizavimas. Pradedant kaupti Lietuvoje vyraujančių gruntų dalelių morfologijos duomenų bazes reikia nuspręsti, kokie iš nustatomų morfologinių parametų bus nagrinėjami.

Kaip minėta aukščiau, disertaciniame darbe morfologiniai parametrai yra nustatomi naudojantis vaizdų analizės programa „STIMAN“. Hipergenetinių

darinių įtaka morfologinių parametrų rezultatams (Prušinskienė 2012) nėra nagrinėjama. Vaizdų analizei skirta skaitmeninė programa neapsiriboja tik dalelių ir porų analize. Nuotraukos yra sukuriamos su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Fotografavimas yra imlus laikui procesas, pavyzdžiui kokybiškai nufotografuoti septynis skirtingus bandinius reikia apie 3 valandų. Panoraminės šių bandinių nuotraukos (2.8 pav.) nufotografavimas užtrunka nuo 5 iki 65 minučių (priklausomai nuo reikiamos kokybės). Panoraminė nuotrauka yra reikalinga, nes ji naudojama kaip vedlys, kad būtų galima orientuotis tarp tiriamų dalelių (matomas tyrėjo atskirų bandinių žymėjimas) ir būtų galima tiksliai žinoti fotografuojamų dalelių padėtį (2.8 pav.)

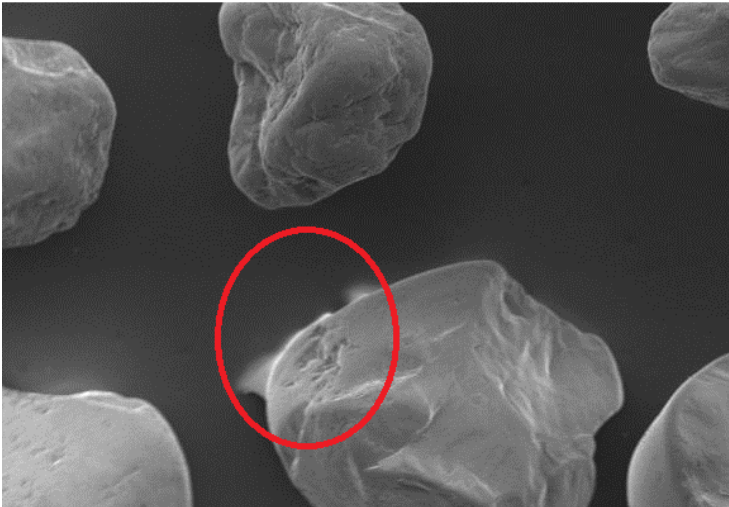


2.8 pav. Kairėje – panoraminė nuotrauka su bandinių numeracija, dešinėje – panoraminėje nuotraukoje pažymėtas padidintas vaizdas (Skuodis *et al.* 2014)

Fig. 2.8. Panoramic view with samples numeration (on left hand) and magnification of marked place in panoramic view (on right hand) (Skuodis *et al.* 2014)

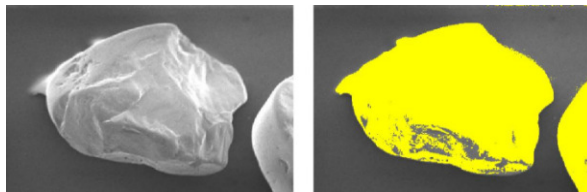
Tiriamų dalelių plotas nuotraukoje nustatomas pagal pikselius, t. y. pagal užimamą dalelių plotą pikseliais. Vėliau, žinant didinimo reikšmę, dalelės plotas perskaičiuojamas į mikrokvadratinus metrus. Analogiškai nustatomas ir dalelės perimetras. Tada apskaičiuojami morfologiniai parametrai. Analizuojant gautas nuotraukas (padarytas naudojantis SEM) susiduriama su keliomis žemiau išvardintomis problemomis.

Pirmoji problema – pačios dalelės medžiagos elektrinis krūvis. Dėl esamo dalelės krūvio, nuotraukoje gali aiškiai nesimatyti dalelės kontūro (2.9 pav.), kas vėliau apdorojant nuotrauką įtakoja rezultatų paklaidą.



2.9 pav. Dalelės krūvio įtaka nuotraukos kokybei (Kavrus, Skuodis 2012)
Fig. 2.9. Picture quality dependence from particle charge (Kavrus, Skuodis 2012)

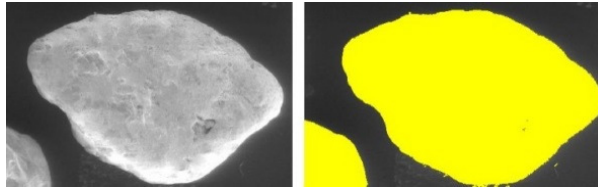
Ši problema gali būti išspręsta dviem būdais. Pirmasis – jei dalelė turi mažą krūvį, gerą nuotraukos kokybę su aiškiu dalelės kontūru galima pasiekti reguliuojant SEM kameroje esantį krūvį. Antrasis – reikia išimti dalelę iš mikroskopo ir neutralizuoti arba sumažinti turimą dalelės krūvį, po to vėl iš naujo pradėti fotografuoti ir tęsti procedūras aukščiau paminėtu pirmuoju būdu. Pirmoji problema būna aktuali apdorojant nuotraukas su vaizdų analizės programa „STIMAN“. Blogos kokybės nuotraukos pavyzdys pateikiamas 2.10 paveiksle (2.10 pav.). Šioje nuotraukoje aiškiai matyti, kaip naudojant šią programą negalima tiksliai nustatyti tiriamos dalelės kontūro. Dėl blogos kokybės nuotraukų apdorojimo sumažėja rezultatų patikimumas ir didėja rezultatų paklaida.



2.10 pav. Blogos kokybės nuotraukos: kairėje – vaizdas skenuojančio elektroninio mikroskopo kameroje, dešinėje – nuotraukos apdorojimas vaizdų analizės programa (Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 2.10. Low quality pictures: view of scanning electronic microscope (on left hand) and picture processing with view analysis program (on right hand) (Kavrus, Skuodis 2012)

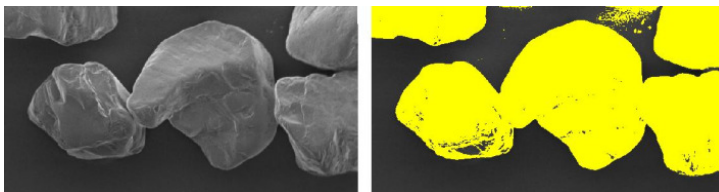
Geros kokybės nuotraukos pavyzdys pateikiamas 2.11 paveiksle (2.11 pav.). Šioje nuotraukoje aiškiai atskiriamas dalelės kontūras. Į dalelės viduje esančias ertmes (2.10–2.11 pav.) nekreipiama dėmesio, nes programoje „STIMAN“ yra galimybė jas užtušuoti.



2.11 pav. Geros kokybės nuotraukos: kairėje – vaizdas skenuojančio elektroninio mikroskopo kameroje, dešinėje – nuotraukos apdorojimas vaizdų analizės programa (Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 2.11. High quality pictures: view of scanning electronic microscope (on left hand) and picture processing with view analysis program (on right hand) (Kavrus, Skuodis 2012)

Antroji problema – blogai subertos dalelės, t. y. toks atvejis, kai dalelės tarpusavyje liečiasi (2.12 pav.). Jei 2.12 paveikslas (2.12 pav.) būtų tik nuotrauka, būtų galima ją laikyti kokybiška. Tačiau, apdorojant šią nuotrauką su vaizdų analizės programa „STIMAN“, negalima vienu metu išskirti atskirų dalelių, kai jos tarpusavyje liečiasi. Programa savarankiškai neatskiria skirtingų tarpusavyje besiliečiančių dalelių ir šiuo atveju programos rezultatų suvestinėje lentelėje būtų pateikiama, kad yra viena dalelė.

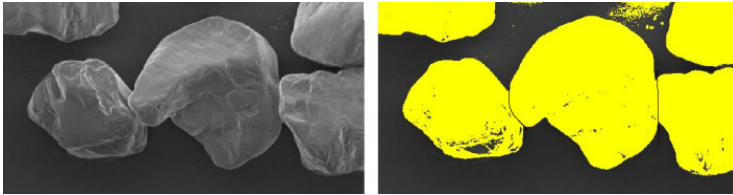


2.12 pav. Tarpusavyje besiliečiančių dalelių neišskyrimas: kairėje – vaizdas skenuojančio elektroninio mikroskopo kameroje, dešinėje – nuotraukos apdorojimas vaizdų analizės programa (Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 2.12. Contact between particles is not obtained automatically: view of scanning electronic microscope (on left hand) and picture processing with view analysis program (on right hand) (Kavrus, Skuodis 2012)

Tačiau yra galimybė rankiniu būdu atskirti daleles, nors tai yra tik apytikslis atskyrimo būdas. Šiuo atveju tokia nuotrauka laikoma nekokybiška ir visos

2.13 paveiksle (2.13 pav). matomos dalelės į skaičiavimus yra neįtraukiamos, nepaisant to, kad yra galimybė atskirti daleles tiek tiesia, tiek lenkta linija.

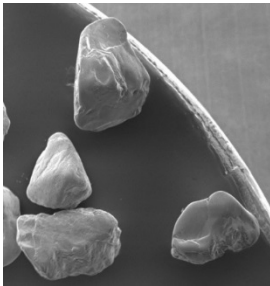


2.13 pav. Tarpusavyje besiliečiančių dalelių išskyrimas rankiniu būdu: kairėje – vaizdas skenuojančio elektroninio mikroskopo kameroje, dešinėje – nuotraukos apdorojimas vaizdų analizės programa (Kavrus, Skuodis 2012)

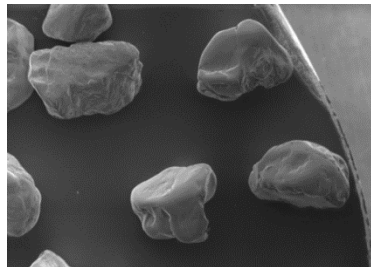
Fig. 2.13. Particle manual separating: view of scanning electronic microscope (on left hand) and picture processing with view analysis program (on right hand) (Kavrus, Skuodis 2012)

Trečioji problema – SEM fotografavimo srautas yra ganėtinai ribotas ir norint nufotografuoti visą bandinį esant kuo didesniam didinimui, reikia naudoti didesnę kiekį nuotraukų. Esant mažam dalelių kiekiui ir siekiant nufotografuoti visas apžiūrimas daleles tenka į nuotrauką visu savo plotu nepakliuvusias daleles fotografuoti dar kartą. Dėl šių priežasčių atsiranda tikimybė tą pačią dalelę nufotografuoti kelis kartus (2.14 pav.). 2.14 a) paveiksle apatinės dvi dalelės yra atsitiktinai dar kartą nufotografuotos ir matomos 2.14 b) paveikslo viršuje.

a)



b)

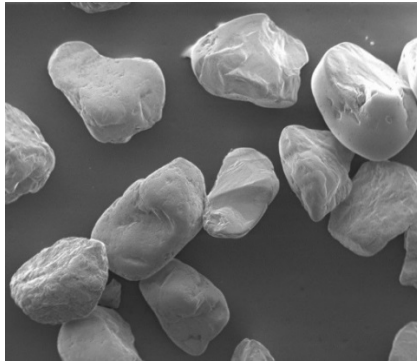


2.14 pav. Tikimybė nufotografuoti tas pačias daleles (Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 2.14. Probability to take a picture of a same particles (Kavrus, Skuodis 2012)

Vaizdų analizės programa „STIMAN“ geba atskirti vienodas daleles, jei jos būna vienoje nuotraukoje, bet jei jos yra atskirose nuotraukose, šios galimybės nėra. Kad į skaičiavimus nebūtų įtraukta vienodų dalelių, tyrimą atliekantis asmuo turi pasižymėti krupštumu ir pastabumu.

Išsami visų aukščiau išvardintų problemų visuma yra pateikiama 2.15 paveiksle (2.15 pav.). Šiuo atveju, į skaičiavimus galima įtraukti tik vieną dalelę (dalelė esanti 2.15 paveikslo (2.15 pav.) viršutinės dalies kairėje pusėje). Visos kitos dalelės į skaičiavimus neįtraukiamos dėl aukščiau paminėtų priežasčių. Taip pat, ruošiant duomenis skaitiniam DEM spūdumo modeliavimui, reikia įvertinti kol kas didelius laiko resursus, skiriamus kokybiškam morfologinių dalelių parametru nustatymui.



2.15 pav. Problemų visuma apdorojant nuotraukas: priimtinos kokybės dalelės yra viršuje, kairėje (Kavrus, Skuodis 2012)

Fig. 2.15. Formation of problems for picture process: acceptable quality particle is on left in top of picture (Kavrus, Skuodis 2012)

2.2.2 Geometriniu metodu nustatytų morfologinių parametru rezultatai

Morfologiniai parametrai geometriniu metodu nustatyti keturiems skirtingiems smėlinio grunto pavyzdžiams, išvardintiems 1 skyriuje. Prieš pradėdant morfologinių parametru nustatymą, visi grunto pavyzdžiai siojimo metodu išskirti į 9 frakcijas. Frakcijų išskyrimas atliktas dėl reikiamo minimalaus 33 dalelių vienoje frakcijoje kiekio. Tokiu būdu, 4 skirtingiems smėliniams gruntams morfologiniai parametrai nustatyti ištyrus po 297 skirtingas daleles, t. y. viso 1188 daleles. Natūralios sudėties vidutiniai morfologiniai parametrai yra lygūs grunto išsijotų frakcijų dalelių kiekių ant sietų, išreikštų procento dalimis, sandaugų su atitinkamų frakcijų morfologiniais parametrais sumai (Šlečkuvienė, Skuodis 2013). Dalelių mikroskopinio tyrimo rezultatai (įvertinus granulimetrinę sudėtį) pateikiami 2.3 lentelėje.

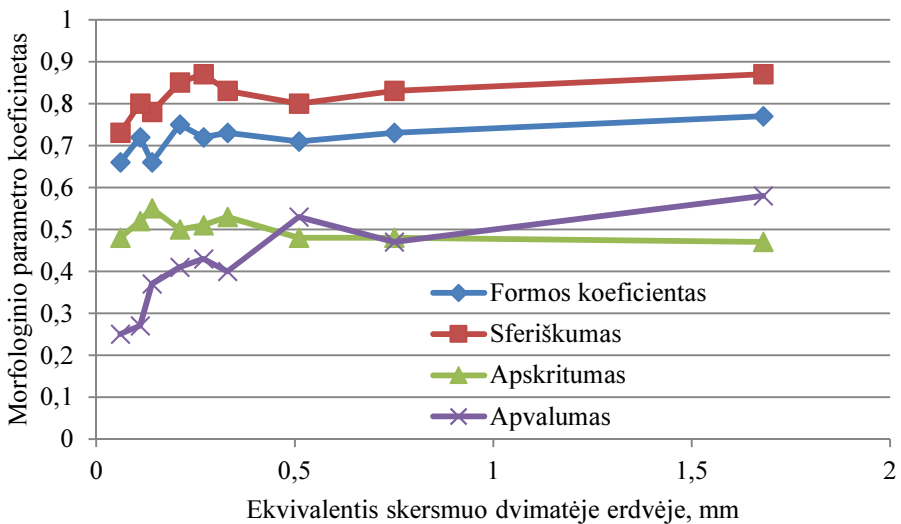
Pagal 2.3 lentelės duomenis ir tirtų gruntų granulimetrinę sudėtį, įvertinus skirtingus morfologinius parametrus ir jų vertes (Šlečkuvienė, Skuodis 2013), pasirinkta toliau tirti Klaipėdos pakrantės smėlinį gruntą. Šis gruntas pasirinktas dėl pakankamai apvalių grunto dalelių ir didelio ekvivalentinio skersmens. Klaipėdos

pakrantės smėlinio grunto morfologinių parametru kitimo priklausomybė nuo ekvivalentinio skersmens pateikta 2.16 paveiksle (2.16 pav.).

2.3 lentelė. Tirtų gruntų morfologiniai parametrai (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Table 2.3. Morphological parameters of investigated sands (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Gruntas	A_{2D} , mm ²	$d_{ekv,2D}$, mm	$K_{f,2D}$	S_{2D}	C_{2D}	Q_{2D}
Klaipėdos pakrantės	0,01122	0,340	0,702	0,836	0,515	0,410
Palangos pakrantės	0,05634	0,254	0,744	0,862	0,515	0,463
Klaipėdos kopų	0,104	0,335	0,728	0,853	0,499	0,280
Neries pakrantės	1,725	1,0	0,712	0,844	0,468	0,277



2.16 pav. Morfologinių parametru priklausomybė nuo $d_{ekv,2D}$

Fig. 2.16. Morphology parameters versus $d_{ekv,2D}$

Analizuojant 2.16 paveikslą (2.16 pav.), pastebima, kad praktiškai visų morfologinių parametru vertės didėjant ekvivalentiniam skersmeniui didėja. Šis morfologinių parametru didėjimas atsiranda dėl dviejų priežasčių:

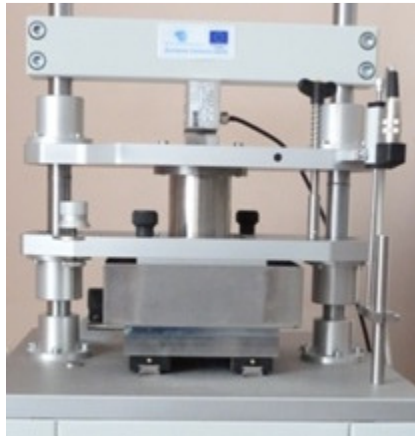
1. Esant didesniai dalelės skersmeniui natūraliomis grunto slūgsojimo sąlygomis, dalelių paviršius yra didesnio nūgludinimo laipsnio, pvz. dėl

bangų mūšos. Atskilę aštrūs kampai nuo didesnių dalelių sudaro mažas daleles, kurias aplinkos poveikio veiksniams yra sunkiau nugludinti;

2. Esant mažam didinimo laipsniui dalelės apvalumo koeficientas yra didesnis nei tos pačios dalelės apvalumo koeficientas apskaičiuotas prie didesnio dalelės vaizdo didinimo (Cavarreta 2009; Das 2007). Dėl šios priežasties, morfologiniai grunto parametrai tirti esant vienodam 40–ies kartų didinimo laipsniui.

2.3. Kompresiniai spūdumo bandymai su odometru

Kompresinis spūdumo bandymas yra atliekamas su universaliu ADS1/3 aparatu, su kuriuo esant poreikiui galima atlikti ir tiesioginio kirpimo bandymus. Bandy muose naudoto odometro žiedo skersmuo $D = 7,14$ cm, aukštis $H = 3,39$ cm (2.17 pav.).



2.17 pav. Universalus grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo aparatas ADS1/3

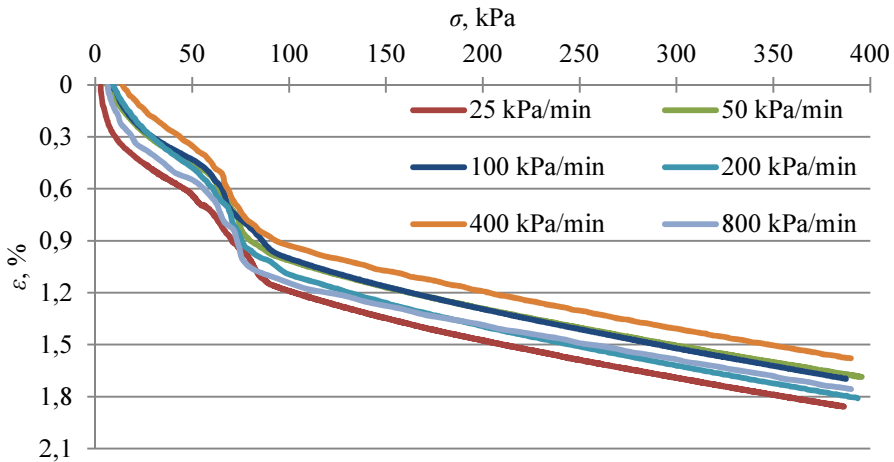
Fig. 2.17. Universal soil compression and direct shear device ADS1/3

Atskirų grunto frakcijų spūdumo bandymų rezultatai parodė, kad spaudžiant atskiras grunto frakcijas gaunami skirtingi grunto spūdumo rezultatai, t. y. didžiausiu spūdumu pasižymi 1,18–0,60 mm grunto frakcija bei natūralios sudėties gruntas (Skuodis, Amšiejus 2011). Norint eksperimentinius bandymus priartinti prie realios grunto granulometrinės sudėties, tolimesniuose eksperimentiniuose grunto spūdumo bandymuose naudoti tik natūralios sudėties grunto bandiniai.

Bandymai atlikti apkraunant gruntą iki 400 kPa, kad būtų išvengta grunto struktūros ir/arba jo atskirų dalelių irimo (Skuodis Šlečkusienė 2012).

Eksperimentinių grunto spūdumo bandymų metodika pasižymi tuo, kad apkrova pridedama bandinio viršuje keliais skirtingais automatiškai kontroliuojamais apkrovos pridėjimo greičiais: 25; 50; 100; 200; 400 ir 800 kPa/min. Esant visiem skirtingiems apkrovų pridėjimo greičiams atlikta po tris bandymus. Su šiais skirtingais apkrovų pridėjimo greičiais ištirta apkrovos pridėjimo greičio įtaka grunto spūdumo rezultatams (2.18 pav.).

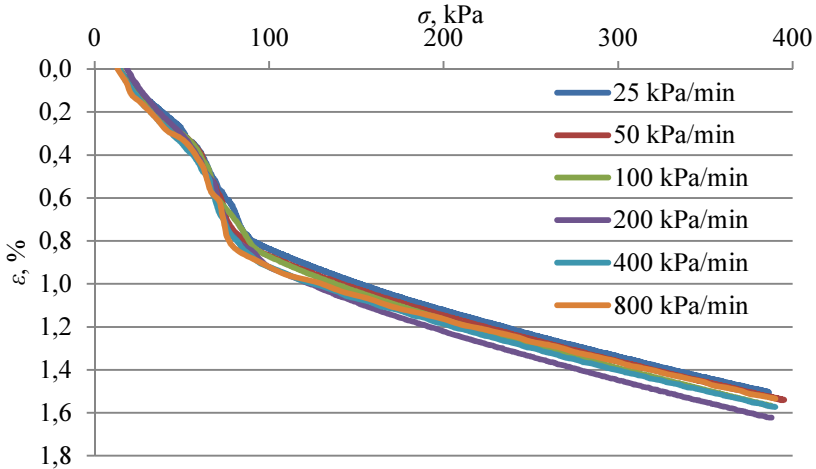
Analizuojant 2.18 paveikslą (2.18 pav.) pastebimas deformacijų šuolis esant 50–100 kPa apkrovų reikšmėms. Šis deformacijų šuolio atsiradimas yra pagrindžiamas grunto dalelių persiskirstymu (Skuodis, Norkus 2012), kuris yra pakankamai didelis esant 50–100 kPa vertikalios apkrovos intervalui (Skuodis *et al.* 2013; Skuodis *et al.* 2014). Taip pat, iš 2.18 paveiksle (2.18 pav.) pateiktų kreivių yra pastebima, kad visi bandymai pradėti spausti esant skirtingiems pradiniais įtempiams grunto bandinio paviršiuje. Dėl šios priežasties, 400 kPa/min kreivė yra aukščiau negu 25 kPa/min kreivė. Atlikus pradinių įtempių suvienodinimą ir perskaičiavus deformacijas, gautas redukuotas grunto suspaudžiamumo grafikas, kuriame nebelieka neatitikimų dėl apkrovos pridėjimo greičių ir pradinių įtempių (2.19 pav.).



2.18 pav. Apkrovos pridėjimo greičio įtaka deformacinėms savybėms
Fig. 2.18. Vertical load ramp influence for soil deformation

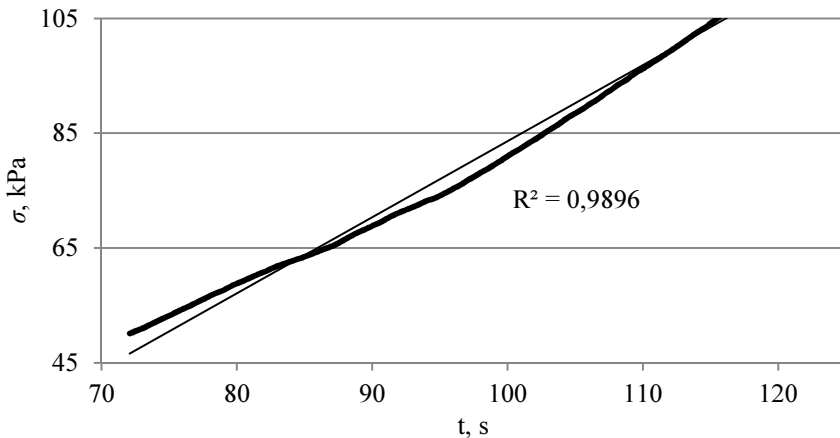
Pagal 2.19 paveikslo (2.19 pav.) duomenis, aiškiai matyti, kad grunto spūdumo kreivė nuo pridedamo apkrovos greičio nepriklauso, nes aptikti tik labai nežymūs skirtumai, kuriuos lemia kiti faktoriai, tokie kaip grunto poringumas, supilto grunto dalelių orientacija ir kt. Prietaiso patikimumas patikrintas atliekant

gumos suspaudžiamumo bandymą. Rezultatai vaizduojami išskiriant problematiškiausią vietą, kur grunto spūdumo bandyme aptinkamas įtempių šuolis ties 50–100 kPa apkrovų reikšmėmis (2.20; 2.21 ir 2.22 pav.) apkraunant gumos bandinį 100 kPa/min greičiu.



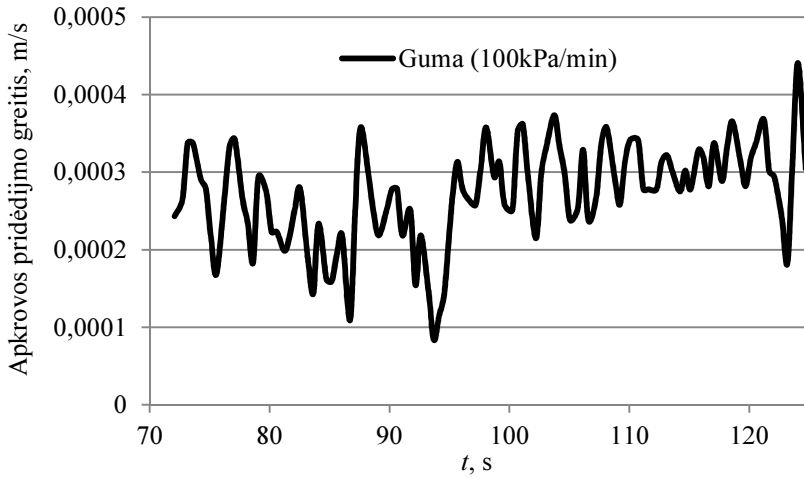
2.19 pav. Normalizuoto apkrovos pridėjimo greičio įtaka deformacinėms savybėms

Fig. 2.19. Normalized vertical load ramp influence for soil deformation



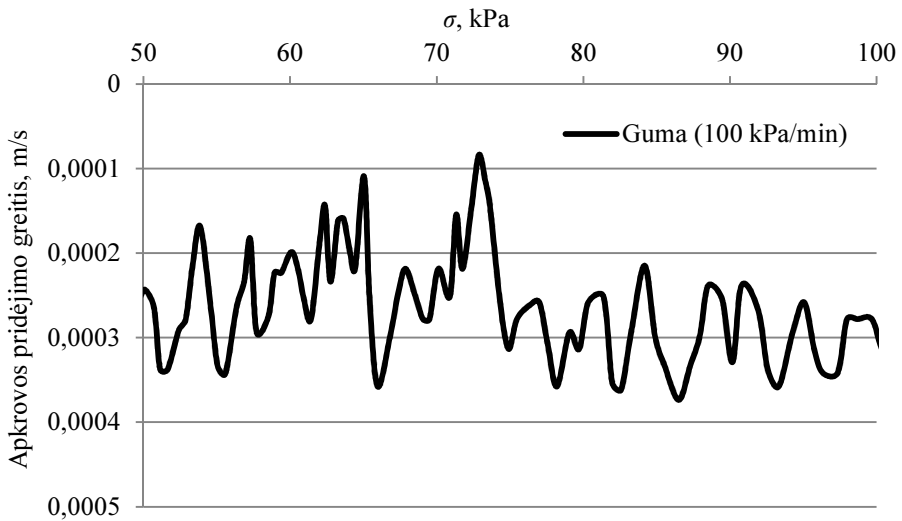
2.20 pav. Įtempių kitimas spaudžiant gumos bandinį (Skuodis, Norkus 2012)

Fig. 2.20. Vertical stress change during rubber compression (Skuodis, Norkus 2012)



2.21 pav. Apkrovos pridėjimo greičio įtaka gumos deformacinėms savybėms (Skuodis, Norkus 2012)

Fig. 2.21. Vertical load ramp velocity influence for rubber deformation (Skuodis, Norkus 2012)



2.22 pav. Apkrovos pridėjimo greičio priklausomybė nuo įtempių (Skuodis, Norkus 2012)

Fig. 2.22. Vertical load ramp velocity versus normal stress (Skuodis, Norkus 2012)

Pagal 2.20–2.22 paveiksle (2.20–2.22 pav.) pateiktus grafikus, aiškiai matyti, kad prietaisas yra pakankamai tikslus ir gali apkrauti gruntą su pasirinktu apkrovos prieaugiu per laiko vienetą, nes tiriant gumos bandinį įtempių šuolio ties 50–100 kPa apkrovų reikšmėmis neaptikta.

Apkraunant gumos bandinį apkrovos pridėjimo greičiai nėra stabilūs. Šis greičio kitimas paaiškinamas prietaiso aukšto lygio kalibravimu ir pritaikymu dirbti su pasirinkto tipo gruntais. Pakeitus tiriamus gruntus į ženkliai tankesnius (mažai suspaudžiamus) arba purius (spūdžius), reikėtų atlikti naujus prietaiso kalibravimus ir pritaikymus dirbti su pasirenkamomis medžiagomis.

2.3.1. Grunto spūdumo bandymo metodikos patobulinimas

Poreikis atlikti tikslesnius grunto suspaudžiamumo bandymus su patobulinta bandymo metodika atsirado dėl eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatų tarpusavio gretinimo neatitikimų. Eksperimentiškai nustatant grunto spūdumo ir/arba kerpamojo stiprio mechanines savybes, gaunami rezultatai priklauso nuo pradinio grunto tankio ρ . Kuo tankesnis gruntas, tuo mažesnis grunto spūdumas ir atvirkščiai. Prieš apspaudžiant gruntą pasirinkta apkrova ir apkrovimo greičiu, reikia žinoti bandinio pradinį aukštį. Atliekant grunto apspaudimą su senesnio tipo kompresiniais aparatais K-1 ir PL-9 (Šimkus *et al.* 1973; Skuodis, Kelevišius 2011; Martinkus *et al.* 2012; Skuodis 2011; Skuodis, Amšiejus 2011; Valiūnas, 2005; Amšiejus *et al.* 2010), kur apkrova pridedama rankiniu būdu, tiksliai negalima pasakyti kiek pakinta pradinis bandinio aukštis po kontakto sukūrimo tarp grunto ir apkrovos stūmoklio porinio akmens. Šiuo atveju, nežinant poslinkio vertės, kuri atsiranda dėl kontakto užtikrinimo tarp grunto ir jį spaudžiančio porinio akmens, lieka nežinomas pakitęs bandinio aukštis, pagal kurį yra apskaičiuojamas grunto tankis ir poringumo koeficientas.

Naudojant skaitinius metodus grunto spūdumo rezultatams nustatyti yra naudojama kitokia bandymo metodika nei nusistovėjusių eksperimentinių bandymų metodika. Skaitiniuose bandymuose naudojama metodika aprašyta 3 skyriuje.

Dviejų skirtingų bandymo metodikų (Skuodis, Šlečkuvienė 2013) smėlinio grunto spūdumo bandymai atlikti su kompresiniu aparatu (odometru). Pirmosios bandymo metodikos eiga (Skuodis *et al.* 2012):

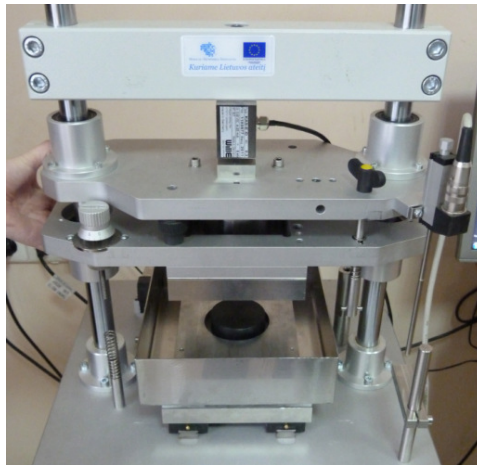
1. Paruošiamas pūras grunto bandinys ir išmatuojamas bandinio aukštis;
2. Apkrova pridedama ant bandinio vertikalaus įtempio išraiška, t. y. kontaktas yra užtikrinamas ne mažesniu kaip 5–10 kPa pradiniu vertikaliu įtempiu bandinio viršuje;
3. Pradedamas bandymas, t. y. pridedama apkrova pastoviu 400 kPa/min greičiu iki kol pasiekama reikiama 400 kPa didžiausia apkrovos riba.

Naudojant pirmąją grunto spūdumo bandymo metodiką, nėra žinomas tikslus bandinio aukščio pokytis, atsirandantis dėl kontakto užtikrinimo, sukuriant pradinį vertikalų 10 kPa įtempį bandinio viršuje.

Antrosios bandymo metodikos eiga:

1. Paruošiamas pirus grunto bandinys ir išmatuojamas bandinio aukštis;
2. Atliekamas prietaiso aukščio kalibravimas naudojant pilnavidurį plastikinį cilindą (2.23 pav.), kurio aukštis yra žinomas (20,00 mm). Pagal šį žinomą aukštį apskaičiuojamas tikslus bandinio ir prietaiso apkrovos stūmoklio porinio akmens kontakto aukštis. Šiuo atveju kontakto vietoje nėra jokio pradinio įtempio bandinio viršuje;
3. Pradedamas bandymas, t. y. pridedama apkrova pastoviu 400 kPa/min greičiu iki kol pasiekama 400 kPa didžiausia apkrovos riba.

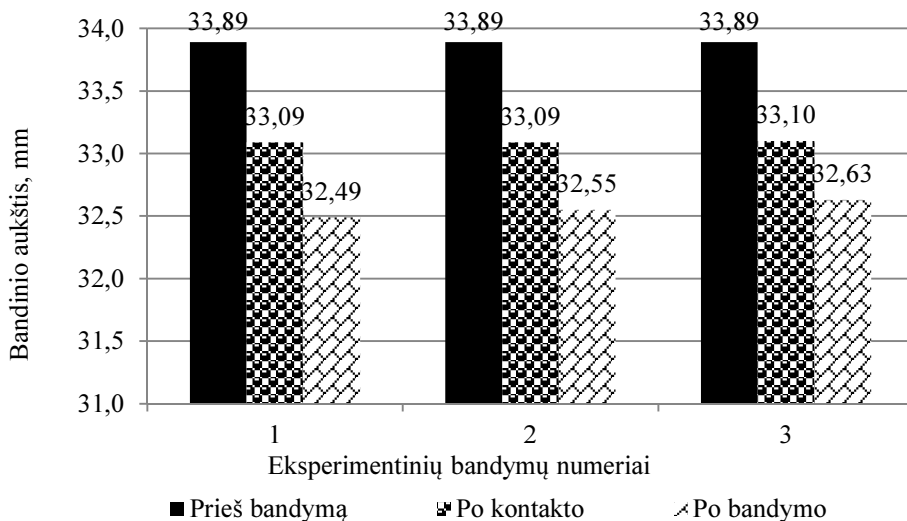
Naudojant antrąją bandymo eigos metodiką išvengiama bandinio aukščio paklaidos, atsirandančios kontakto metu tarp apkrovos stūmoklio porinio akmens ir grunto. Taip pat, ženkliai sumažinama prietaiso vertikalųjų poslinkių paklaida, nes prietaiso vertikalųjų poslinkių kalibravimas atliekamas prieš kiekvieną grunto spūdumo bandymą.



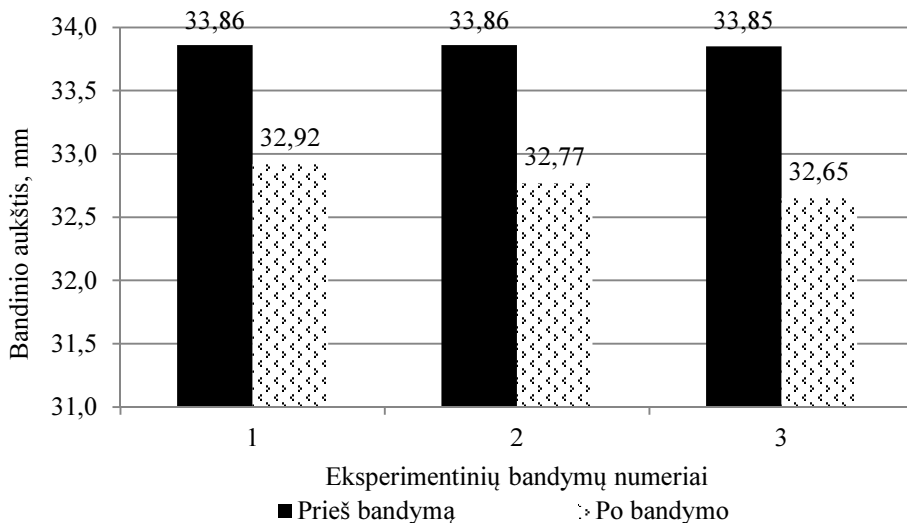
2.23 pav. Aukščio kalibravimas prieš spūdumo bandymą
(Skuodis, Šlečkuvienė 2013)

Fig. 2.23. Height calibration before compression test
(Skuodis, Šlečkuvienė 2013)

Tirto natūralios sudėties Klaipėdos pakrantės smėlinio grunto spūdumo rezultatai, esant dviem skirtingoms bandymo metodikoms, pateikiami grafiškai 2.24 ir 2.25 paveiksluose (2.24–2.25 pav.) (Skuodis, Šlečkuvienė 2013).



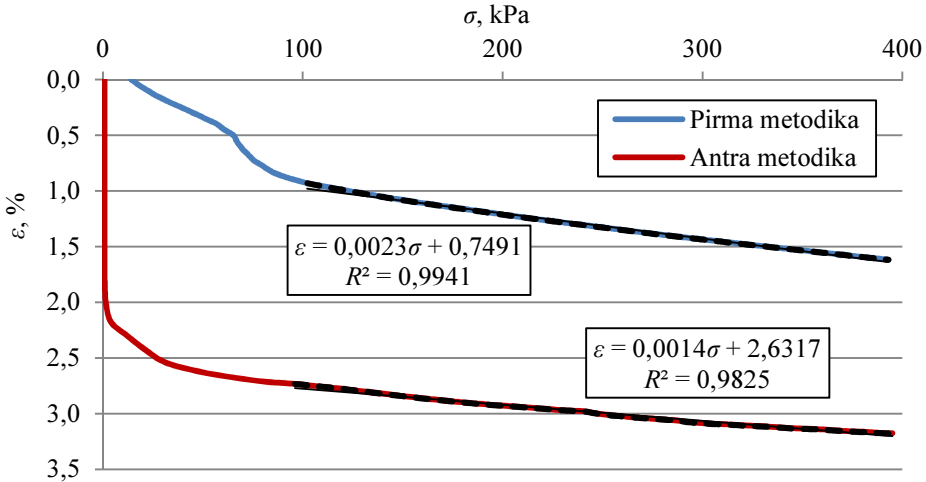
2.24 pav. Bandinio aukščio kitimas bandymo metu (pirma bandymų metodika)
Fig. 2.24. Sample height evaluation during test (first testing procedure)



2.25 pav. Bandinio aukščio kitimas bandymo metu (antra bandymų metodika)
Fig. 2.25. Sample height evaluation during test (second testing procedure)

Grunto spūdomo bandymų rezultatų palyginimas esant 400 kPa/min apkrovos pridėjimo greičiui, atliekant spūdomo bandymus dviem aukščiau paminėto-

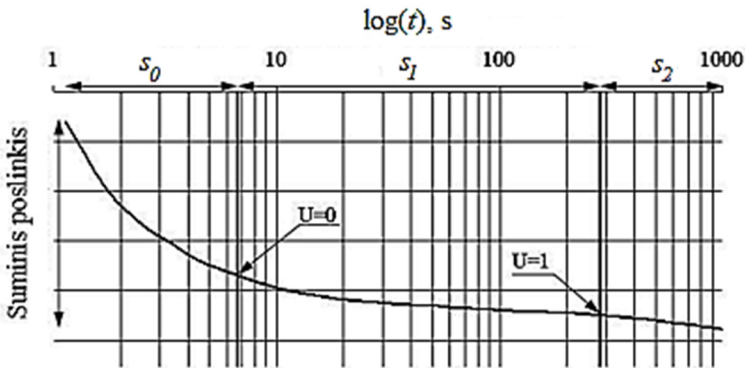
mis metodikomis yra pateikiamas 2.26 paveiksle. Čia pateikiami vidutiniai bandymų rezultatų grafikai, sudaryti iš trijų bandymų, atliktų pagal pirmąją ir antrąją metodikas.



2.26 pav. Grunto spūdumo bandymų metodikų palyginimas
Fig. 2.26. Comparison of soil compression methodologies

Atliekant bandymus pirmąją metodiką, gauta grunto deformacija $\epsilon = 1,6168\%$, antrąją $\epsilon = 3,1763\%$. Skirtumas tarp šių dviejų metodikų $\Delta\epsilon = 1,56\%$. Analizuojant 2.66 paveiksle (2.26 pav.) pateiktas grunto spūdumo kreives, pagal LST EN 1997-1 (2006) pirmąją bandymo metodiką nustatytas nuosėdis s yra sudarytas tik iš nuosėdžių atsiradusių dėl konsolidacijos s_1 ir nuosėdžių atsiradusių dėl valkšnumo s_2 (2.27 pav.). Antrąją bandymo metodiką nustatant grunto spūdumo kreivę, pagal LST EN 1997-1 (2006) ir Sližytę *et al.* (2012) galima išskirti staigiuosius nuosėdžius s_0 , susidarancius dėl kontakto sukūrimo tarp grunto ir jį spaudžiančio porinio akmens bei anksčiau minėtų dviejų nuosėdžių s_1 ir s_2 (2.27 pav.).

Antrosios bandymo metodikos pranašumas – nustatoma tikroji deformacija ir įvertinama s_0 , kai yra sukuriamas kontaktas tarp grunto ir jį spaudžiančio porinio akmens. Šis deformacijų matavimas esant mažam bandinio aukščiui ($H = 3,39$ cm) yra labai svarbus ir turi didžiulę įtaką grunto deformacijų modulio nustatymui. Kitas svarbus aspektas bandant gruntą antrąją metodiką yra tas, kad esant didesniai nei 100 kPa įtėpiui grunto spūdumo kreivė yra lygiagreti kitai grunto spūdumo kreivei, nustatyta pagal pirmąją bandymo metodiką. Kreivių nubraižytų pagal dvi skirtingas metodikas, kai įtėpis yra didesnis nei 100 kPa polinkio kampų skirtumas yra $0,05^\circ$.



2.27 pav. Nuosėdžių tipai (Skuodis, Amšiejus 2011)

Fig. 2.27. Displacement types (Skuodis, Amšiejus 2011)

Tiriant grunto suspaudžiamumą su didelių mastelių odometriniais prietaisais, kai jų aukštis 40 cm, o skersmuo 80 cm, apkrovos pridėjimo ant tiriamo grunto kontaktiniai nuosėdžiai neturi didelės įtakos. Dėl šios priežasties su didelių matmenų odometrais gaunamas grunto deformacijų modulis apie 4 kartus didesnis.

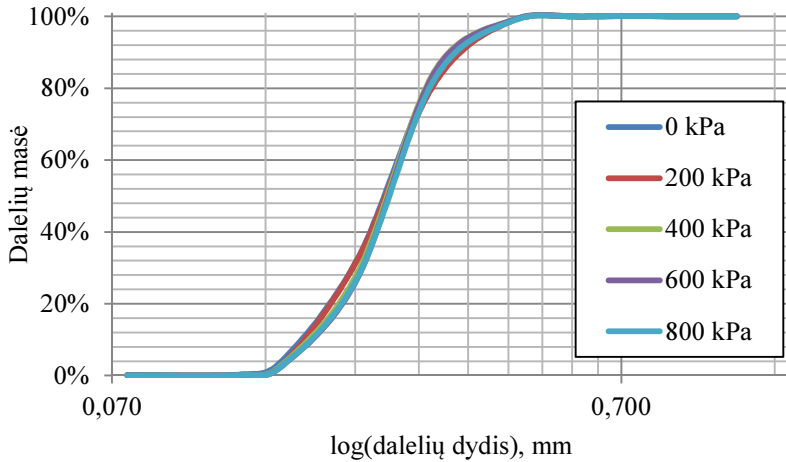
Tolimesniems grunto mechaninių savybių tyrimams disertaciniame darbe naudojamas antrosios bandymo metodikos grunto deformacijų nustatymo būdas.

2.3.2. Grunto dalelių formos kitimas prieš ir po spūdumo bandymų

Šiame skyriuje aprašytas atskirų grunto dalelių formos kitimas prieš ir po spūdumo bandymo. Ši problema iškilo nustatant grunto granuliometrinę sudėtį sijojimo metodu, kai to paties grunto granuliometrinės sudėties kreivės po kelių skirtingų sijojimo bandymų skyrėsi apie 2–3 % (2.28 pav.)

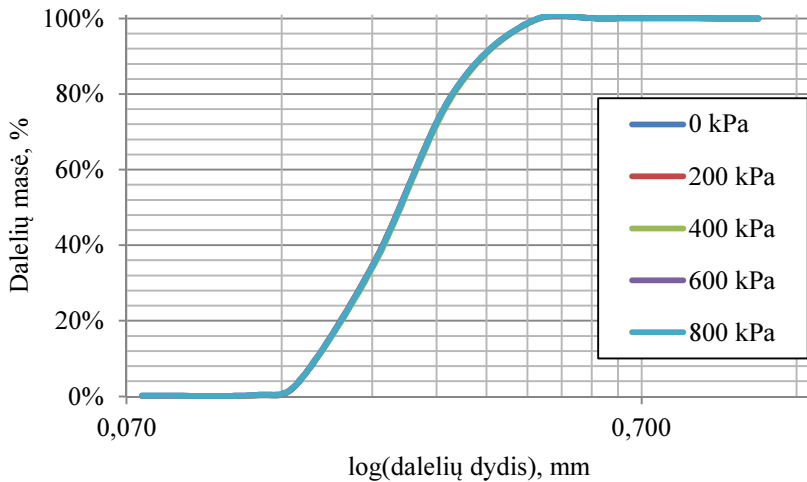
Analizuojant 2.28 paveiklą (2.28 pav.), aiškiai matyti, kad grunto granuliometrinės sudėties kreivės po bandymų skiriasi dėl skirtingų grunto didžiausių apkrovimų, t. y. 0; 200; 400; 600 ir 800 kPa. Tačiau, grunto granuliometrinės sudėties bandymai atlikti nenaudojant jokių papildomų priemonių, t. y. rutulio formos sferų ant sietų. Naudojant rutulio formos gumines sferas ant skirtingų dydžių sijojimo sietų (Skuodis, Kavrus 2012), po apkrovimų bandymų su skirtingomis 0; 200; 400; 600 ir 800 kPa apkrovomis gautos tos pačios grunto granuliometrinės sudėties kreivės (2.29 pav.). Guminės sferos pasirinktos naudojimui, nes atliekant sijojimo bandymus, bandymo metu šios sferos dėl dinaminio poveikio nepažeidžia sijojimo sietų. Naudojant sferas pagamintas iš metalo, dėl didelės nuosavos sferos masės, veikiant dinaminiais poveikiams grunto sijojimo bandymo metu

ant sietų atsiranda pažeidimų, tokių kaip sieto tinklo subraižymas, akučių ištempimas arba suplėšymas.



2.28 pav. Grunto granulimetrinės sudėties kreivės po skirtingų apkrovimų (Skuodis, Kavrus 2012)

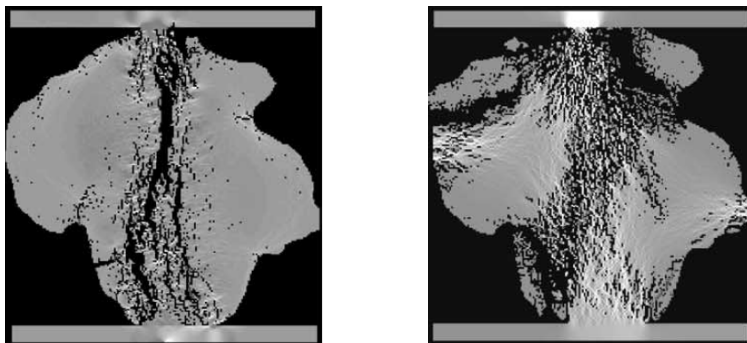
Fig. 2.28. Soil grading curves after different compression steps (Skuodis, Kavrus 2012)



2.29 pav. Grunto granulimetrinės sudėties kreivės atliekant sijoavimo bandymą su rutulio formos guminėmis sferomis (Skuodis, Kavrus 2012)

Fig. 2.29. Soil grading curves determined with rubber spheres on the sieves (Skuodis, Kavrus 2012)

2.29 paveiksle (2.29 pav.) pateiktos granulimetrinės sudėties kreivės sutampa praktiškai idealiai. Tai įrodo, kad tiriamo Baltijos jūros pakrantės smėlinio grunto atskiros dalelės nesusklyja (Khanal, Tomas 2008) esant didžiausiam 800 kPa vertikaliam apkrovai (2.30 pav.). Tiksliai grunto masė, likusi ant sieto po apkrovimo bandymo su skirtingomis apkrovomis pateikta 2.4 lentelėje.



2.30 pav. Galimas dalelės skilimas: kairėje – dalelės skilimas ir dešinėje – dalelių aštrių kampų nuskilimas (Tang *et. al.* 2001)

Fig. 2.30. Particle split opportunity: Split of the particle (on left hand) and split of the sharp particle angles (on right hand) (Tang *et. al.* 2001)

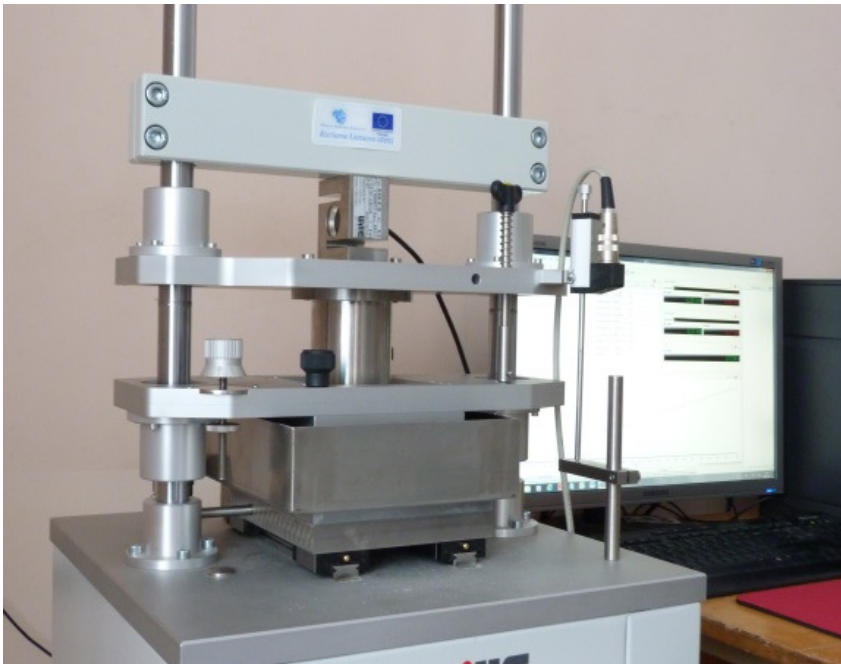
2.4 lentelė. Grunto sietinės analizės duomenys po skirtingų apkrovimo laipsnių (Skuodis, Kavrus 2012)

Table 2.4. Soil sieve test results after different compression steps (Skuodis, Kavrus 2012)

Sieto dydis, mm	Masė likusi ant sieto, g				
	0 kPa	200 kPa	400 kPa	600 kPa	800 kPa
2,0–1,18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,18–0,6	2,145	2,003	1,999	1,864	1,816
0,6–0,425	39,593	39,234	40,478	39,298	39,053
0,425–0,3	91,319	90,727	90,984	90,466	90,640
0,3–0,212	65,780	66,430	64,859	65,803	65,380
0,212–0,150	6,188	6,217	6,206	6,185	6,190
0,150–0,125	0,297	0,306	0,318	0,347	0,359
0,125–0,075	0,121	0,153	0,204	0,324	0,358
0,075–0,063	0,026	0,023	0,026	0,030	0,031
<0,063	0,000	0,045	0,059	0,122	0,095
Suma:	205,469	205,138	205,133	204,439	203,922

2.4. Grunto kerpamasis stipris tiesioginio kirpimo aparatu

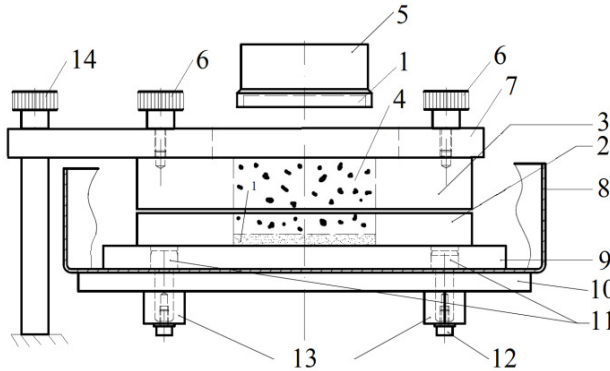
Disertaciniame darbe kerpamojo stiprio bandymai atlikti universaliu ADS1/3 aparatu, kuriuo esant poreikiui galima atlikti grunto spūdumo bandymus. Bandymuose naudoto žiedo skersmuo $D = 7,14$ cm, aukštis $H = 3,39$ cm (2.31 pav.).



2.31 pav. Universalus grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo aparatas ADS1/3

Fig. 2.31. Universal soil compression and direct shear device ADS1/3

Naudojant šį prietaisą galima kirpti gruntą esant pastoviam įtempiui grunto viršuje ($\sigma = \text{const.}$) arba esant pastoviam grunto tūriui, t. y. kai bandinio aukštis $h = \text{const.}$ Abiem skirtingomis metodikomis galima pasirinkti kokiu būdu atliekamas grunto kirpimas, t. y. su pastoviu horizontaliu poslinkiu ar pastoviu horizontaliu įtempiu. Visos šios išvardintos metodikos taip pat gali būti atliktos panardinus gruntą po vandeniu, tačiau nesukuriant slėgio pačiame vandenyje (2.32 pav.).



2.32 pav. Universalus grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo aparato ADS1/3 principinė schema: 1 – porinis akmuo; 2 – kirpimo žiedo paslanki apatinė dalis; 3 – kirpimo žiedo nepaslanki viršutinė dalis; 4 – grunto bandinys; 5 – apkrovos stūmoklis; 6 – viršutinio kirpimo žiedo tvirtinimo elementas; 7 – nepaslanki dalis, prie kurios tvirtinasi viršutinis žiedas; 8 – vonelė; 9 – apatinės kirpimo žiedo dalies nukreipiančioji plokštė; 10 – paslanki pagrindo plokštė; 11 – nukreipiantieji fiksatoriai; 12 – paslankios pagrindo plokštės tvirtinimas prie bėgelių; 13 – bėgeliai; 14 – viršutinės žiedo dalies reguliuojama atrama, kirpimo tarpo sukūrimui (Amšiejus *et al.* 2014)

Fig. 2.32. Universal soil compression and direct shear device ADS1/3 principal scheme: 1 – filter plate; 2 – movable lower ring; 3 – fixed upper ring; 4 – soil; 5 – load piston; 6 – fixation of upper ring; 7 – fixed support; 8 – water jacket; 9 – plate of lower ring; 10 – movable plate of base; 11 – fixators; 12 – fixation of movable plate of base; 13 – skids; 14 – support of upper ring (Amšiejus *et al.* 2014)

2.4.1. Tiesioginio kirpimo aparato netikslumai ir atlikti patobulinimai

Naudojant naujausios kartos gruntų mechaninių savybių tyrimo įrangą, gauti rezultatai skiriasi nuo anksčiau nustatytų rezultatų, kurie gauti naudojant senesnio tipo grunto kirpimo prietaisus (Amšiejus *et al.* 2006; Medzvieckas *et al.* 2004). Dėl rezultatų nesutapimo pradėtas universalus kirpimo aparato ADS 1/3 testavimas. Dažniausiai mokslininkai ir / arba inžinieriai dirbantys laboratorijose negali atlikti tų pačių grunto kirpimo bandymų su skirtingų tipų prietaisais (Bareither *et al.* 2008), nes tam nėra galimybių. Todėl, nustatant grunto kerpamąjį stiprumą (Kostkanová, Herle 2012; Rao *et al.* 2009; Verveckaite *et al.* 2007) neanalizuojami gautų rezultatų skirtumai, nustatyti tiriant gruntą su skirtingais prietaisais. Dėl šios priežasties, praktiškai nėra informacijos apie grunto kirpimo aparatų netikslumų nustatymą (Aydognmus *et al.* 2002; Gan *et al.* 1988; Barrios 2010; Alikonis *et al.* 1999; Amšiejus 2000; Dirgėlienė *et al.* 2013) ir / arba patobulinimus

(Likos *et al.* 2010; Bouvier *et al.* 2006; Stark *et al.* 1996; Simoni *et al.* 2006; Abdelrahman *et al.* 2007).

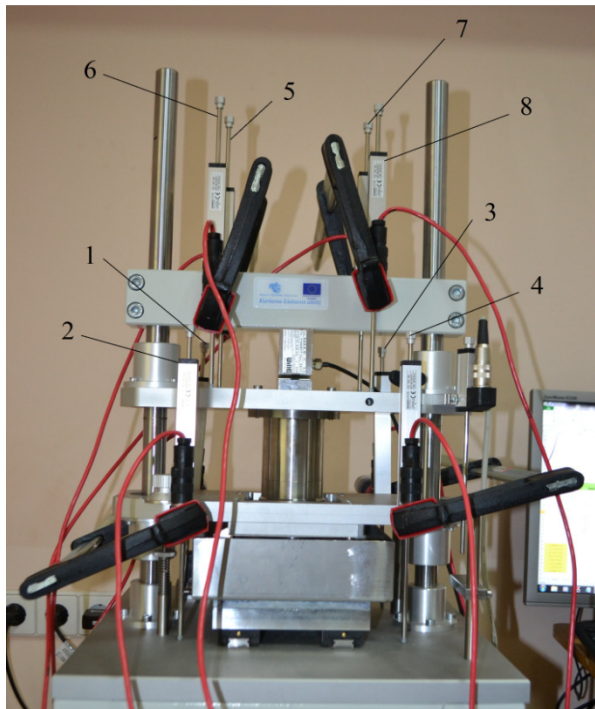
Dažniausiai gruntas yra kerpamas esant pastoviai vertikaliai apkrovai bandinio viršuje arba esant pastoviam bandinio aukščiui. Šiame skyriuje išnagrinėti abu šie atvejai, atliekant bandymus su orasausiu Baltijos jūros pakrantės smėliniu gruntu, naudojant didžiausio ir mažiausio poringumo koeficiento e grunto bandinius. Atliekant grunto kirpimo bandymus, papildomai yra matuojamas tarpo aukščio vertikalus kitimas tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų bei apkrovos daviklio susispaudimas. Jei nebūtų matuojamas kirpimo plokštumos tarpo pastovumas viso bandymo metu, nebūtų galimybės paaiškinti gaunamų kerpamojo stiprio reikšmių. Šių papildomų matavimų gaunami duomenys yra naudinga informacija atliekant skaitinį eksperimentinių bandymų modeliavimą, tiek baigtinių elementų metodais, tiek diskrečiųjų elementų metodais (Sukumaran *et al.* 2008; Ferrellec, McDowell 2010; Chandler, Sands 2010).

Prieš atliekant grunto kirpimo bandymą, bandinys apspaudžiamas pastoviu 100 kPa/min greičiu, kol pasiekama vertikali apkrovos reikšmė (50; 200; 400 kPa). Prie kiekvienos vertikali apkrovos reikšmės atlikta po tris bandymus. Grunto kerpamasis stiprumas nustatytas naudojantis universaliu grunto kirpimo aparatu ADS 1/3. Gruntas kerpamas pastoviu 0,5 mm/min greičiu, kol horizontali deformacija pasiekia 9 mm ribą. Bandymai atlikti, kai pradinis tarpo aukštis tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų 1mm ir bandymo metu šis aukštis negali kisti bei kai pradinis tarpo aukštis 1 mm ir bandymo metu šis aukštis yra nevaržomas. Grunto kirpimo bandymas atliekamas dviem skirtingomis metodikomis (Skuodis *et al.* 2013):

1. Esant pastoviai vertikaliai apkrovai bandinio viršuje.
2. Esant pastoviam bandinio aukščiui.

Kerpamojo stiprio nustatymo bandymai atlikti naudojant skirtingo poringumo smėlinio grunto bandinius, t. y. purius ($\rho = 1,491 \text{ g/cm}^3$) ir tankius ($\rho = 1,554\text{-}1,651 \text{ g/cm}^3$). Tankio skirtumas yra nedidelis, nes orasausį gruntą sutankinti yra labai sudėtinga. Esant didesniai tankiui nei $\rho = 1,554 \text{ g/cm}^3$, kerpant gruntą prie pastovaus tūrio, dėl dilatacijos efekto vertikalūs įtempiai išauga tiek, kad prietaisas viršija savo leistinas vertikalūs apkrovimo ribas (1,25 MPa) ir ribotuvai nebeleidžia tęsti bandymo. Dėl šios priežasties grunto bandiniai nukirpti pagal antrąją metodiką su mažesniu tankiu.

Grunto pikinis kerpamasis stipris nustatytas pagal didžiausią tangentinio ir normalinio įtempio santykį τ/σ . Atliekant grunto kerpamojo stiprio nustatymo bandymus, papildomai buvo matuojamas tarpo tarp viršutinio ir apatinio žiedo pastovumas bei apkrovos daviklio susispaudimas (2.33 pav.).



2.33 pav. Universalus grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo aparatas ADS1/3:
1; 2; 3; 4 – viršutinio kirpimo žiedo vertikalųjų poslinkių indikatoriai;
5; 6; 7; 8 – apkrovos daviklio susispaudimo indikatoriai (Skuodis *et al.* 2013)

Fig. 2.33. Universal soil compression and direct shear device ADS1/3:
1; 2; 3; 4 – upper shearing ring vertical displacement indicators;
5; 6; 7; 8 – vertical load transducer compression indicators (Skuodis *et al.* 2013)

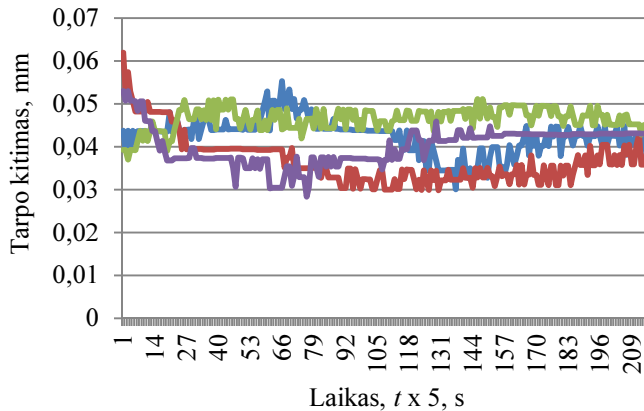
Nevaržant tarpo tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedo gaunamos mažesnės vidinės trinties kampo φ ir sankabumo c vertės. Šį reiškinį galima paaiškinti taip: suvaržant tarpą tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedo, dalis vertikalios jėgos tenka prietaiso konstrukcijai kuri standžiai fiksuoja viršutinio kirpimo žiedo poziciją. Šioje universalaus kirpimo prietaiso konstrukcijos vietoje nėra matuojamos vertikalios apkrovos. Dėl vertikalųjų apkrovų pasiskirstymo netolygumo kerpant gruntą suvaržius arba nesuvaržius tarpą tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų gaunami skirtingi rezultatai. Tarp suvaržymas ar nesuvaržymas tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų tiesiogiai įtakoja kerpamojo stiprio rezultatus, kurie pateikti 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Grunto kerpamojo stiprio parametrai (Skuodis *et al.* 2013)

Table 2.5. Soil shearing strength parameters (Skuodis *et al.* 2013)

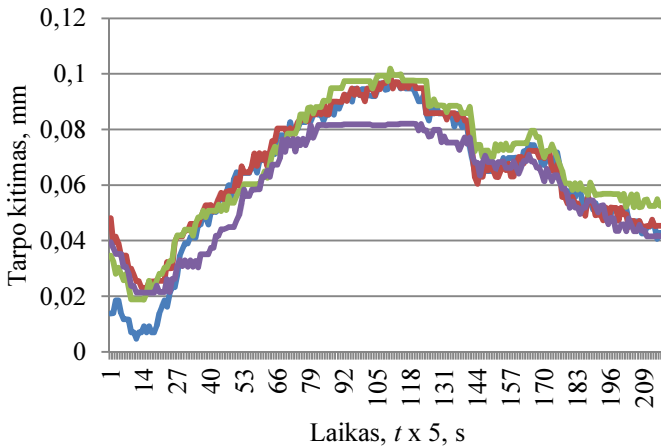
Bandymo metodika	Grunto tankio apibūdinimas	Kerpamojo stiprio pa-rametras	Tarpas tarp kirpimo žiedų	
			Pastovus	Kintamas
1	Purus	φ_m°	26,52	26,73
2	Purus	φ_m°	30,19	12,36
1	Tankus	φ_m°	47,09	35,18
2	Tankus	φ_m°	35,21	27,88
1	Purus	c_m , kPa	11,92	0,38
2	Purus	c_m , kPa	4,08	5,79
1	Tankus	c_m , kPa	24,01	10,37
2	Tankus	c_m , kPa	4,90	28,10

Atliekant visus grunto kirpimo bandymus, papildomai buvo matuojamas tarpo tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų pastovumas bei apkrovos daviklio susispaudimas. Esant suvaržytam tarpui tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų, kai pradinis įtempis bandinio viršuje yra 400 kPa ir grunto bandinys yra tankus, tarpo kitimo kreivė viso bandymo metu pateikta 2.34 paveiksle (2.34 pav.) (1 bandymo metodika) ir 2.35 paveiksle (2.35 pav.) (2 bandymo metodika). Indikatorių žymėjimas pateiktas 2.33 paveiksle (2.33 pav.).



2.34 pav. Tarpas tarp kirpimo žiedų matavimas tarp kirpimo žiedų: mėlyna – indikatorius nr. 1; raudona – indikatorius nr. 2; žalia – indikatorius nr. 3; violetinė – indikatorius nr. 4

Fig. 2.34. Measurement of gap range between shearing rings: blue – indicator no. 1; red – indicator no. 2; green – indicator no. 3; purple – indicator no. 4



2.35 pav. Tarpų aukščio kitimo matavimas tarp kirpimo žiedų: mėlyna – indikatorius nr. 1; raudona – indikatorius nr. 2; žalia – indikatorius nr. 3; violetinė – indikatorius nr. 4

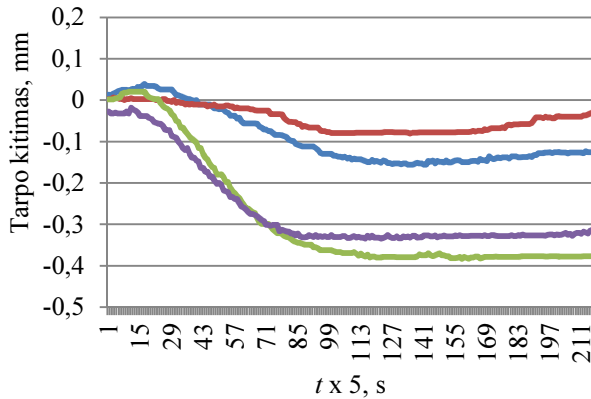
Fig. 2.35. Measurement of gap range between shearing rings: blue – indicator no. 1; red – indicator no. 2; green – indicator no. 3; purple – indicator no. 4

Analizuojant 2.34–2.35 paveikslus (2.34–2.35 pav.), matyti, kad kai bandymas atliekamas esant pastoviam įtempimui (bandymo metodika nr. 1), tarpų dydis tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų nuo pradinio 1 mm dydžio, praktiškai nekinta, t. y. sumažėja daugiausiai iki 0,03–0,06 mm. Kai kirpimas atliekamas prie pastovaus bandinio tūrio (bandymo metodika nr. 2), bandymo metu tarpas sumažėja nuo 1 mm iki 0,9 mm. Šis bandinio kirpimo tarpų aukščio kitimas siejamas su tangentiniais įtempiais susidarančiais ties vidiniais kirpimo žiedais. Šie tangentiniai įtempiai atsiranda bandinį apkrovus vertikaliu normaliu įtempiu.

2.36–2.37 paveiksluose (2.36–2.37 pav.) pateiktos tarpų tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedo kitimo kreivės, kai pradinis įtempis bandinio viršuje yra 400 kPa (tankiam gruntui) bei tarpas viso bandymo metu yra nevaržomas.

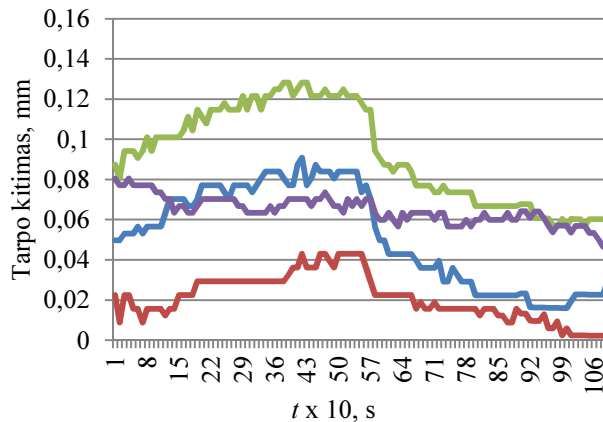
Neigiami matavimų rezultatai (2.36 pav.) parodo tai, kad viršutinis kirpimo žiedas kilo į viršų, t. y. tarpas tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų didėjo. Įsitikinus, kad tarpas tarp kirpimo žiedų, nepriklausomai nuo kirpimo metodikos, yra nepastovus, atliktas sukurto tarpų tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedų matavimas (2.38 pav.).

Šio matavimo rezultatai parodė, kad sukuriant pradinį tarpą tarp kirpimo žiedų, sukurto tarpų reikšmė skirtingose matavimo vietose nėra vienoda ir kirpimo plokštuma kirpimo metu nėra horizontali. Horizontalumo neleidžia užtikrinti standi plokštė, kurios tvirtinimo taškai nėra visiškai standūs.



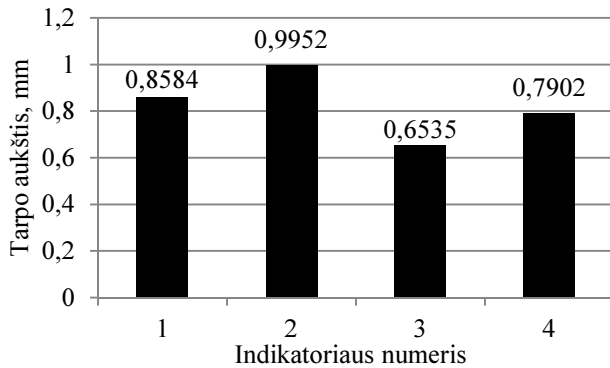
2.36 pav. Tarpo aukščio kitimo matavimas tarp kirpimo žiedų (1 bandymo metodika): mėlyna – indikatorius nr. 1; raudona – indikatorius nr. 2; žalia – indikatorius nr. 3; violetinė – indikatorius nr. 4

Fig. 2.36. Measurement of gap range between shearing rings (1 testing procedure): blue – indicator no. 1; red – indicator no. 2; green – indicator no. 3; purple – indicator no. 4



2.37 pav. Tarpo aukščio kitimo matavimas tarp kirpimo žiedų (1 bandymo metodika): mėlyna – indikatorius nr. 1; raudona – indikatorius nr. 2; žalia – indikatorius nr. 3; violetinė – indikatorius nr. 4

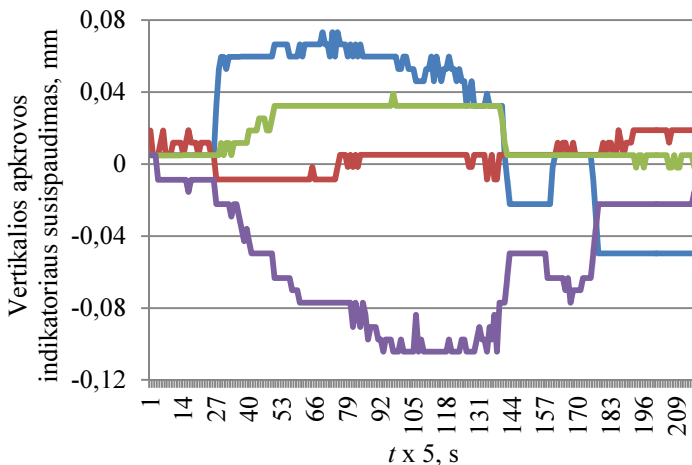
Fig. 2.37. Measurement of gap range between shearing rings (1 testing procedure): blue – indicator no. 1; red – indicator no. 2; green – indicator no. 3; purple – indicator no. 4



2.38 pav. Sukurto pradinio tarpo tarp kirpimo žiedų prieš atliekant kirpimo bandymą matavimai

Fig. 2.38. Gap establishing between shearing rings before shearing stage

Vertikalios apkrovos indikatoriaus susispaudimas bandymo metu yra mažas (2.39 pav.), todėl pateikiamas šio indikatoriaus susispaudimo charakteris, kai prieš kirpimo bandymą sukuriamas pradinis 400 kPa įtempis bandinio viršuje.

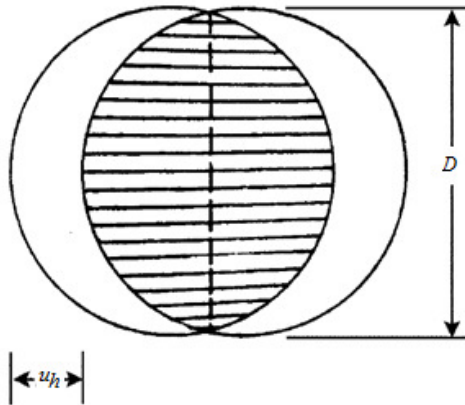


2.39 pav. Vertikalios apkrovos indikatoriaus susispaudimas: mėlyna – indikatorius nr. 5; raudona – indikatorius nr. 6; žalia – indikatorius nr. 7; violetinė – indikatorius nr. 8

Fig. 2.39. Vertical load indicator compression: blue – indicator no. 5; red – indicator no. 6; green – indicator no. 7; purple – indicator no. 8

2.39 paveiksle (2.39 pav.) teigiamos reikšmės reiškia indikatoriaus pailgėjimą, o neigiamos – suspaudimą. Dėl nevienodo vertikalios apkrovos indikatoriaus susispaudimo, apkrovą gruntui perduodantis porinis akmuo (kuris yra standžiai sujungtas su vertikalios apkrovos indikatoriumi) bandymo metu neišlieka horizontalioje padėtyje. Šiuo atveju, išlieka porinio akmens ir odometro sienelės susilietimo tikimybė, t. y. šis procesas tiesiogiai daro įtaką grunto kerpamojo stiprio rezultatams.

Esant horizontaliam poslinkiui grunto kirpimo bandymo metu cilindro formos bandinio kerpamasis plotas mažėja (2.40 pav.).



2.40 pav. Kirpimo plokštuma (Lai 2004; Skuodis, Tamošiūnas 2014)

Fig. 2.40. Shearing plane (Lai 2004; Skuodis, Tamošiūnas 2014)

Kai bandinys yra apskritimo formos, pastovus kirpimo plotas apskaičiuojamas pagal apskritimo skersmenį D (Skuodis, Tamošiūnas 2014):

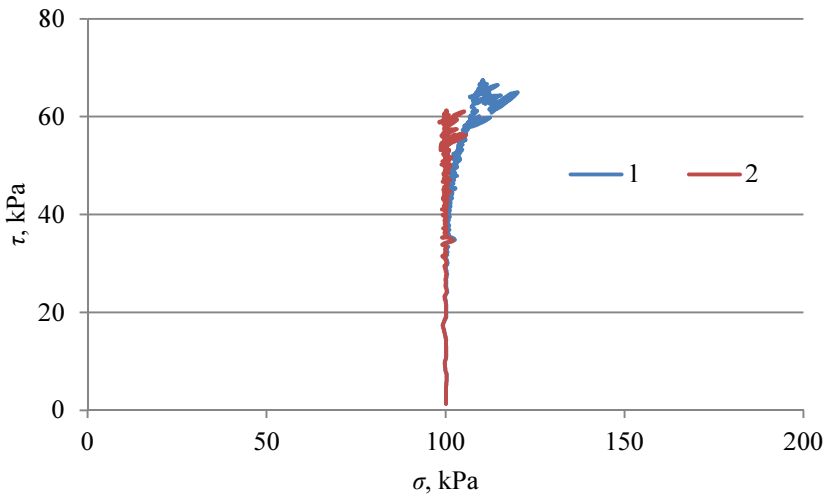
$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (2.1)$$

Įvertinus, kad kerpamasis plotas bandymo metu yra kintamas, tikrasis kirpimo plotas apskaičiuojamas pagal išorinį horizontalių poslinkių indikatorių (Skuodis, Tamošiūnas 2014):

$$A = 2 \cdot \left(\frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \operatorname{acos} \left(\frac{u_h}{D} \right) \right) - 2 \cdot \left(\left(\frac{u_h}{2} \cdot 0,25 \cdot \sin \left(\operatorname{acos} \left(\frac{u_h}{D} \right) \right) \right) \cdot D \right) \cdot 2. \quad (2.2)$$

Atliekant grunto kerpamojo stiprio bandymus yra labai svarbu kontroliuoti horizontalų poslinkį remiantis išorinio poslinkių indikatorius rodmenimis. Matuojant horizontalius poslinkius su vidiniu indikatoriumi yra neišvengiamos matavimo tikslumo klaidos. Šios klaidos atsiranda dėl prietaiso veikimo principo, t. y. besisukantis horizontalių poslinkių velenas nesugeba pradėti arba baigti judėjimo taip greitai kaip kompiuteris, kuris vykdo komandas (pvz.: kompiuteris baigia judėjimo komandą ir atjungia judėjimo funkciją veleno, tačiau velenas iš inercijos dar šiek tiek sukasi). Dėl šios priežastis atliekant grunto kirpimą su pasirinktu 9 mm poslinkiu, tarp vidinio ir išorinio indikatorius rodmenų atsiranda apie 0,5 mm skirtumas.

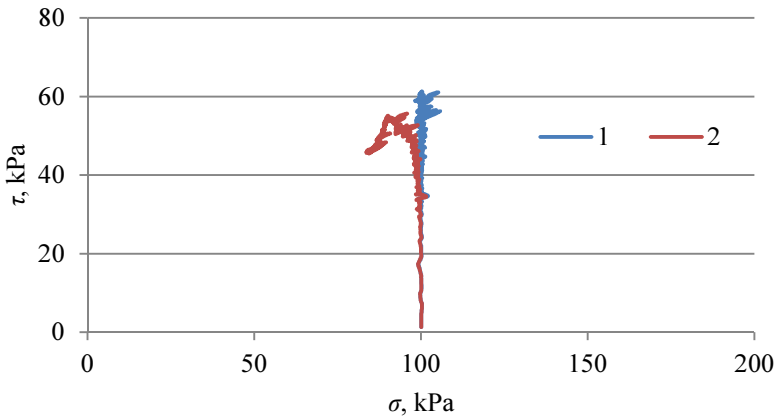
Taikant 2.2 formulę tiesiogiai perskaičiuojamas kintamas kerpamasis plotas A (Skuodis, Tamošiūnas 2014). Pagal šį nuolat perskaičiuojamą plotą yra kontroliuojamas normalinis ir tangentinis įtempiai. Šių įtempių perskaičiavimas yra atliekamas kas 1 s. Bandymų palyginimas, kai gruntas kerpamas pagal pirmą metodiką (su pastoviu normaliniu įtėmiu bandinio viršuje) pateiktas 2.41–2.42 paveiksluose (2.41–2.42 pav.).



2.41 pav. Kirpimo įtempių palyginimas (bandymas atliktas pagal A_0):

1 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A ; 2 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A_0

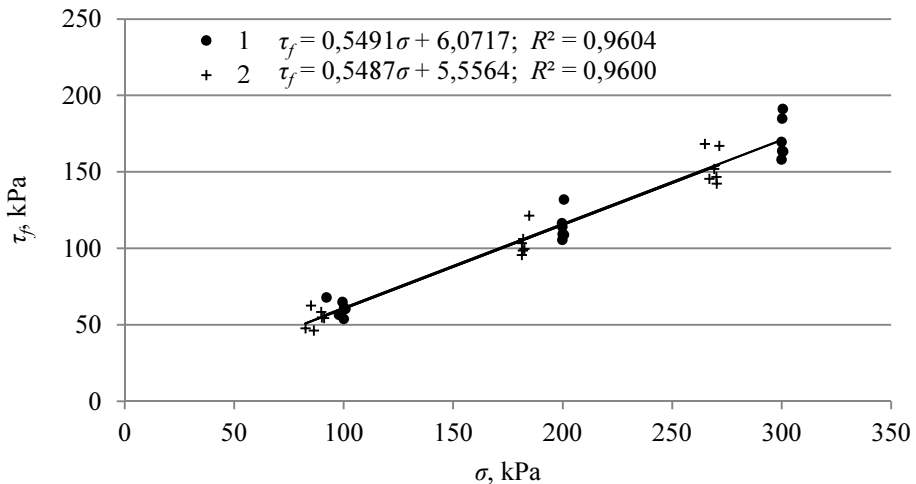
Fig. 2.41. Comparison of shearing strength paths (test provided according to A_0): 1 – shear strength calculated according to A ; 2 – shear strength calculated according to A_0



2.42 pav. Kirpimo įtempių palyginimas (bandymas atliktas pagal A): 1 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A ; 2 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A_0

Fig. 2.42. Comparison of shearing strength paths (test provided according to A): 1 – shear strength calculated according to A ; 2 – shear strength calculated according to A_0

Šių dviejų bandymo eigių (2.41–2.42 pav.) rezultatų palyginimo analizės metu nustatyta, kad kerpamojo stiprio parametrai praktiškai yra vienodi (2.43 pav. ir 2.6 lentelė). Tačiau aptiktas įtempių skirtumas esant pikiniam grunto stipriui yra apytiksliai lygus 10 % (2.7 lentelė).



2.43 pav. Kerpamojo stiprio parametrų palyginimas: 1 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A ; 2 – kirpimo įtempiai apskaičiuoti pagal A_0

Fig. 2.43. Comparison of shearing strength paths: 1 – shear strength calculated according to A ; 2 – shear strength calculated according to A_0

2.6 lentelė. Pikinės grunto kerpamojo stiprio vertės (Skuodis, Tamošiūnas 2014)
Table 2.6. Peak soil shearing strength parameters (Skuodis, Tamošiūnas 2014)

	φ_m°	c_m , kPa
A	28,77	6,07
A_0	28,75	5,56

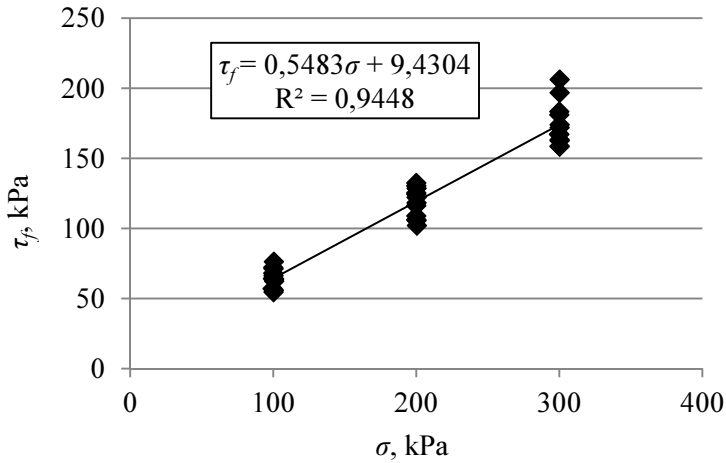
2.7 lentelė. Įtempių palyginimas esant pikiniam kerpamajam stipriui (Skuodis, Tamošiūnas 2014)
Table 2.7. Comparison of peak soil shearing strength parameters (Skuodis, Tamošiūnas 2014)

A		A_0		$\Delta\sigma$, %	$\Delta\tau_f$, %
σ , kPa	τ_f , kPa	σ , kPa	τ_f , kPa		
100,14	61,20	89,89	54,94	11,40	11,39
199,75	105,51	181,16	95,69	10,26	10,26
300,20	184,76	271,38	167,02	10,62	10,62

2.4.2. Bandymų kiekio ir vertikalųjų apkrovų įtaka kerpamo grunto stiprio parametrui

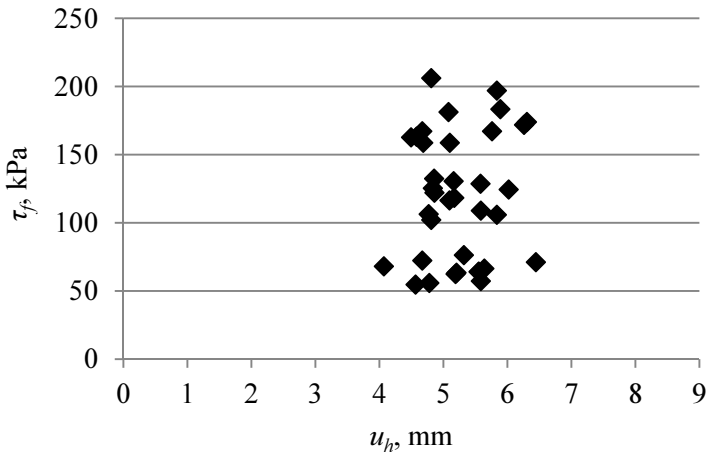
Inžinerinėje praktikoje grunto mechaninių savybių rodiklius, tokius kaip vidinės trinties kampas ir sankiba, tam pačiam gruntui galima nustatyti skirtingus. Tokį patį gruntą bandant prie skirtingų apkrovų, gaunami skirtingi vidutinių reikšmių rezultatai. Tais atvejais, kai skaičiuojamos charakteristinės grunto kerpamojo stiprio reikšmės, rezultatai priklauso nuo atliktų bandymų skaičiaus (Skuodis, Norkus, 2014).

Žemiau pateikiama pūrus grunto rezultatų sklaida, kuri priklauso nuo bandymų kiekio. Šiai priklausomybei nustatyti, atlikti tiriamo orasausio Klaipeidos pakrantės smėlinio grunto tiesioginio kirpimo bandymai esant vienodam normaliam įtempiui bandinio viršuje. Grunto kirpimo greitis – 0,5 mm/min. Viso atlikta po 6 bandymus prie $\sigma = 100$; 200 ir 300 kPa (2.44 pav.). Paveiksle 2.44 pateikiama pikinių tangentinių įtempių verčių priklausomybė nuo horizontalaus poslinkio. Atlikus 36 bandymus, nustatytas charakteristinis grunto vidinės trinties kampas $\varphi_k = 27,02^\circ$ ir sankiba $c_k = 1,12$ kPa, kai $t_\alpha = 0,95$.



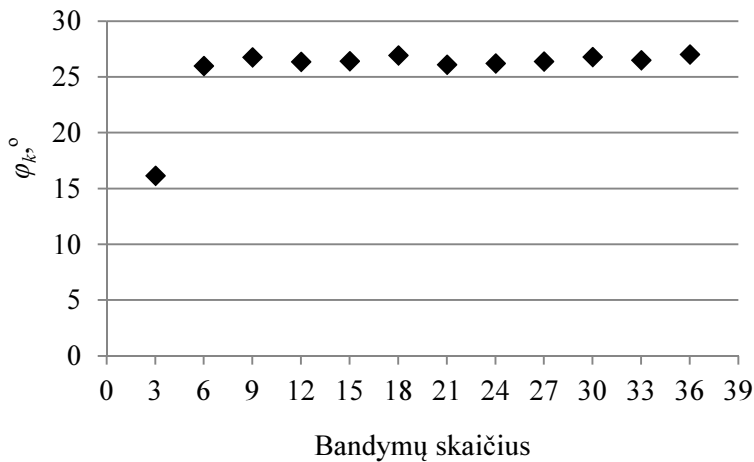
2.44 pav. Pikinės puros smėlinio grunto kerpamojo stiprio vertės
Fig. 2.44. Peak values of loose sand shear strength parameters

Pagal 2.45 paveiksle (2.45 pav.) pateiktus rezultatus, aiškiai matyti, kad grunto pikinis stipris pasiekiamas, kai horizontalus poslinkis apytiksliai lygus $u_h = 5$ mm.

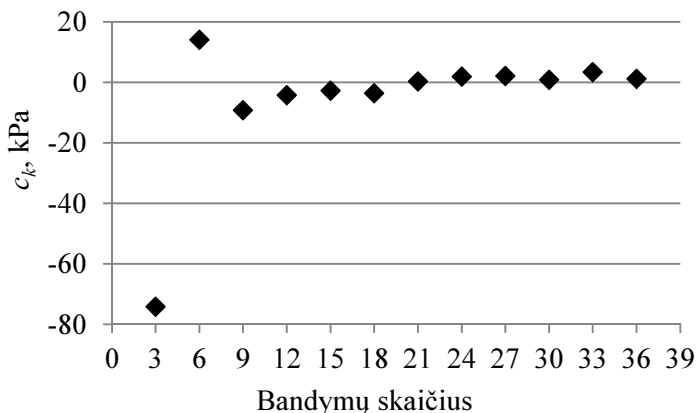


2.45 pav. Pikinių kerpamojo stiprio verčių priklausomybė nuo horizontalaus poslinkio
Fig. 2.45. Peak shearing stress versus horizontal displacement

Detaliam bandymų skaičiaus poveikiui grunto charakteristinėms kerpamojo stiprio vertėms, sudaryti vidinės trinties kampo (2.46 pav.) ir sankibos (2.47 pav.) priklausomybių nuo atliktų eksperimentų skaičiaus grafikai.



2.46 pav. Vidinės trinties kampo priklausomybė nuo bandymų skaičiaus
Fig. 2.46. Angle of internal friction versus quantity of tests

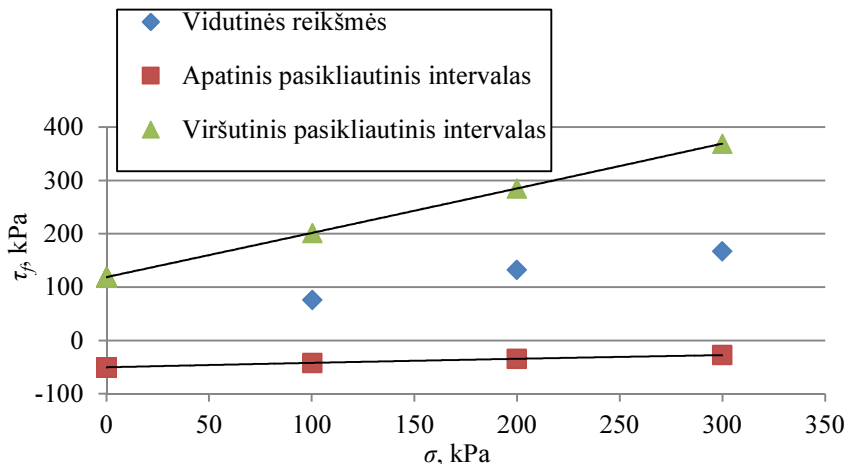


2.47 pav. Sankibos priklausomybė nuo bandymų skaičiaus
Fig. 2.47. Cohesion versus quantity of tests

Analizuojant pateiktus rezultatus 2.46 ir 2.47 paveikslus (2.46–2.47 pav.), matyti, kad atliekant tik 3 grunto tiesioginio kirpimo bandymus, ir pagal juos mažiausių kvadratų metodu apskaičiuojant charakteristines kerpamojo stiprio reikšmes, gaunama $\varphi_k = 16,14^\circ$ ir $c_k = -74,18$ kPa. Mažas vidinės trinties kampas ir neigiama sankiba yra nustatoma dėl statistinio kriterijaus t_α (Skuodis, Norkus 2014), kuris trim bandymams lygus $t_\alpha = 6,3$. Atliekant 36 bandymams $t_\alpha = 1,69$. Didinant bandymų skaičių, didėja vidinės trinties kampo ir sankibos charakteristinės vertės. Atlikus 36 bandymus ir suskaičiavus charakteristines

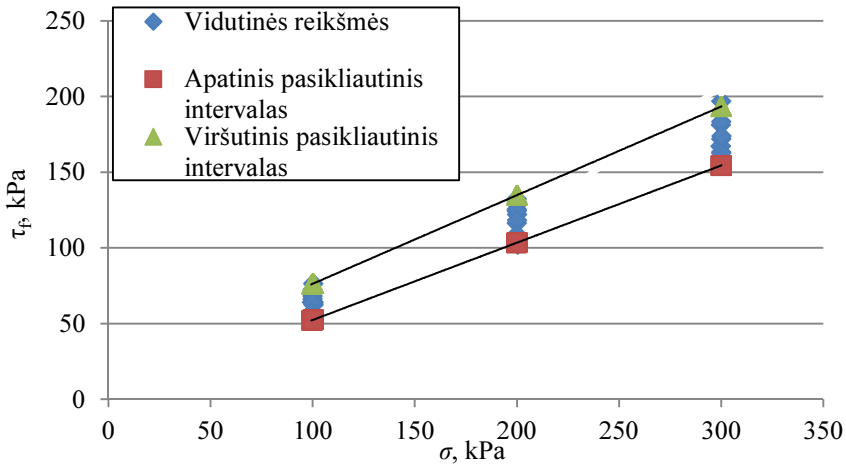
grunto kerpamojo stiprio vertes gaunamas $\varphi_k = 27,02^\circ$ ir $c_k = 1,12$ kPa. Pagal Bond ir Haris (2008), atliekant grunto kerpamojo stiprio bandymus užtenka atlikti nuo 2 iki 4 bandymų. Bandymų skaičius priklauso nuo asmens atliekančio bandymus patirties bei žinių apie tiriamo grunto vietovę, t. y. gruntines sąlygas ir pan. Remiantis LST EN 1997:2–2007 priede P.2.2 pateikta lentele, kurioje nurodytas mažiausias bandymų kiekis yra 1, didžiausias – 4. Nagrinėjant toliau, LST EN 1997:2–2007, priede W.3.2 yra nurodyta, kad vienam grunto sluoksniui reikia atlikti 5 bandymus prie skirtingų apkrovų, kai apkrovos parenkamos pagal būsimas mažiausią ir didžiausią grunto projektuojamą apkrovą, 3 apkrovos turėtų būti tarpinės. Taigi, remiantis Bond ir Haris (2008) bei LST EN 1997:2–2007 nėra aišku, kiek reikia atlikti grunto tiesioginio kirpimo bandymų, nes nėra vienos bendros nuomonės. Atlikti ekperimentai patvirtina, kad nei Bond ir Haris (2008), nei LST EN 1997:2–2007 pateiktos bandymų skaičiaus rekomendacijos neužtikrina patikimų grunto charakteristinių kerpamojo stiprio verčių. Reikia atlikti bent 18 bandymų, kad išvengti statistinio kriterijaus įtakos apskaičiuojant charakteristines grunto kerpamojo stiprio vertes (Skuodis, Norkus 2014). Jei bus atlikti 36 bandymai rezultatai praktiškai nesiskirs nuo 18 bandymų, nes t_α praktiškai nebedaro įtakos.

Grunto pasikliautinių intervalų ribų kitimas ($t_\alpha = 0,95$) nuo bandymo skaičiaus yra pateiktas 2.48 paveiksle (2.48 pav.) (kai atlikti 3 bandymai) ir 2.49 paveiksle (2.49 pav.). (kai atlikti 36 bandymai).



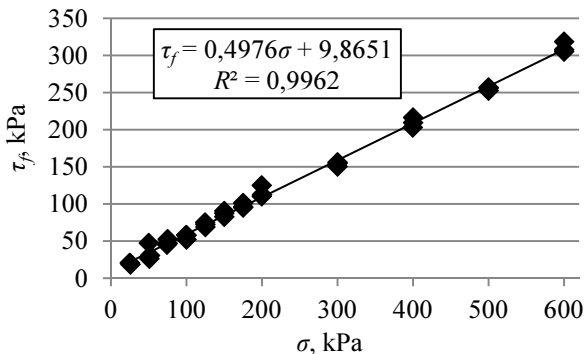
2.48 pav. Pasikliautinių intervalų ribos (3 bandymai)

Fig. 2.48. Confidence limits (3 tests)



2.49 pav. Pasikliautinių intervalų ribos (36 bandymai)
Fig. 2.49. Confidence limits (36 tests)

Nustačius, jog grunto charakteristinės kerpamojo stiprio vertės priklauso nuo bandymų skaičiaus, atliktas normalinių apkrovų dydžio įtakos vertinimas kerpamojo stiprio reikšmėms. Šiame tyrime naudoti didžiausio poringumo smėlinio grunto bandiniai. Bandinių pradinis tankis svyruoja nuo 1,480 iki 1,501 g/cm³. Gruntas kerpamas esant pastoviam vertikaliajam įtempiui bandinio viršuje ir pastoviu horizontaliu poslinkiu (0,5 mm/min). Naudotos vertikalios apkrovos bandinio viršuje: 25; 50; 75; 100; 125; 150; 175; 200; 300; 400; 500 ir 600 kPa. Su kiekviena apkrovos reikšme buvo atlikti 3 grunto kerpamojo stiprumo bandymai. Pikinės grunto kerpamojo stiprio reikšmės nustatytos pagal didžiausią τ/σ santykį. Nustatytos pikinės grunto kerpamojo stiprio vertės visiems bandymams pateiktos 2.50 paveiksle (2.50 pav.).



2.50 pav. Pikinės kerpamojo stiprio reikšmės
Fig. 2.50. Shearing strength peak values

Skaičiuojant charakteristines kerpamojo stiprumo reikšmes, kai vertinami visi 36 bandymai, gauti tokie rezultatai: vidinės trinties kampas $\varphi_k = 26,06^\circ$ ir sankiškumas $c_k = 7,31$ kPa. Analizuojant smėlinio grunto kerpamojo stiprumo pikinių reikšmių priklausomybę nuo poslinkio, pastebėta, kad dažniausiai gruntas nusikerpa esant 5 mm horizontaliam poslinkiui. Tačiau kerpant gruntą esant mažai vertikaliam apkrovai ($\sigma = 25$ kPa), horizontalaus poslinkio reikšmė gali būti ir 8 mm.

Iš 2.50 paveikslo (2.50 pav.) išskiriant kerpamojo grunto rezultatus į atskiras grupes, galima matyti vidinės trinties kampo priklausomybę nuo normalinių įtempių intervalo. Grunto sankiba šiuo atveju nenagrinėjama, nes norint nustatyti patikimą grunto sankibos reikšmę, reikia atlikti mažiausiai 18 bandymų (Skuodis, Norkus 2014).

Nagrinėjant vertikaliųjų įtempių intervalą tarp 25–100 kPa, nustatytas $\varphi_m = 26,22^\circ$. Esant vertikaliųjų įtempių intervaui tarp 300–400 kPa, nustatytas $\varphi_m = 29,12^\circ$. Šis rezultatų skirtumas tam pačiam gruntui, kuris prieš bandymą yra vienodo tankio, atsiranda dėl skirtingų įtempių veikiančių gruntą bandymo metu. Kerpant purius gruntu su didėjančiomis vertikaliųjų įtempių apkrovomis gaunamas φ_m didėjimas, o tankiems gruntams priešingai.

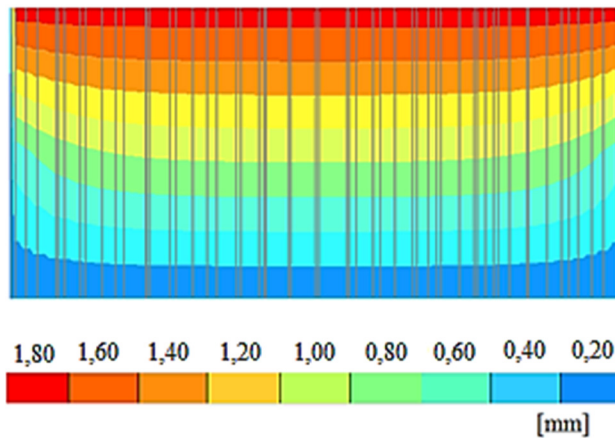
2.5. Grunto spūdumo modeliavimas baigtinių elementų metodu

Grunto modeliavimui BEM naudota programa „PLAXIS 3D FOUNDATION“. Pagrindiniai grunto parametrai, kurie įvesti į programą, pateikti 2.8 lentelėje. 2.8 lentelėje pateiktos dvi E_{oed} vertės, nes buvo modeliuojami du atvejai, kai odometrinis deformacijų modulis apskaičiuotas pagal įtempius ir deformacijas esančias bandinio viršuje ($E_{oed} = 22,16$ MPa) ir kai $E_{oed} = 19,03$ MPa apskaičiuotas pagal bendras deformacijas ir įtempius esančius bandinio apačioje.

2.8 lentelė. Parametrai naudoti grunto modeliavime baigtinių elementų metodu
Table 2.8. Used parameters for finite element method modeling

Parametras	Simbolis	Mato vnt.	Vertė
Pradinis poringumo koeficientas	e_o	–	0,798
Tankis drenuojančiomis sąlygomis	ρ_{unsat}	kg/m ³	1500
Puasono koeficientas	ν	–	0,270
Medžiagos modelis	–	Mohr–Coloumb	–
Vidinės trinties kampas	φ_m	°	27,82
Sankiba	c_m	kPa	1,12
Dilatacijos laipsnis	ψ_m	°	0,00
Odometrinis deformacijų modulis	E_{oed}	MPa	22,16; 19,03

Gruntas modeliuojamas keliais etapais, t. y. iš pradžių sukuriamas grunto ir kompresinio aparato – odometro diskretinis modelis. Kitas etapas – atliekamas grunto apkrovimas su išskirstyta 400 kPa apkrova ant standžios plokštės, kuri imi-tuoja porinį akmenį. Skaitinis spūdumo modeliavimas parodė, kad didžiausia grunto deformacija yra ties apkrovą perduodančiu poriniu akmeniu (2.51 pav.).



2.51 pav. Poslinkių pasiskirstymas odometre (Skuodis *et al.* 2013)

Fig. 2.51. Total displacements in oedometer (Skuodis *et al.* 2013)

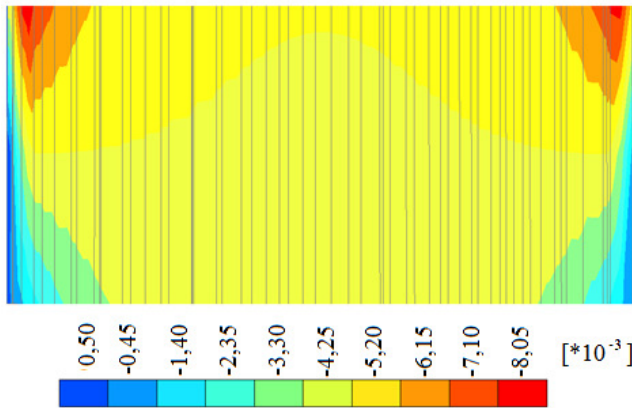
Ties odometro žiedo sienoje poslinkio praktiškai nėra, nes dėl veikiančių tangentinių įtempių gruntas pakimba ant modeliuojamo odometro vidinės žiedo sienos (2.52 pav.).



2.52 pav. Tangentinių įtempių pasiskirstymas odometre

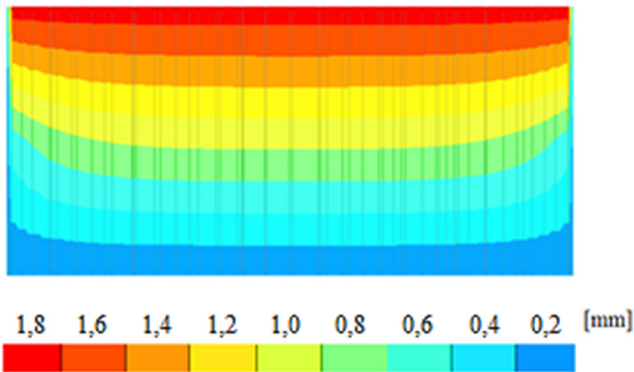
Fig. 2.52. Tangential stress distribution in oedometer

Analizuojant tūrinės deformacijas ε_v , pateiktas 2.53 paveiksle (2.53 pav.), pastebima, kad didžiausi poslinkiai yra bandinio viršuje ties porinio akmens kraštais. Mažiausios tūrinės deformacijos nustatytos odometro apačioje ties modeliuojamo žiedo vidine puse. Inžinerinėje praktikoje yra priimta, kad grunto deformacijų modulis yra apskaičiuojamas pagal bandinio susispaudimo aukštį (Amšiejus *et al.* 2006), tačiau iš modeliavimo rezultatų yra matoma, kad grunto bandinys per visą savo tūrį deformuojasi nevienodai. Dėl šios priežasties, patikrinus įtempių dydį bandinio apačioje, gautas 10 % įtempių skirtumas nuo esančių įtempių bandinio viršuje. Panašus skirtumas yra nustatytas ir eksperimentiškai atliekant grunto kirpimo bandymus, kai įtempiai yra matuojami bandinio apačioje (Amšiejus *et al.* 2014). Atliekant kirpimo bandymus, įtempių skirtumas kinta priklausomai nuo grunto tankio ir horizontalaus poslinkio.

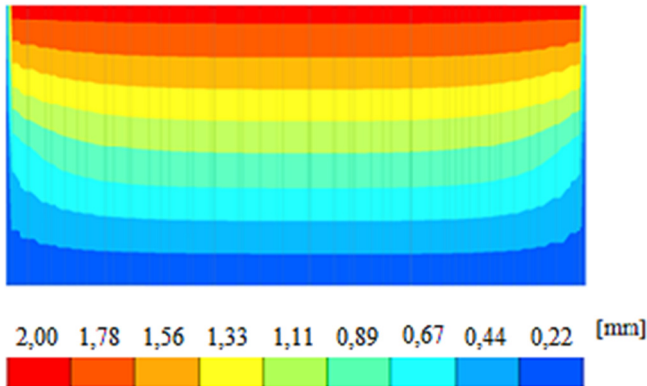


2.53 pav. Tūrinės deformacijos odometre
Fig. 2.53. Volumetric strains in oedometer

Grunto deformacijos, kurios nustatytos BEM modeliavime naudojant $E_{oed} = 22,16$ MPa pateiktos 2.54 paveiksle (2.54 pav.) ir 2.55 paveiksle (2.55 pav.) pateiktos deformacijos, naudojant $E_{oed} = 19,03$ MPa (Skuodis, Norkus 2014). Atliekant skaitinį modeliavimą su 10 % mažesne grunto deformacijų modulio verte, kuri nustatyta pagal eksperimentinius bandymus, gaunamas 10 % mažesnis nuosėdis (Skuodis, Norkus 2014). 10 % rezultatų skirtumas gaunamas dėl normalinių įtempių sukiamų tangentinį įtempių atsiradimo ties vidiniu odometro žiedo paviršiumi (2.52 pav.).



2.54 pav. Bendros deformacijos odometre ($E_{oed} = 21,27$ MPa)
 Fig. 2.54. Total displacement in oedometer ($E_{oed} = 21,27$ MPa)



2.55 pav. Bendros deformacijos odometre ($E_{oed} = 19,03$ MPa)
 Fig. 2.55. Total displacement in oedometer ($E_{oed} = 19,03$ MPa)

2.6. Grunto spūdumo modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu

Skaitinis eksperimentas atliktas pasitelkus diskretinių elementų metodą. Šis metodas yra pritaikytas birių medžiagų modeliavimui. Sudarant diskretinį modelį, dėl ribotų skaičiavimo resursų, skaičiavimo apimtims sumažinti, atitinkamai sumažinti odometro matmenys (H , D). Skaitiniam eksperimentui pasirinktas odometro aukštis $H = 0,00484$ m ir žiedo skersmuo $D = 0,0102$ m. Grunto dalelių matmenys išliko tie patys, kaip ir realių dalelių matmenys (pagal nustatytą granulimetrinės sudėties kreivę).

Skaitiniam eksperimentui parinktos tokios dalelių parametų vertės: grunto dalelių Puasono koeficientas $\nu = 0,17$, metalinio žiedo Puasono koeficientas $\nu = 0,3$; metalo tankis $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, metalo deformacijų modulis $E = 200 \text{ GPa}$. Kitos parametų vertės, kurios naudotos skaitiniame DEM modeliavime pateiktos 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. DEM modeliuojamo odometrino bandymo parametrai

Table 2.9. Used parameters for DEM modeling of oedometer

Parametras	Skaitinis eksperimentas		
	Naudota disertaciniame tyrime	Literatūros apžvalga*	Literatūros šaltinis*
Kietųjų dalelių tankis ρ_s , kg/m^3	2650; 2 650 000	2600; 2650; 2340; 2500; 2730; 2650×10^9	Markauskas, Kačianauskas (2006); Tumonis <i>et al.</i> (2012); Latham <i>et al.</i> (2009); Kim <i>et al.</i> (2012); Thongmunee <i>et al.</i> (2011); Macaro, Utili (2012)
Dalelės deformacijų modulis E_p , MPa	10; 78 000; 98 000	4,61; 26 600; 300; 568–2400; 3000–30 000; 4000–75 000; 63,9–120,3; 70 000	Tumonis <i>et al.</i> (2012); Latham <i>et al.</i> (2009); Balevičius <i>et al.</i> (2004); Geng <i>et al.</i> (2013); Widuliński <i>et al.</i> (2009); Cavarretta <i>et al.</i> (2012); Belheine <i>et al.</i> (2009); Macaro, Utili (2012)
Dalelių skaičius n	38 923; 46 095	2658; 6000; 205–1915; 4150; 10 000; 1	Markauskas, Kačianauskas (2006); Wu <i>et al.</i> (2009); Xu <i>et al.</i> (2002); Nakashima <i>et al.</i> (2011); Modenese <i>et al.</i> (2012); Jasevičius <i>et al.</i> (2011)
Trinties koeficientas tarp dalelių μ	0,84	0,5; 0,5; 0,25; 0,6; 0,1–0,9; 0,5; 0,7; 0,66; 0,5	Markauskas, Kačianauskas (2006); Cheng <i>et al.</i> (2003); Kim <i>et al.</i> (2012); Nakashima <i>et al.</i> (2011); Wiącek <i>et al.</i> (2012); Bagherzadeh-Khalkhali <i>et al.</i> (2008); Thongmunee <i>et al.</i> (2011); Longmore <i>et al.</i> (2013); Minh, Cheng (2012)

2.9 lentelės pabaiga
End of Table 2.9

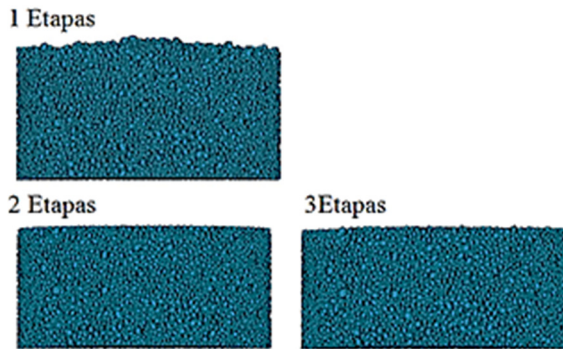
Parametras	Skaitinis eksperimentas		
	Naudota disertaciniame tyrime	Literatūros apžvalga*	Literatūros šaltinis*
Trinties koeficientas tarp dalelių ir sienų μ	0,3	0; 0; 1,0; 0,5; 0,5; 0	Markauskas, Kačianauskas (2006); Kim <i>et al.</i> (2012); Nakashima <i>et al.</i> (2011); Bagherzadeh-Khalkhali <i>et al.</i> (2008); Thongmune <i>et al.</i> (2011); Minh, Cheng (2012)
Trinties koeficientas tarp sienų μ	0,3	1,0; 0,5; 0	Nakashima <i>et al.</i> (2011); Bagherzadeh-Khalkhali <i>et al.</i> (2008); Minh, Cheng (2012)
Riedėjimo trintis μ_r	0,04	0,000016; 0,15; 0,01; 0,05	Nakashima <i>et al.</i> (2011); Widuliński <i>et al.</i> (2011); Wiącek <i>et al.</i> (2012); Pocius, Balevičius (2012)
Perskaičiavimo žingsnis Δt , s	2×10^{-7} ; 5×10^{-7}	1×10^{-7} ; $1,25 \times 10^{-6}$; $2,02 \times 10^{-8}$; $4,44 \times 10^{-8}$; 1×10^{-4}	Markauskas, Kačianauskas (2006); Nakashima <i>et al.</i> (2011); Liu <i>et al.</i> (2012); Li <i>et al.</i> (2012)
Apkrovimo greitis v , m/s	$4,84 \times 10^{-3}$	0,1; 5×10^2 %; $0,1^* \times 10^{-4}$ ϵ/s	McDowell <i>et al.</i> (2009); Bagherzadeh-Khalkhali <i>et al.</i> (2008)

* Literatūros apžvalgoje pateiktos reikšmės eilė atitinka literatūros šaltinio eilės numerį.

Skaitinis eksperimentas vykdomas trim etapais. Pirmajame etape dalelės generuojamos žinomo tūrio talpoje esančioje virš odometro ir supilamos į odometrą. Antrajame etape išlyginamas odometro paviršius, t. y. atliekamas dalelių nubraukimas išlyginant paviršių. Trečiajame etape dalelės spaudžiamos vertikalia kryptimi pastoviu greičiu. Šie išvardinti etapai pavaizduoti 2.56 paveiksle (2.56 pav.).

Sumodeliuotų dalelių supylimo trukmė $t = 1$ s, per šį laiką tarpą dalelės nusistovi ir galima pradėti kitą etapą. Antrojo etapo (dalelių nubraukimo arba pavir-

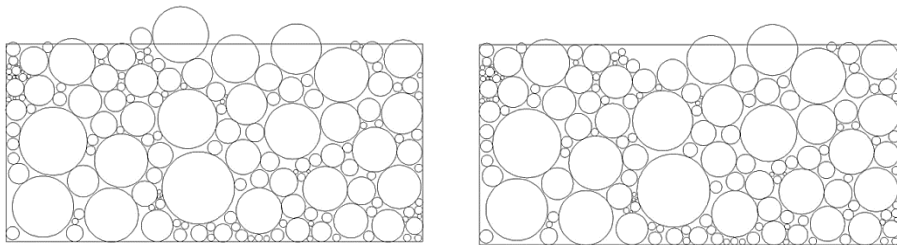
šiaus nulyginimo imitacija) trukmė $t = 5 \times 10^{-5}$, s. Šio etapo laiko sąnaudos nedidelės, nes pasirinktame aukštyje ir aukščiau, kur turi būti porinis akmuo yra panaikinamos nereikalingos dalelės.



2.56 pav. Odometrinių diskrečiųjų elementų metodo bandymo etapai (Skuodis *et al.* 2013)

Fig. 2.56. Discrete element method stages in oedometer modeling (Skuodis *et al.* 2013)

Dėl šios priežasties bandinio aukščiai tarp antro ir pirmo bandymų etapų skiriasi dalelių skaičiumi. Panaikinamos visos dalelės, kurių spindulių centrai yra aukščiau nei pasirinktas aukštis (2.57 pav.).

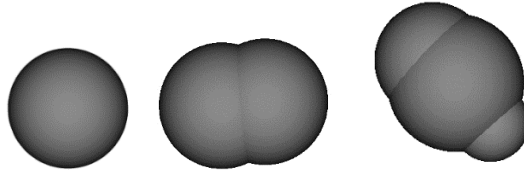


2.57 pav. Dalelių panaikinimas antrame etape: kairėje prieš panaikinimą, dešinėje po panaikinimo

Fig. 2.57. Particles deleting in second stage: on left before deleting, on right after deleting

Trečiajame etape vykdomas dalelių spaudimas, kurio trukmė $t = 1$ s. Parinkta grunto apspaudimo trukmė užtikrina statinį poveikį, dinaminis efektas tokiaame laiko tarpe nepasireiškia (Skuodis *et al.* 2014). Šiame etape parenkamas plokštumos imituojančios porininį akmenį aukštis (atsižvelgiant į dalelių panaikinimo aukštį). Ši plokštuma juda vertikaliai žemyn pastoviu greičiu. Visų trijų etapų (kas sudaro vieną bandymą) skaičiavimų trukmė ~ 1064 val. Skaičiavimai atlikti su VGTU klasteriu VILKAS, kuriame patalpintas DEMMAT algoritmas. Grunto

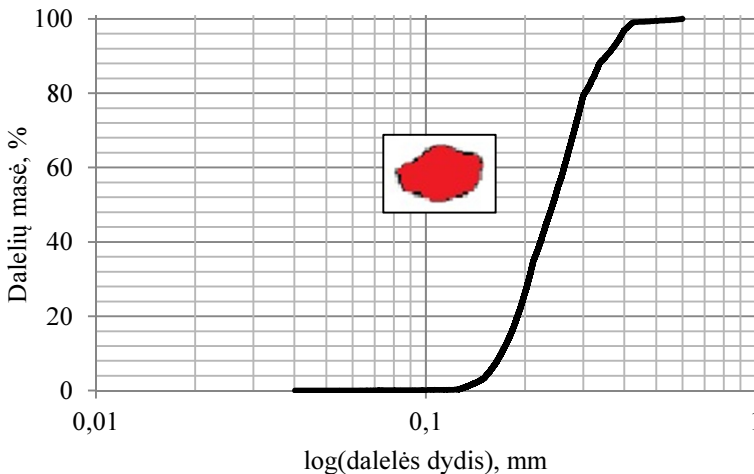
modeliavimui naudojamos trys grunto dalelių formos: idealaus rutulio, dalelė iš dviejų vienodų sferų ir dalelė iš trijų skirtingų sferų (2.58 pav.). Sferos, sudarytos iš trijų rutulių, spindulių centrai nėra ant vienos lokaliai atkuriamos dalelės ašies.



2.58 pav. Atkuriamų grunto dalelių formos: kairėje – idealaus rutulio, per vidurį – dalelė iš dviejų vienodų sferų, dešinėje – dalelė iš trijų skirtingų dydžių sferų

Fig. 2.58. Recreation of particle shape: ideal sphere (on left hand), particle from 2 spheres (in the middle), particle from 3 different spheres (on right hand)

Modeliuojant gruntą DEM, atkuriami eksperimentinių bandymų metu nustatyta Klaipėdos pakrantės smėlinio grunto granulometrinės sudėties kreivė (2.59 pav.). kadangi dalelių morfologiniai parametrai panašūs skirtingose grunto frakcijose, visai granulometrinei kreivei yra priskiriama vienoda grunto dalelių forma. Mažiausias dalelės skersmuo 0,04 mm, didžiausias – 0,6 mm.

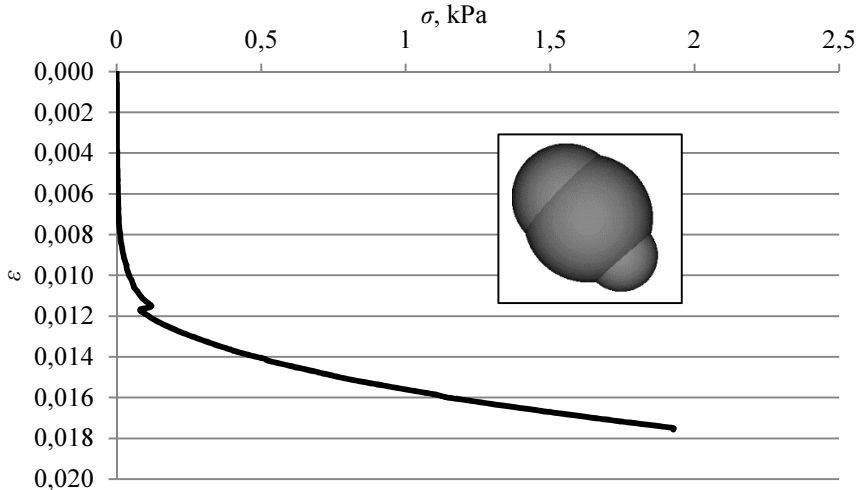


2.59 pav. Modeliuojamo grunto granulometrinė sudėtis

Fig. 2.59. Numerical granulometric composition curve

Pradiniame DEM modeliavimo etape, buvo pasirinkta naudoti mažą modeliujamos grunto dalelės deformacijų modulį E_p (2.9 lentelė). Gauti rezultatai yra

pateikiami 2.60 paveiksle (2.60 pav.). Tačiau šiuo atveju gautas įtempis ties poriniu akmeniu bandymo pabaigoje siekė vos 1,93 kPa. DEM rezultato skirtumas nuo eksperimentinio bandymo 99,52 %.

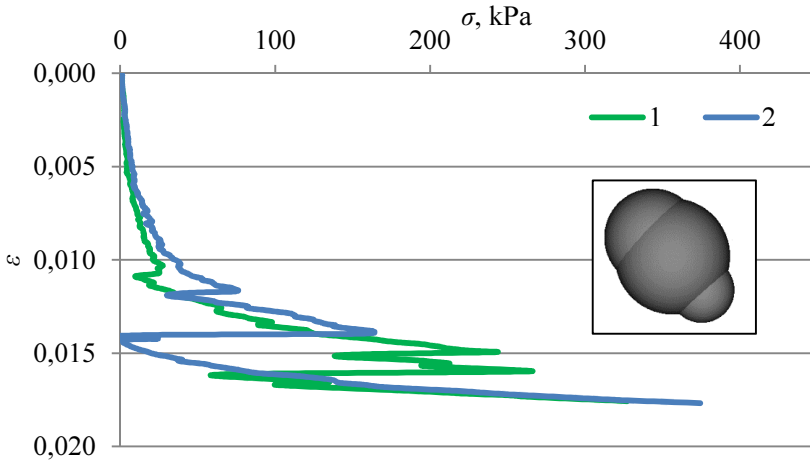


2.60 pav. Skaitiniai grunto spūdumo rezultatai, kai $E_p = 10$ MPa

Fig. 2.60. Numerical soil compression results, when $E_p = 10$ MPa

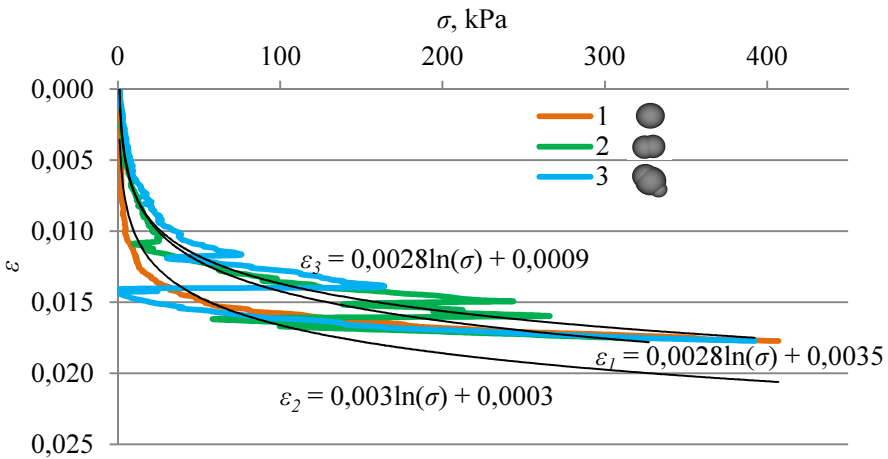
Skirtumas tarp eksperimento ir modeliujamo bandymo buvo didesnis nei 10 %, todėl nuspręsta naudoti didesnę modeliujamos grunto dalelės deformacijų modulį $E_p = 78$ ir 98 GPa bei itin didelį dalelių tankį, kai $\rho_s = 2\,650\,000$ kg/m³ (2.9 lentelė). Tokio didelio dalelių tankio naudojimas, pagal pirmą Niutono dėsnį (Bogdanovičius 2010), neturi įtakos modeliujamo grunto poringumui ir visai dalelių judėjimo mechanikai (Skuodis *et al.* 2014; Macaro, Utili 2012). Didelio deformacijų modulio naudojimas skaitiniame modeliavime ženkliai padidina skaičiavimo laiką. Gauti rezultatai pateikti 2.61 paveiksle (2.61 pav.).

Atlikus gautų rezultatų analizę (2.61 pav.), tolimesniems grunto spūdumo bandymų modeliavimams naudotas dalelės deformacijų modulis $E_p = 78$ GPa, nes spūdumo rezultatai praktiškai nesiskiria (Skuodis *et al.* 2014). Sudarant diskretinį modelį reikia parinkti racionalų sferų aprašančių vieną grunto dalelę skaičių. Parinktam sferų skaičiui yra keliami du reikalavimai: 1) gauti DEM rezultatai turi būti panašūs į eksperimentinius; 2) DEM skaitinio modeliavimo laikas turi būti kiek įmanoma trumpesnis. Skirtingu sferų skaičiumi aprašant modeliujamos dalelės formą gauti rezultatai pateikiami 2.62 paveiksle (2.62 pav.).



2.61 pav. Grunto spūdomo rezultatų palyginimas: 1 – dalelė sudaryta iš trijų skirtingų dydžių sferų ir $E_p = 78$ GPa, 2 – dalelė sudaryta iš trijų skirtingų dydžių sferų ir $E_p = 98$ GPa

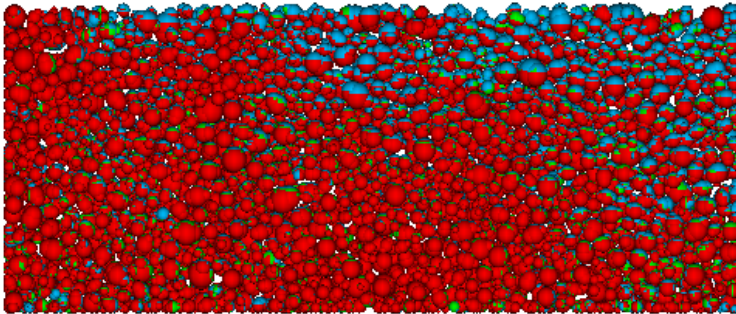
Fig. 2.61. Comparison of compression results: 1 – particle recreated from 3 different sizes spheres and $E_p = 78$ GPa; 2 – particle recreated from 3 different sizes spheres and $E_p = 98$ GPa



2.62 pav. Modeliuojamo grunto spūdomo kreivių priklausomybė nuo modeliuojamų dalelių formos: 1 – dalelė aprašyta viena idealaus rutulio formos sfera; 2 – dalelė aprašyta dviem vienodo dydžio sferomis; 3 – dalelė aprašyta trim skirtingų dydžių sferomis

Fig. 2.62. Comparison of compression results with different particle shape: 1 – particle recreated from sphere; 2 – particle recreated from 2 spheres; 3 particle recreated from 3 different sizes spheres

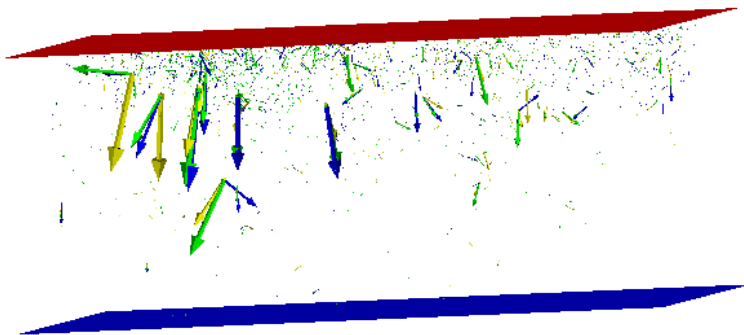
Analizuojant 2.62 paveikslą (2.62 pav.), matyti, kad spūdumo kreivė nuosekliai kinta tik tuo atveju, kai grunto dalelės yra modeliuojamos kaip idealios sferos. Darant sudėtingesnes formas, spūdumo kreivė pasidaro netolygi. Šis kreivės netolygumas paaiškinamas dalelių naujų pozicijų užėmimu skirtingais laiko tarpais (Skuodis *et al.* 2014). Ypač didelis įtempių šuolis pasireiškė tarp $t = 0,866\text{--}0,868$ s (2.63 pav.).



2.63 pav. Dalelių pozicijos skirtingais laiko tarpais: mėlyna spalva pažymėta dalelės pozicija, kai $t = 0,866$ s; žalia spalva pažymėta dalelės pozicija, kai $t = 0,867$ s; raudona spalva pažymėta dalelės pozicija, kai $t = 0,868$ s

Fig. 2.63. Particle position at different time: $t = 0,866$ s (blue color); $t = 0,867$ s (green color); $t = 0,868$ s (red color)

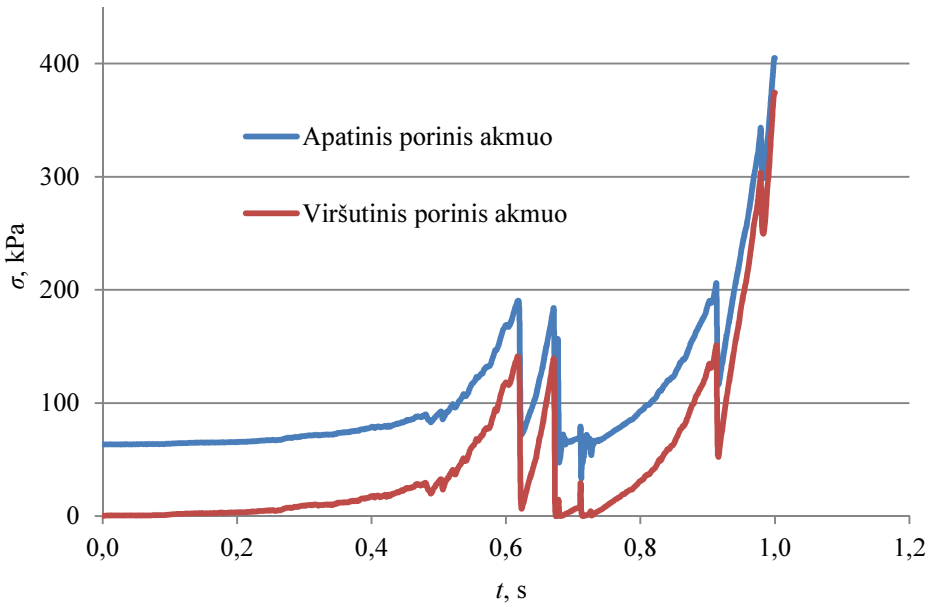
Pagal 2.63 paveiksle (2.63 pav.) pateiktas naujas dalelių pozicijas, negalima kokybiškai įvertinti dalelių judėjimo greičių vektorių per visą bandinio aukštį. Dalelių judėjimo greičių vektorių analizę vaizduoja 2.64 paveikslas (2.64 pav.), kai $t = 0,866\text{--}0,868$ s spūdumu modeliavimo metu. Analizuojant 2.64 paveikslą (2.64 pav.), matyti, kad didžiausias dalelių judėjimas yra ties grunto bandinį spaudžiančiu poriniu akmeniu (raudona plokštuma).



2.64 pav. Dalelių judėjimo greičių vektoriai, kai $t = 0,866\text{--}0,868$ s

Fig. 2.64. Particle velocities vectors at time $t = 0,866\text{--}0,868$ s

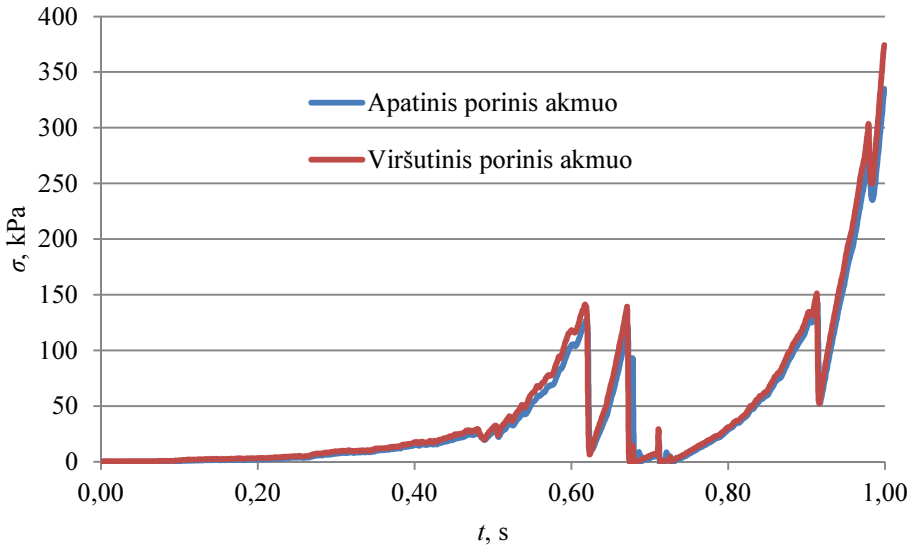
Pagal modeliavimo rezultatus nustatytos įtempių reikšmės bandinio viršuje ir apačioje, t. y. įtempiai tenkantys viršutiniam ir apatiniam poriniam akmeniui (Skuodis, Norkus 2014). Gauti rezultatai vaizduojami 2.65 paveiksle (2.65 pav.). Analizuojant gautus rezultatus pastebima, kad įtempiai bandinio apačioje yra didesni, nei viršuje. Įtempių padidėjimas bandinio apačioje yra dėl didelės grunto dalelių masės, nes naudojamas dalelės $\rho_s = 2\,650\,000\text{ kg/m}^3$.



2.65 pav. Įtempių pasiskirstymas ties viršutiniu ir apatiniu poriniu akmeniu
Fig. 2.65. Stress distribution at the top and bottom porous stone

Atlikus dalelių masių normalizavimą iki $\rho_s = 2650\text{ kg/m}^3$, 2.66 paveiksle (2.66 pav.) pateikiamas normalizuotas įtempių pasiskirstymas bandinio viršuje ir apačioje. Pagal 2.66 paveiksle (2.66 pav.) pateiktus normalizuotus įtempius ties apatiniu ir viršutiniu poriniu akmeniu, apskaičiuoti deformacijų moduliai skiriasi 10 % (Skuodis *et al.* 2014). Bandinio viršuje $E_{oed} = 21,27\text{ MPa}$ ir bandinio apačioje $E_{oed} = 19,03\text{ MPa}$.

Taikant įtempių normalizavimą, gaunami realūs įtempiai ties viršutiniu ir apatiniu poriniu akmeniu, nes yra įvertinama reali modeliujamų dalelių masė ir tankis. Įtempių normalizavimas yra taikomas trečiajame skyriuje gretinant eksperimentinius ir skaitinius rezultatus nustatytus diskrečiųjų elementų metodu (baiginių elementų metodu modeliujams gruntas su realaus tankio verte).



2.66 pav. Normalizuotas įtempių pasiskirstymas ties viršutiniu ir apatiniu poriniu akmeniu

Fig. 2.66. Normalized stress distribution at the top and bottom porous stone

Įtempių normalizavimas (2.66 pav.) atliekamas sumažinant pradinį modeliujamų grunto dalelių tankį ρ_s nuo 2 650 000 kg/m^3 iki 2650 kg/m^3 .

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Pagal literatūros analizę, dvimatės ir trimatės erdvės sferiškumo parametro nustatymo rezultatų skirtumas siekia vos 5–10 %. Tirtuose gruntuose pailgų dalelių praktiškai neaptika. Toks mažas dalelių sferiškumo parametrų nustatymo nesutapimo procentas yra dėl krintačios dalelės trajektorijos ant tiriamojo stalo pozicijos, kurią lemia didžiausias dalelės svorio centras. Nukritusi dalelė lieka gulėti ant tiriamojo stalo su didžiausio pastovumo plokštuma dalelės apačioje. Dėl šių priežasčių apsiribota tirti grunto daleles tik dvimatėje erdvėje.
2. Siekiant didesnio tikslumo tiriant morfologinius parametrus, pasirinkta naudoti geometrinį morfologinių parametrų nustatymo metodą. Palyginimo su etalonu metodas naudojamas tik po to, kai morfologiniai parametrai yra nustatyti geometriniumi metodu.

3. Įtempių šuoliai atsirandys grunto spūdumo metu nėra susiję su prietaiso jautrumu. Įtempių šuoliai atsiranda dėl grunto dalelių staigaus pozicijų pasikeitimo esant 50–100 kPa apkrovimo intervalui.
4. Patobulinta grunto spūdumo metodika leidžia tiksliau įvertinti nuosėdžius s_0 atsirandančius kontaktinėje plokštumoje tarp apkrovos stūmoklio porinio akmens ir grunto bandinio. Naudojant standartines bandymų metodikas galima įvertinti tik konsolidacijos s_1 ir valkšnumo s_2 nuosėdžius.
5. Grunto kerpamojo stiprio parametrai priklauso nuo grunto tiesioginio kirpimo metodikos. Atliekant grunto tiesioginio kirpimo bandymus, reikia tinkamai parinkti bandymų metodiką, nes gauti rezultatai gali skirtis dvigubai. Kerpant gruntą tiesioginio kirpimo apratu, reikia tinkamai parinkti vertikalias apkrovas, nes grunto kerpamojo stiprio parametrai priklauso nuo vertikalių apkrovų dydžio.
6. Kerpant purų gruntą prie vis didesnių apkrovų, gaunamas vidinės trinties kampo didėjimas, o tankiems gruntams priešingai. Charakteristinės grunto kerpamojo stiprio reikšmės priklauso nuo bandymų kiekio, t. y. tiesiogiai priklauso nuo statistinio kriterijaus. Norint išvengti statistinio kriterijaus įtakos rezultatų patikimumui, reikia atlikti ne mažiau nei 18 grunto tiesioginio kirpimo bandymų.
7. Remiantis eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatais, rekomenduojama eksperimentinius bandymus atlikti pagal patobulintą metodiką. Tik tokiu atveju eksperimentinių ir skaitinių spūdumo bandymų įtempių ir deformacijų kreivės sutaps. Skaitiniam DEM spūdumo modeliavimui pakanka naudoti 3 sferas aprašančias vieną grunto dalelę, jei modeliuojamai dalelei yra priskiriamas realus dalelės deformacijų modulis $E_p = 78$ GPa. Norint pagreitinti skaitinį modeliavimą, rekomenduojama naudoti didesnę modeliuojamų dalelių tankį. Didelio tankio ($\rho_s = 2\,650\,000$ kg/m³) naudojimas atliekant skaitinį modeliavimą, sutrumpino skaičiavimo laiką apytiksliai 5 kartus.

3

Eksperimentinių ir skaitinių tyrimų gretinimas

Rezultatų palyginimas pradedamas nuo realių grunto dalelių morfologinių parametrų gretinimo su skaitiškai atkuriamų grunto dalelių morfologiniais parametrais dvimatėje erdvėje. Trimatės erdvės atvejis nenagrinėjamas, dėl anksčiau 2 skyriuje išvardintų priežasčių. Eksperimentiškai nustatyti vidutiniai grunto dalelių morfologiniai parametrai (įvertinus visas tirtas Baltijos jūros pakrantės smėlinio grunto frakcijas) pateikti 2 skyriuje. Taip pat, šiame skyriuje pateikiamas eksperimentinių ir skaitinių grunto spūdumo rezultatų gretinimas, pagal 2 skyriuje aprašytas eksperimentinių ir skaitinių grunto spūdumo bandymų metodikas.

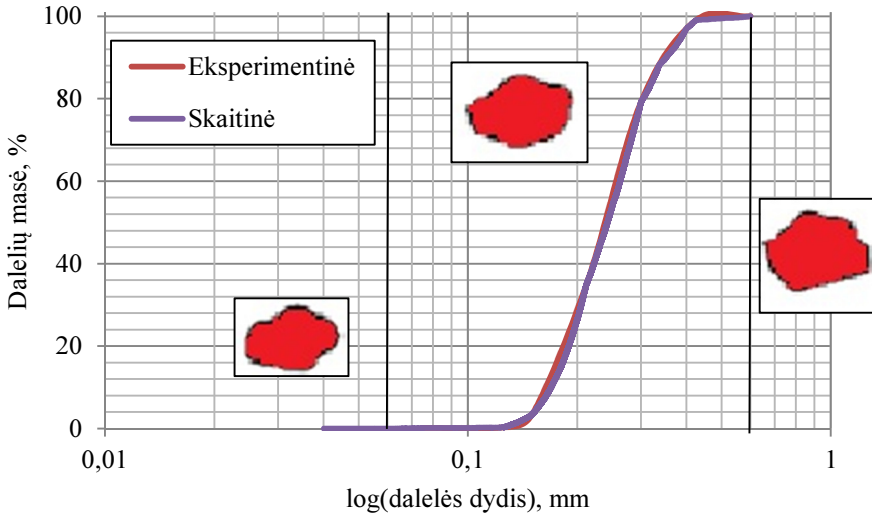
Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Skuodis *et al.* 2014).

3.1. Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas

Smėlinio grunto elgsenos skaitinio modeliavimo DEM patikimumas ir tikslumas priklauso nuo grunto ir jį sudarančių dalelių diskretizacijos lygmens. Iki šiol nėra

konkretaus atsakymo ar pasiūlymo, koks turi būti dalelių diskretizacijos laipsnis ir fiziniai parametrai sudarant grunto dalelės diskretinį modelį, t. y. kiek sferų reikia naudoti aprašant vieną grunto dalelę, kad modeliuojamo grunto diskretinio modelis galėtų atspindėti realaus grunto elgseną. Taip pat, gaunamas skaitinio DEM modeliavimo rezultatų patikimumas būtų patikimas.

Dėl šios priežasties, atlikta atkuriamų dalelių morfologinių parametru priklausomybės nuo vieną dalelę aprašančių sferų skaičiaus analizė. Išskiriant tirtą Klaipėdos pakrantės smėlinį gruntą į tris frakcijas, t. y. smulkų, vidutinio rupumo ir rupų (Amšiejus *et al.* 2002), nustatytos vidutinės frakcijų būdingos dalelių formos (3.1 pav.). Nustatyta bendra visam gruntui dalelės forma pateikiama 3.1 lentelėje kartu su skirtingais atkuriamų dalelių formų diskretizacijos laipsniais.



3.1 pav. Vidutinės dalelių formos skirtingose frakcijose















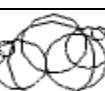

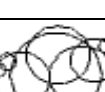







Fig. 3.1. Particle shapes in different fractions

3.1 lentelė. Dalelių formų palyginimas

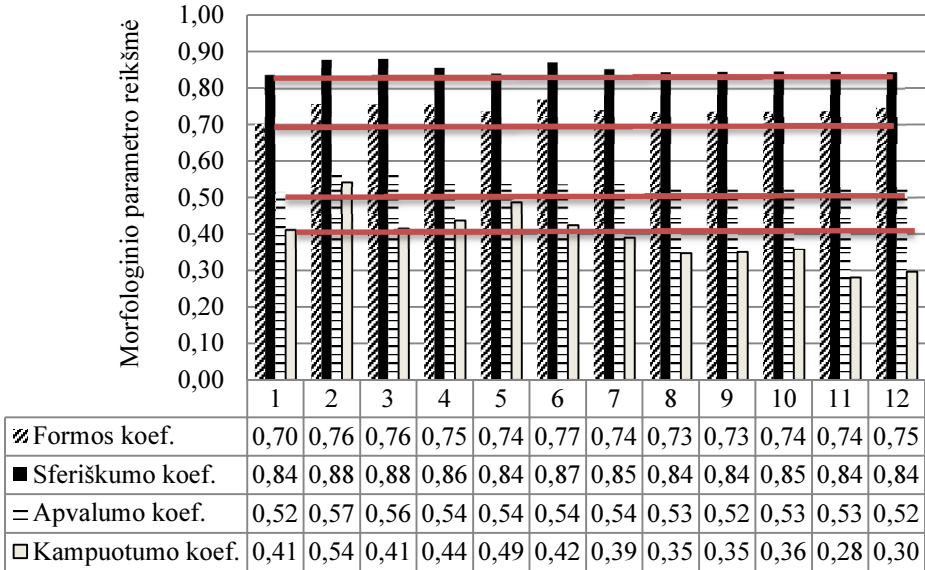
Table 3.1. Comparison of particle shapes

Klaipėdos pakrantės būdinga dalelių forma	Atkuriamų dalelių sferų skaičius	Atkuriamų dalelių persiklojusių sferų vaizdas	Klaipėdos pakrantės būdingos dalelės formos perimetras	Dalelių formų palyginimas
	2			

3.1 lentelės pabaiga
End of Table 3.1

Klaipėdos pakrantės būdinga dalelių forma	Atkuriamų dalelių sferų skaičius	Atkuriamų dalelių persiklojusių sferų vaizdas	Klaipėdos pakrantės būdingos dalelės formos perimetras	Dalelių formų palyginimas
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

Dvimatėje erdvėje atkūrus daleles su skirtingais sferų kiekiais, atliktas skaitinių ir eksperimentinių morfologinių parametŖų palyginimas (3.2 pav.).



3.2 pav. Morfologinių parametŖų palyginimas: 1 – eksperimentiniai rezultatai; 2–12 – skaitiniai atkuriamų dalelių formų duomenys

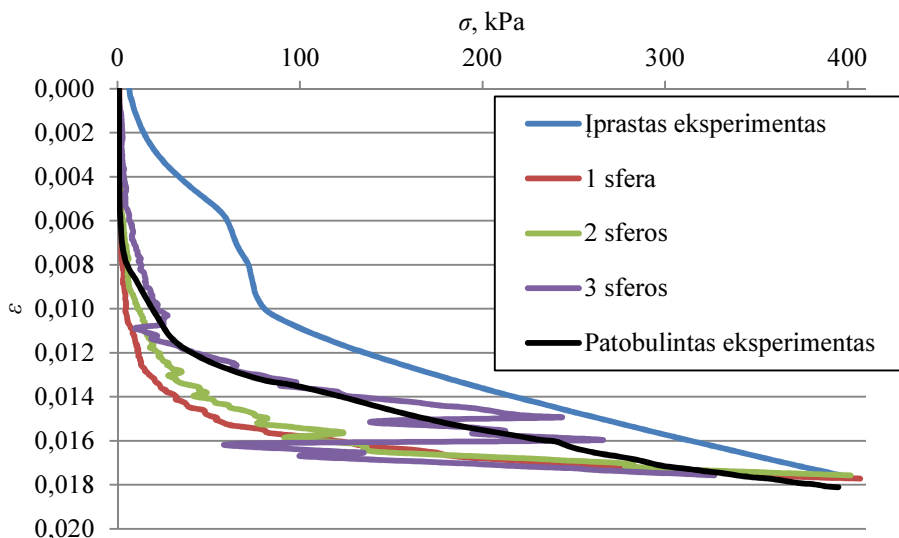
Fig. 3.2. Comparison of morphology parameters: 1 – experimental results; 2–12 – spheres quantity of recreated numerical particle shapes

Pagal atkuriamų morfologinių parametŖų panašumą į eksperimentiškai SEM mikroskopinės bei vaizdų analizės metu nustatytus, galima teigti, kad reikia naudoti bent 8–11 sferų, jei norima atkurti panašų dalelių formos koeficientą. Jei siekiama atkurti panašų sferiškumo koeficientą – reikia naudoti 7–11 sferas. Atkuriant kuo artimesnį apvalumo koeficientą – pakanka 8–12 sferų. Kampuotumo koeficientas jau yra panašus į eksperimentiškai nustatytą, jei yra naudojamos 3–4 sferos, tačiau pastebima, kad naudojant 7 ir daugiau sferų kampuotumo koeficientas mažėja.

Modeliuojant gruntą diskrečiųjų elementų metodu, naudojama nuo 1 iki 3 sferų aprašančių vienos dalelės formą. Pateikiamas eksperimentinio spūdumo bandymo palyginimas su skaitinio DEM modeliavimo rezultatais (3.3 pav.), kai skaitiniame modeliavime dalelių $E_p = 78$ GPa ir $\rho_s = 2\,650\,000$ kg/m³ (Skuodis *et al.* 2014).

Analizuojant 3.3 paveikslą (3.3 pav.), matyti, kad didėjant vieną dalelių aprašančių sferų skaičiui, spūdumo kreivė artėja link eksperimentinio bandymo kreivės.

vės. Tačiau panaudojus patobulintą eksperimentinio bandymo kreivę rezultatų palyginime, matoma kad ši kreivė artėja prie skaitinio modeliavimo kreivės. Šiuo atveju pavyko sugretinti eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatus, kai abi kreivės artėjo viena kitos link.



3.3 pav. Spūdumo rezultatų palyginimas
Fig. 3.3. Comparison of compression results

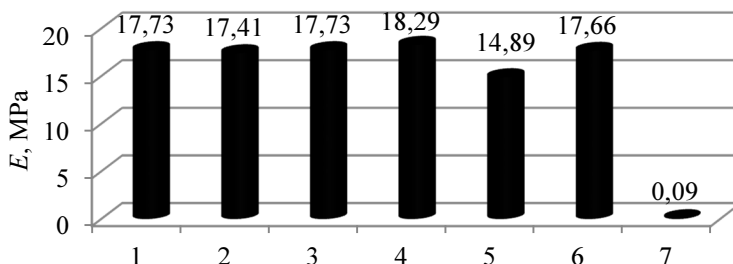
Patobulinto eksperimento spūdumo kreivę geriausiai aprašo logaritminė priklausomybė: $\varepsilon = 0,0025\log(\sigma) + 0,0029$, kai tuo tarpu įprasta bandymo metodika atlikto eksperimento priklausomybę aprašant su logaritmine priklausomybe, gaunama beveik dvigubai didesnė išraiškos vertė: $\varepsilon = 0,0045\log(\sigma) - 0,0101$. Skaitinio modeliavimo DEM spūdumo kreivę geriausiai aprašo logaritminė priklausomybė $\varepsilon = 0,0028\log(\sigma) + 0,0009$, kuri praktiškai sutampa su patobulinto eksperimento rezultatais.

Įprastai bandoma skaitinio modeliavimo kreivę artinti prie eksperimento. Šiuo atveju dažnai diskretiniame modelyje naudojami iškreipti koeficientai, kurie neatspindi realios grunto dalelių tarpusavio sąveikos.

Išreiškiant spūdumo rezultatus per grunto deformacijų modulį E , atliktas eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas (3.4 pav.). Į šį palyginimą įtraukti skaitinio modeliavimo DEM rezultatai, naudojant šias dalelių deformacijų modulių vertes: $E_p = 10; 78\ 000$ ir $98\ 000$ MPa.

Atlikus rezultatų analizę, matyti, kad dalelės deformacijų modulis E_p turi didžiulę reikšmę modeliuojamo bandinio deformacijų moduliui E . Todėl, norint išvengti rezultatų nepatikimumo faktoriaus, rekomenduotina skaitiniame DEM

odometrinio bandymo modeliavime naudoti tikrąjį smėlio dalelės deformacijų modulį $E_p = 78$ GPa.



3.4 pav. Deformacijų modulių palyginimas: 1 – eksperimentiškai nustatyta įprasta metodika; 2 – eksperimentiškai nustatyta patobulinta metodika; 3 – DEM nustatyta, kai $E_p = 78$ GPa ir dalelė aprašyta 1 sfera; 4 – DEM nustatyta, kai $E_p = 78$ GPa ir dalelė aprašyta 2 sferom; 5 – DEM nustatyta, kai $E_p = 78$ GPa ir dalelė aprašyta 3 sferom; 6 – DEM nustatyta, kai $E_p = 98$ GPa ir dalelė aprašyta 3 sferom; 7 – DEM nustatyta, kai $E_p = 10$ MPa ir dalelė aprašyta 1 sfera

Fig. 3.4. Comparison of E : 1 – usual experimental test; 2 – improved experimental test; 3 – DEM, $E_p = 78$ GPa and particle discretized by 1 sphere; 4 – DEM, $E_p = 78$ GPa and particle discretized by 2 spheres; 5 – DEM, $E_p = 78$ GPa and particle discretized by 3 spheres; 6 – DEM, $E_p = 98$ GPa and particle discretized by 3 spheres; 7 – DEM, $E_p = 10$ Pa and particle discretized by 1 sphere

3.2. Trečiojo skyriaus išvados

1. Remiantis eksperimentinių ir skaitinių bandymų rezultatų analize, rekomenduotina eksperimentinius bandymus atlikti pagal patobulintą metodiką. Tai leidžia užtikrinti eksperimentinių ir skaitinių spūdumo bandymų kreivių sutapimą.
2. Skaitiam modeliavimui pakanka naudoti 3 sferas aprašančias vieną grunto dalelę, jei modeliuojamai dalelei yra priskiriamas realus dalelės deformacijų modulis.
3. Norint pagreitinti skaitinį DEM modeliavimą, nerekomenduojama naudoti mažą dalelės deformacijų modulį (10 MPa), nes gaunamas modeliuojamo grunto deformacijų modulis, esant tai pačiai deformacijai kaip eksperimente yra tik 0,09 MPa.
4. Siūloma atlikti skaitinį DEM grunto modeliavimą su realaus dydžio modeliuojamos dalelės deformacijų verte (78 GPa).

Bendrosios išvados

1. Grunto dalelių morfologiniai parametrai turi reikšmingos įtakos deformuojamų smėlių elgsenai, kurią lemia dalelių persiskirstymas veikiant apkrovai. Todėl, eksperimentinių ir skaitinių tyrimų interpretacijai būtina tiesiogiai įvertinti grunto dalelių morfologinius parametrus.
2. Smėlinio grunto elgsenos ir jo dalelių diskretizavimui bei diskrečiųjų elementų metodo matematinio modelio patobulinimui būtina atlikti atskirų dalelių vaizdų analizę. Vaizdų analizės duomenys leidžia racionaliau parinkti atkuriamos dalelės formos diskretinį modelį ir naudoti kompiuterinius skaičiavimo resursus.
3. Pasiūlyti grunto spūdumo ir tiesioginio kirpimo standartinių bandymų patobulinimai leidžia nustatyti tikslesnius eksperimentinių tyrimų rezultatus. Tai leidžia tinkamai interpretuoti šiuos rezultatus ir atlikti kokybišką eksperimentinių ir skaitinių tyrimų patikrą bei rezultatų tarpusavio gretinimą.
4. Atliekant grunto eksperimentinius spūdumo bandymus sukurta patobulinta grunto spūdumo metodika, kurią naudojant yra gaunama tikroji spūdumo rezultatų kreivė. Patobulinta spūdumo metodika įvertina kontaktinės plokštumos nuosėdžius atsirandančius sąlyčio tarp porinio akmens ir grunto bandinio metu. Ši metodika leidžia įvertinti įtempių

šuo lius atsirandančius dėl dalelių persiskirstymo ir analizuoti grunto elgseną viso spūdumo ciklo metu.

5. Standartine įranga atlikti grunto eksperimentiniai tiesioginio kirpimo bandymai ir įvertinti prietaiso netikslumai, kurie atsiranda ties kirpimo žiedų tarpu. Nustatyta, kad kerpant gruntą tiek esant pastovioms apkrovoms, tiek prie pastovaus tūrio, tarpas tarp viršutinio ir apatinio kirpimo žiedo nėra pastovus. Kirpimo bandymų metu įvertinus kintamą kerpamąjį grunto plotą normaliniai ir tangentiniai įtempiai skiriasi apie 10 %. Pateikta charakteristinių grunto kerpamojo stiprių reikšmių įvertinimo metodika, kuria remiantis siūloma atlikti mažiausiai 18 bandymų, kad būtų išvengta statistinio kriterijaus įtakos rezultatų sklaidai.
6. Pagal skaitinių spūdumo bandymų rezultatų priklausomybes nuo morfologinių parametrų tyrimų rezultatų nustatyta, kad pakankamai tiksliai galima atkurti skaitinę spūdumo kreivę DEM aprašant vieną dalelę su trimis sferomis, gretinant ją su patobulinto eksperimento spūdumo kreive. Skaičiavimo greičiui padidinti (iki 5 kartų), galima naudoti didesnę nei natūralų grunto dalelės tankį ir tai neįtakoja spūdumo rezultatų.
7. Sukurtų patobulintų eksperimentinių ir skaitinių bandymų metodikų rezultatai gretinant tarpusavyje sutampa. Eksperimentinių bandymų metodikų patobulinimai gali būti naudojami normatyviniuose grunto mechaninių savybių nustatymo laboratoriniuose bandymuose. Skaitinių bandymų DEM rezultatai gali būti naudojami tolimesniam DEM vystymui ir rezultatų taikymui inžinerinėje praktikoje.

Literatūra

Abdelrahman, A.; Ashmawy, A. K.; Abdelmoniem, M. 2007. Development of large-scale universal apparatus for testing geosynthetic-soil systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 1(3): 341–353.

Aydogmus, T.; Tamaskovics, N.; Klapperich, H. 2002. Enhanced shear-pullout-testing device for the examination of the interaction behaviour of soil-geosynthetic-compound-systems, in *Proceedings 7th International Conference on Geosynthetics*. Nice: 1305–1308.

Alava, M. J.; Nukala, P. K. V. V.; Zapperi, S. 2006. Statistical models of fracture. *Advances in Physics*. 55(3–4): 349–476.

Alikonis, A.; Amšiejus, J.; Stragys, V. 1999. Improvement of shear box apparatus and methodology of test, in: *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, The 12th European Conference*. Amsterdam, Austria: 1053–1057.

Alkasawneh, W.; Malkawi, A. I. H.; Nusairat, J. H.; Albataineh, N. 2008. A comparative study of various commercially available programs in slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*. 35(3): 428–435.

Amšiejus, J. 2000. Analysis of methods for determining soil shear strength design. *Statyba*. 6(2): 120–127.

Amšiejus, J.; Dirgėlienė, N.; Norkus, A. 2010. Analysis of methods for evaluation of soil shear strength parameters, in *The 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius, Lithuania: 1077–1082.

Amšiejus, J.; Mackevičius, R.; Medzvieckas, J.; Sližytė, D.; Stragys, V. 2006. *Gruntų fizikinės ir mechaninės savybės: Laboratoriniai darbai*. Vilnius, Technika: 164 p.

Amšiejus, J.; Mackevičius, R.; Medzvieckas, J.; Stragys, V. 2002. *Gruntų mechanika. Laboratoriniai darbai*. Vilnius, Technika: 114 p.

Amšiejus, J.; Kačianauskas, R.; Norkus, A.; Tumonis, L. 2010. Investigation of the sand porosity via oedometer testing. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 5(3): 139–147.

Bagherzadeh–Khalkali, A.; Mirghasemi, A. A.; Mohammadi, S. 2008. Micromechanics of breakage in sharp–edge particles using combined DEM and FEM. *Particology*. 6(2008): 347–361.

Balevičius, R.; Džiugys, A.; Kačianauskas, R. 2004. Discrete element method and its application to the analysis of penetration into granular media. *Journal of Civil Engineering and Management*. 10(1): 3–14.

Bareither, C. A.; Edil, T. B.; Benson, C. H.; Mickelson, D. M. 2008. Geological and physical factors affecting the friction angle of compacted soils. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*. 134(10): 1476–1489.

Barrios, D. O. S. 2010. *Determination of soil properties for sandy soils and road base at Riverside campus using laboratory testing and numerical simulation*. Ph.D. thesis. Texas, A&M University: 210 p.

Belheine, N.; Plassiard, J.; Donze, F.; Darve, F.; Seridi, A. 2009. Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*. 36(1): 320–331.

Bitinas, A.; Žaromskis, R.; Gulbinskas, S.; Damušytė, A.; Žilinskas, G.; Jarmalavičius, D. 2005. The results of integrated investigations of the Lithuanian coast of the Baltic Sea: geology, geomorphology, dynamics and human impact. *Geological Quarterly*. 49(4): 355–362.

Blott, S. J.; Pye, K. 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*. 55: 31–63.

Bogdanovičius, A. 2010. *Fizikos pagrindai inžinerijoje, 1 dalis: vadovėlis*. Vilnius, Technika: 340 p.

Bond, A.; Harris, A. 2008. *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis: 621 p.

Bouvier, S.; Haddadi, H.; Levee, P.; Teodosiu, C. 2006. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal of Materials Processing Technology*. 172: 96–103.

BS ISO 3310–2:2013. *Test sieves. Technical requirements and testing. Test sieves of perforated metal plate*. BSI Customer services, 2013. 18 p.

Cavarreta, I. 2009. *The influence of particle characteristics on the engineering behaviour of granular materials*. Ph.D. thesis. London, London Imperial College: 421 p.

Cavarretta, I.; O'Sullivan, C.; Ibrahim, E.; Lings, M.; Hamlin, S. 2012. Characterization of artificial spherical particles for DEM validation studies. *Particology*. 10(2012): 209–220.

Cil, M. B.; K.; Alshibli, K. A. 2015. MOdeling the influence of particle morphology on the fracture behaviour of silica sand using a 3D discrete element method. *Comptes Rendus Mécanique*. 343: 133–142.

Chandler, H. W.; Sands, C. M. 2010. Including friction in the mathematics of classical plasticity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 34(1): 53–72.

Chang, M. C.; Kang, H. Y. 2009. Remediation of pyrenecontaminated soil by synthesized nanoscale zero-valent iron particles. *Journal of Environmental Science and Health. Part A*. 44: 576–582.

Charpentier, I.; Sarocchi, D.; Rodriguez, S. L. A. 2013. Particle shape analysis of volcanic clast samples with the Matlab tool MORPHEO. *Computers & Geosciences*. 51: 172–181.

Cheel, R. J. 2005. *Introduction to clastic sedimentology: Notes for a University level*. Canada, Brook University: 129 p.

Cheng, Y. P.; Nakata, Y.; Bolton, M. D. 2003. Discrete element simulation of crushable soil. *Géotechnique*. 53(7): 633–641.

Cheng, S.; Bryant, R.; Doerr, S.; Rhodri, W. P.; Wright, C. J. 2009. Application of atomic force microscopy to the study of natural and model soil particles. *Journal of Microscopy*. 231(3): 384–394.

Cho, G.; Dodds, J.; Santamarina, J. 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 132(5): 591–602.

Comina, C.; Fotti, S.; Musso, G.; Romero, E. 2008. EIT Oedometer: An advanced cell to monitor spatial and time variability in soil with electrical and seismic measurements. *Geotechnical Testing Journal*. 31(5): 1–9.

Cox, E. P. 1927. A method of assigning numerical and percentage values to degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*. 1(3): 179–183.

Cundal, P. A.; Strack, O. D. L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 29: 47–65.

Das, N. 2007. *Modeling three dimensional shape of sand grains*. Ph.D. thesis. Florida, University of South Florida: 134 p.

Deckner, F. 2013. *Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – influencing factors, predictions and measurements*. Ph.D. thesis. Stockholm, KTH, Royal Institute of Technology: 126 p.

Detert, M.; Weitbrecht, V. 2012. Automatic object detection to analyse the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. *River Flow*. 2012: 595–600.

Dundulis, K.; Gadeikis, S. 2006. Influence of morphometric characteristics of sand particles on the strength parameters of the sand soil in Lithuania. *Geologija*. 53: 52–56.

Dundulis, K.; Gadeikis, S.; Gadeikytė, S.; Račkauskas, V. 2006. Sand soils of Lithuanian coastal area and their geotechnical properties. *Geologija*. 53: 47–51.

Dundulis, K.; Gadeikis, S.; Ignatavičius, V. 2004. Kvartero nuogulų inžinerinių geologinių sąlygų formavimasis. Lietuvos gelmių raida ir ištekliai. Spec. *Litosferos* leidinys, Vilnius: 318–331.

Feda, J. 1982. *Mechanics of particulate materials – the principles*. Elsevier, Academia: 447 p.

Ferrellec, J. F.; McDowell, G. R. 2010. A method to model realistic particle shape and inertia in DEM. *Granular Matter*. 12: 459–467.

Gan, J. K. M.; Fredlung, D. G.; Rahardjo, H. 1988. Determination of shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*. 25: 500–510.

Gasiūnienė, V. R. 1998. *Lithuanian Solid Mineral Resources*. Vilnius, 50 p.

Geng, Y.; Yu, H. S.; McDowell, G. R. 2013. Discrete element modeling of cavity expansion and pressuremeter test. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*. 8(3): 179–190.

Graham, D. J.; Reid, I.; Rice, S. P. 2005. Automated sizing of coarse grained sediments: Image–processing procedures. *Mathematical Geology*. 37(1): 1–28.

Hertz, H. 1882. Über die Berührung fester elastischer Körper, J. reine und angewandte. *Mathematik*. 92: 156–171.

Jasevičius, R.; Tomas, J.; Kačianauskas, R. 2011. Simulation of ultrafine silica particle on substrate. *Particulate Science and Technology: An International Journal*. 29(2): 107–126.

James, K. M.; Soga, K. 2005. *Fundamentals of soil behaviour. Third edition*. New Jersey, John & Sons: 558 p.

Jarmalavičius, D.; Satkūnas, J.; Žilinskas, G.; Pupienis, D. 2011. Dynamics of beaches of the Lithuanian coast (the Baltic Sea) for the period 1993-2008 based on morphometric indicators. *Environmental Earth Sciences*. 65(6): 1727–1736.

Jensen, A.; Fraser, K.; Laird, G. 2014. Improving the precision of discrete element simulations through calibration models in 13th *International LS–DYNA Users Conference*. Dearborn, Michigan: 1–11.

Khanal, M.; Tomas, J. 2008. Interparticle collision of particle composites – finite and discrete element simulations. *Particulate Science Technology: An International Journal*. 26(5): 460–466.

Kim, B. S.; Park, S. W.; Kato, S. 2012. DEM simulation of collapse behaviours of unsaturated granular materials under general stress states. *Computers and Geotechnics*. 42(2012): 52–61.

Kostkanová, V.; Herle, I. 2012. Measurement of wall friction in direct shear tests on soft soil. *Acta Geotechnica*. 7(4): 333–342.

Krumbein, W. C. 1941. Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*. 11: 64–72.

Krumbein, W. C.; Sloss, L. 1951. *Stratigraphy and Sedimentation. A series of books in geology*. San Francisco, W. H. Freeman and Co: 497 p.

Lai, J. 2004. *Direct shear testing*. Chaoyang University of technology: 14 p.

Latham, J. P.; Mindel, J.; Xiang, J. Guises, R.; Garcia, X.; Pain, C.; Gorman, G.; Piggot, M.; Munjiza, A. 2009. Coupled FEMDEM/Fluids for coastal engineers with special reference to armour stability and breakage. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*. 4(1): 39–53.

Li, L. Q.; Jiang, M. J.; Shen, Z. F. 2012. Verification of the double slip and rotation rate model for elliptical granular flow using the distinct element method, in *Proceedings of the International Symposium on Discrete Element Modeling of Particulate Media*. University of Birmingham: 236–244.

Likos, W. J.; Wayllace, A.; Godt, J.; Lu, N. 2010. Modified direct shear apparatus for unsaturated sands at low suction and stress. *Geotechnical Testing Journal*. 33(5): 1–13.

Liu, Y.; You, Z.; Zhao, Y. 2012. Three-dimensional discrete element modeling of asphalt concrete: Size effects of elements. *Construction and Building Materials*. 37(2012): 775–782.

Longmore, J. P.; Marais, P.; Kuttel, M. M. 2013. Towards realistic and interactive sand simulation: A GPU-based framework. *Powder Technology*. 235(2013): 983–1000.

LST CEN ISO/TS 17892–5:2005. *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 5: Incremental loading oedometer test*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005. 30 p.

LST EN 1997–1:2006. *Eurokodas 7. Geotechninis projektavimas. 1 dalis. Pagrindinės taisyklės*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006. 138 p.

LST EN 1997–2:2007. *Eurokodas 7. Geotechninis projektavimas. 2 dalis. Pagrindo tyrinėjimai ir bandymai*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009. 159 p.

LST EN ISO 14688–1:2007. *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 1 dalis. Atpažintis ir aprašymas (ISO 14688–1:2002)*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007. 14 p.

Lupogo, K. 2013. Effect of fines mineralogy on the oedometric compressional behaviour of sandy soils. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*. 4(7): 232–238.

Macaro, G.; Utili, S. 2012. DEM triaxial tests of a seabed sand, in *Discrete Element Modeling of Particulate Media: Proceedings of the International Symposium on Discrete Element Modeling of Particulate Media*. Royal Society of Chemistry, Sp. Pub. 339: 203–211.

- Maeda, M.; Fukuma, M.; Nukudani, E. 2009. Macro and micro critical states of granular materials with different grain shapes, in *Proc. of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media*. AIP Conference Proceedings. 1145:829-832.
- Mancino, C. F.; Landshoot, P. J.; McNitt, A. 1996. *Methods of classifying sand shape and the effects of on USGA specification physical properties: Executive summary*. Pensilvania, The Pensilvania State University: 8 p.
- Markauskas, D. 2003. *Modeling of the cone penetration testing using finite element method*. Summary of Doctoral Dissertation. Vilnius, Technika: 30 p.
- Markauskas, D.; Kačianauskas, R. 2006. Compacting of particles for biaxial compression test by the discrete element method. *Journal of Civil Engineering and Management*. 12(2): 153–161.
- McDowell, G. R.; Collop, A. C.; Wu, J. W. 2009. A dimensional analysis of scaling viscosity and velocity in DEM of constant strain rate tests on asphalt. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*. 4(2): 171–174.
- Minh, N. H.; Cheng, Y. P. 2012. Strong force network of granular mixtures under one-dimensional compression, in *Proceedings of the International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media*. University of Birmingham: 227–235.
- Medzvieckas, J.; Sližytė, D.; Stragys, V. 2004. *Soil Mechanics: Laboratory Testing Manual*. Vilnius, Technika: 79 p.
- Modenese, C.; Utili, S.; Houlsby, G. T. 2012. A numerical investigation of quasi-static conditions for granular media, in *Proceedings of the International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media*. University of Birmingham: 187–195.
- Mollon, G.; Zhao, J. 2013. Generating realistic 3D sand particles using Fourier descriptors. *Granular Matter*. 15(1): 95–108.
- Montenegro, R. A.; Sarocchi, D.; Nahmad-Molinari, Y.; Borselli, L. 2013. Form from projected shadow(FFPS): An algorithm for 3D shape analysis of sedimentary particles. *Computers & Geosciences*. 60: 98–108.
- Nakashima, H.; Shioji, Y.; Kobayashi, T.; Aoki, S.; Shimizu, H.; Miyasaka, J.; Ohdi, K. 2011. Determining the angle of repose of sand under low-gravity conditions using discrete element method. *Journal of Terremechanics*. 48(2011): 17–26.
- Pocius, G.; Balevičius, R. 2012. Daugiadisversio ir viendisversio dalelių mišinio elgsenos tyrimas. I dalis: Struktūros charakterizavimas. *Engineering Structures and Technologies*. 4(1): 16–28.
- Powers, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*. 23: 117–119.
- Prušinskienė, S. 2012. *Smėlio gruntų ypatumai ir jų tyrimo metodai. Mokomoji knyga*. Vilnius, Technika: 183 p.

Rabbi, A. T. M. Z.; Hossain, M. K.; Kuwago, J.; Tay, W. B. Experimental investigation on curing time and stress dependency of strength and deformation characteristics of cement-treated sand and its degradation phenomena. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*. 11(4): 36–46.

Rao, K. S.; Shrivastava, A. K.; Singh, J. 2009. Development of an automated large scale direct shear testing machine for rock. *IGC. Guntur*: 238–244.

Rericha, P. 2004. Mohr–Coulomb failure condition and the direct shear test revisited. *Acta Polytechnica*. 44(5–6): 93–96.

Riley, N. A. 1941. Projektion sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*. 11: 94–97.

Rodriguez, J.; Johanson, J.; Edeskär, T. 2008. Particle shape determination by two dimensional image analysis in geotechnical engineering, in *Proceedings of the 16th of Nordic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical NGM*. Copenhagen: Danish Geotechnical Society: 207–218 p.

Roussillon, T.; Piegay, H.; Sivignon, I.; Tougne, L.; Lavigne, F. 2009. Automatic computation of pebble roundness using digital imagery and discrete geometry. *Computers & Geosciences*. 35: 1992–2000.

Salot, C.; Gotteland, P.; Villard, P. 2009. Influence of relative density on granular materials behaviour: DEM simulations of triaxial tests. *Granular Matter*. 11: 221–236.

Schweiger, H. F. 2005. Application of FEM to ULS design (Eurocodes) in surface and near surface geotechnical problems, in *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Methods and Advances in Geotechnics*. Patron Editoria, Bologna: 419–430.

Schweiger, H. F.; Peschl, G. M. 2005. Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics*. 32(6): 422–435.

Senatore, C.; Iagnemma, K. D. 2011. Direct shear behaviour of dry, granular soils for low normal stress with application to lightweight robotic vehicle modelling, in *Proceedings of the 17th ISTVS International Conference*. Blacksburg, VA, USA: 18–22.

Shen, J.; Priest, S. D.; Karakus, M. 2012. Determination of Mohr–Coloumb shear strength parameters from generalized Hoek–Brown criterion for slope stability analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45(1): 123–129.

Shipton, B.; Coop, M. R. 2012. On the compression behaviour of reconstituted soils. *Soils and Foundations*. 52(4): 668–681.

Simoni, A.; Houlsby, G. T. 2006. The direct shear strength and dilatancy of sand–gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*. 24: 523–549.

Slišytė, D.; Medzvieckas, J.; Mackevičius, R. 2012. *Pamatai ir pagrindai. Vadovėlis*. Vilnius, Technika: 248 p.

Sohby, E. M.; Mazen, O.; Aboushook, M. 2005. Advancement in oedometer testing of unsaturated soils, in *International Conference on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, EXPERUS 2005*. Teronto, Italy: 1–6

Sokolov, V. N.; Razgulina, O. V.; Yurkovets, D. I. Chernov, M. S. 2007. Quantitative Analysis of pore space of moraine clay soils by SEM images. *Journal of Surface Investigation. X-ray Synchrotron and Neutron Techniques*. 1(4): 60–65.

Stark, T. D.; Contreras, I. A. 1996. Constant volume ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal*. 19(1): 3–11.

Sukumaran, B.; Ashmawy, A. K.; Mehta, Y. 2006. A device for measuring shape and angularity of fine grained materials. *International Journal of Pavements*. 5(1–2–3): 130–142.

Sukumaran, B.; Das, N. Ashmawy, A. K. 2008. Modeling granular particle shape using discrete element method, in *Proceedings, 1st International FLAC/DEM Symposium*. Minneapolis, Minnesota: 1–38.

Szarf, K.; Combe, G.; Villard, P. 2011. Polygons vs clumps of discs: A numerical study of the influence of grain shape on the mechanical behaviour of granular materials. *Powder Technology*. 208(2): 279–288.

Šimkus, J.; Alikonis, A.; Sidauga, B. 1973. *Lietuvos TSR gruntų statybinės savybės*. Vilnius, Mintis: 92 p.

Šlečkuvienė, A. 2013. *Smėlio dalelių formos įtaka deformacinėms savybėms*. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 125 p.

Tafesse, S.; Robinson, F. J. M.; Sun, W.; Bergholm, F. 2013. Evaluation of image analysis methods used for quantification of particle angularity. *Sedimentology*. 60: 1100–1110.

Tang, C. A.; Xu, X. H.; Kou, S. Q.; Lindqvist, P. A.; Liu, H. Y. 2001. Numerical investigation of particle breakage as applied to mechanical crushing – Part I: Single-particle breakage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 38: 1147–1162.

Thongmune, S.; Matsumoto, T.; Kobayashi, S.; Kitiyodom, P.; Kurosawa, K. 2011. Experimental and numerical studies on push-up load tests for sand plugs in a steel pipe pile. *Soils and Foundations*. 51(5): 959–974.

Tong, F.; Yin, J. H. 2011. Nonlinear creep and swelling behaviour of bentonite mixed with different sand contents under oedometric condition. *Marine Georesources & Geotechnology*. 29(4): 346–363.

Tumonis, L.; Kačianauskas, R.; Norkus, A.; Žilionienė, D. 2012. Comparison study of spherical and multi-spherical particles under cyclic uniaxial compression. *Journal of Civil Engineering and Management*. 18(4): 537–545.

Uchaipichat, A.; Limsiri, C. 2011. Shear strength characteristics of cemented loose sand. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(10): 771–776.

Uygar, E.; Doven, A. G. 2006. Monotonic and cyclic oedometer tests on sand at high stress levels. *Granular Matter*. 8(2006): 19–26.

Užpolevičius, B. 2006. *Statinių tyrinėjimas, bandymas ir vertinimas*. Vilnius, Technika: 136 p.

- Valiūnas, K. 2005. *Statybinės gruntų savybės: mokomoji knyga*. Kaunas, Technologija: 69 p.
- Verveckaitė, N.; Amsiejus, J.; Stragys, V. 2007. Stress–strain analysis in the soil sample during laboratory testing. *Journal of Civil Engineering and Management*. 13(1): 63–70.
- Viška, M.; Soomere, T. 2013. Simulated and observed reversals of wave–driven alongshore sediment transport at the eastern Baltic Sea coast. *Baltica*. 26(2): 145–156.
- Xu, Y.; Kafui, K. D.; Thornton, C.; Lian G. 2002. Effects of material properties on granular flow in a silo using DEM simulation. *Particulate Science Technology: An International Journal*. 20(2): 109–124.
- Wadel, H. A. 1932. Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*. 40: 443–451.
- Wiącek, J.; Molenda, M.; Horabik, J.; Ooi, J. Y. 2012. Influence of grain shape and intergranular friction on material behaviour in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*. 217(2012): 435–442.
- Widuliński, L.; Kozicki, J.; Tejchman, J. 2009. Numerical simulations of triaxial test with sand using DEM. *Archives of Hydro–Engineering and Environmental Mechanics*. 56(3–4): 149–171.
- Widuliński, L.; Tejchman, J.; Kozicki, J.; Leśniewska, D. 2011. Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of retaining wall. *International Journal of Solids and Structures*. 48(2011): 1191–1209.
- Wu, J.; Collop, A.; McDowell, G. 2009. Discrete element modelling of monotonic compression tests in an idealised asphalt mixture. *Road materials and pavement design*. 10(1): 211–232.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. 2009. *The finite element method for solid and structural mechanics: Edition 6*. Butterworth-Heinemann: 626 p.
- Žaržojus, G. 2006. Polinių pamatų pagrindų rajonavimas, iš *Mokslas Gamtos mokslų fakultete: ketvirtosios mokslinės konferencijos, vykusios 2006 m. lapkričio 23–24 d., pranešimai*. Vilnius, Vilniaus Universitetas: 228–234.
- Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Červokienė, A.; Žurauskas, R. 2010. *Medžiagotyra ir statybinės medžiagos. Laboratoriniai darbai*. Vilnius, Technika: 92 p.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Amšiejus, J.; Dirgėlienė, N.; Norkus, A.; Skuodis, Š. 2014. Comparison of sandy soil shear strength parameters obtained by various construction direct shear apparatuses. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 14(2): 327–334. doi:10.1016/j.acme.2013.11.004. (ISI web of Science).

Skuodis, Š.; Markauskas, D.; Norkus, A.; Žaržojus, G.; Dirgėlienė, N. 2014. Testing and numerical simulation of Holocene marine sand uniaxial compression at Lithuanian coast. *Baltica*. 27(1): 33–44. doi: 10.5200/baltica.2014.27.04. (ISI web of Science).

Skuodis, Š.; Norkus, A.; Tumonis, L.; Amšiejus, J.; Aksamitauskas, Č. 2013. Experimental and numerical investigation of sand compression peculiarities. *Journal of Civil Engineering and Management*. 19(1): 78–85. doi:10.3846/13923730.2013.756164. (ISI web of Science).

Dirgėlienė, N.; Norkus, A.; Amšiejus, J.; Skuodis, Š.; Žilionienė, D. 2013. Stress-strain analysis of sand subjected to triaxial loading. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 8(1): 25–31. doi:10.3846/bjrbe.2013.04. (ISI web of Science).

Skuodis, Š.; Tamošiūnas, T. 2014. Direct shear tests with evaluation of variable shearing area. *Science – Future of Lithuania*. 6(5): 499–503. doi.org/10.3846/mla.2014.692.

Skuodis, Š.; Šlečkuvienė, A. 2013. Universalus spūdumo ir paprastojo kirpimo aparato, kontakto vietos tarp porinio akmens ir grunto tikslesnis nustatymo būdas. *Science – Future of Lithuania*. 5(5): 520–524. doi:10.3846/mla.2013.81.

Skuodis, Š.; Kavrus, A. 2012. Atskirų grunto dalelių formos kitimas prieš ir po spūdumo bandymo. *Science – Future of Lithuania*. 4(4): 340–345. doi:10.3846/mla.2012.53.

Skuodis, Š.; Amšiejus, J. 2011. Skirtingų smėlio frakcijų spūdumo tyrimas kompresiniu aparatu. *Engineering Structures and Technologies*. 3(1): 16–22. doi:10.3846/skt.2011.02.

Straipsniai kituose leidiniuose

Skuodis, Š.; Norkus, A.; Dirgėlienė, N.; Šlečkuvienė, A. 2013. Sand shearing peculiarities using direct shear device, in *Procedia Engineering. 11th international conference on Modern building materials, structures and techniques (MBMST)*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 57: 1052–1059. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.133. (ISI Proceedings).

Skuodis, Š.; Norkus, A. 2014. Influence of test quantity on loose sand shearing strength parameters, in *Proceedings of the international conference „Innovative materials, structures and technologies”*. Riga: RTU Press, 170–175. doi: 10.7250/isconstrs.2014.28

Skuodis, Š.; Norkus, A. 2014. Experimental and numerical (DEM and FEM) non-cohesive soil uniaxial compression, in *Proceedings of the 23rd European Young Engineers Conference*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 15–18.

Skuodis, Š.; Markauskas, D.; Šlečkuvienė, A. 2013. Smėlinio grunto odometrinio bandymo modeliavimas DEM, iš *Statyba, 16-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–5.

Šlečkuvienė, A.; Skuodis, Š. 2013. Smėlinių gruntų dalelių formos įtaka deformacinėms savybėms, iš *Statyba, 16-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–7.

Vitale, P.; Skuodis, Š. 2013. Analysis of shallow foundations settlements via different calculation methods, iš *Statyba, 16-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–9.

Martinkus, V.; Skuodis, Š.; Kelevišius, K. 2012. Rišlių gruntų odometrinio grunto deformacijų modulio ir kūginio stiprio priklausomybė, iš *Statyba, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–5.

Kavrus, A.; Skuodis, Š. 2012. Smėlinių gruntų morfologinių paramtrų nustatymas, iš *Statyba, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–8.

Skuodis, Š.; Norkus, A. 2012. Kontroluojamu slėgiu apkraunamo smėlinio grunto spūdumo tyrimas, iš *Statyba, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–5.

Skuodis, Š. 2011. Kartotinai kintamos apkrovos poveikis smėliniams gruntams, iš *Statyba, 14-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–4.

Skuodis, Š.; Kelevišius, K. 2011. Smėlinių gruntų grūdelinės sudėties poveikis tanklumui ir spūdumui, iš *Statyba, 14-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–4.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Sandy soil is composed of different shape and size particles. During sand compression particles change their position, and this process has an impact on the compression curve. To properly explain the compression curve, it is necessary to follow the laws of particle mechanics. Solving the task in this way is possible only when using the discrete element method.

Granulometric curve and separate particle shape discretization are ones of the most relevant existing problems for numerical modeling via the discrete element method. There are no direct recommendations for a single particle subscription with spheres of different size and quantity. The discrete element method (DEM) is rather new to compare with the finite element method; still, DEM is widely applied in homogenous and dispersive materials. When subscribing soil particles with DEM, it is very important to choose a size and shape (morphology parameters) and physical properties of modeled particles. It is possible to model realistic size particles if quantity of modeled particles is small. Modeling of soil subscribed with a big quantity of particles is not possible because of limitations of computer calculation capacity. Until computer calculation capacity is increased, it is necessary to accept some DEM modeling simplifications such as scale factor, small particles quantity, physical properties change or others. All simplifications are accepted in order to

decreases the calculation time. Another relevant problem, arising from all accepted simplifications, is a very small quantity of the authors working on experimental and numerical testing validation. This fact only proves that there still exist a lot of problems related to dispersive systems modeling with DEM.

This PhD thesis presents an experimental investigation of morphology parameters of sand particles, experimental oedometer and direct shear tests, numerical DEM modeling of oedometer tests and comparison of experimental and numerical tests. Based on experimental and numerical testing findings, the influence of morphology parameters on mechanical properties of soil is analysed and a rational quantity of modeled single soil particle spheres quantity.

Relevance of the thesis

In general practice, research of the influence of morphology parameters on mechanical properties of soil is a very wide area of investigations, related with validation of experimental and numerical testing results. Validation of results is the main factor for research and development of durable numerical DEM modeling methodology.

DEM simulations are provided according to morphology parameters of the modeled soil, such as a particle size, shape, angularity, circularity, sphericity and others. This is only a part of input data in DEM simulations which should be combined with physical properties of particles. DEM can be applied practically in modeling of any type of materials, just for DEM application one problem reveals – simulation calculation time. To decrease the calculation time, it is necessary to accept some simplification, but sometimes this simplification does not generate real results. Due to complicated DEM simulations, experimental and numerical testing validation is not possible, since it is very complicated to get the same results as they are in nature.

In DEM simulations, parallel calculations of clusters are widely applied. Using these clusters, it is possible to calculate much bigger simulations in the same period of time, as with a single computer. Nevertheless, applications of clusters in DEM simulations does not provide enough calculation capacity.

Applying simplifications in DEM simulations, it is necessary to compare achieved results with experimental ones or with FEM results. If results validation is not performed, results of numerical simulations are of a higher unreliability. Taking into account that up to now there have not been provided any accurate suggestions or opinions of spheres quantity for numerical DEM modeling of single particle subscription, numerous investigations and considerable work should be done to develop DEM and ensure a successful application of DEM.

Research object

The present study involves investigations of morphology parameters of air-dry sandy soils, experimental oedometer and direct shear tests and their methodologies, numerical FEM and DEM oedometer test simulations and validation of experimental and numerical compression test results, improvements of experimental and numerical testing methodologies.

Aim of the thesis

The aim of the present study – to evaluate qualitatively and improve the methodologies of experimental oedometer, direct shear and numerical oedometer simulation.

Objectives of the thesis

To achieve the aim of the thesis, the following objectives have to be carried out:

1. To choose 4 different sands and study morphology parameters, using the view analysis program “STIMAN” and a scanning electronic microscope. Based on morphology parameters, to choose one soil and create a discrete model, also to provide numerical DEM compression simulations.
2. To perform experimental sand compression tests with an oedometer and improve testing methodology.
3. To perform experimental sand direct shear tests and improve testing methodology.
4. To perform numerical FEM and DEM simulation of oedometer test and compare achieved results with experimental ones. To propose improvements for soil deformation modulus determination.
5. To perform numerical oedometer test DEM simulations and compare the influence of morphology parameters on compression results.

Research methodology

The methods applied in the present research include the view analysis, least squares, numerical modeling (FEM and DEM) and comparison. Experimental tests are performed using standard testing equipment and improved testing methodology. The results of experimental and numerical compression tests are compared.

Scientific novelty of the thesis

Scientific novelty obtained from this thesis:

1. The study of 2D and 3D morphology parameters using view analysis program “STIMAN” reveals that it is enough to investigate 2D morphology parameters. 2D particle view investigation helps to save research time and accuracy of obtained results is sufficiently high to compare with the results of 3D analysis.
2. The developed experimental soil compression and direct shear test methodology allows to more accurately determine deformation modulus, angle of internal friction and cohesion. It suggests determination of characteristic direct shear strength, avoiding influence of t_a .
3. The results obtained using the improved methodology of experimental compression tests validate with numerical ones.
4. Using Vilnius Gediminas Technical University cluster VILKAS and program code DEMMAT, there have been designed a parallel calculation algorithm which allows to model a real soil granulometric curve and particles shape.

Practical value of research findings

The results of experimental soil compression and direct shear tests can be used to design a geotechnical construction and implemented into laboratory testing standards. The results of numerical investigations can be applied in DEM development, as the improved numerical DEM simulation allows to change particle morphology parameters with constant physical and mechanical properties of simulated particles assembly.

Defended statements

The defended statements are as following:

1. The qualitative evaluation of DEM results should be provided, since morphology parameters of simulated particles influence behaviour of deformed soil.
2. Standard experimental soil compression and direct shear testing methodologies and devices used in these tests need to be improved for qualitative evaluation of obtained results and explanation of soil behaviour.
3. The suggested improvement of soil compression methodology allows to eliminate the influence of contact surface between soil and porous stone for test results.
4. The suggested improvement of soil direct shear testing methodology evaluates variable shearing area, testing quantity and loading influence for soil shearing strength.
5. The evaluation of soil behaviour with FEM is not sufficient if particle reallocation is taken into account. For qualitative evaluation of soil compression behaviour it is necessary to create discrete and mathematical models and provide simulations with DEM.
6. The suggested experimental and numerical compression tests validate between each other.

Approval of research findings

There have been published 19 scientific articles related to the topic of the dissertation: 4 articles – in the Thomson ISI register, 1 article – in conference material and scientific papers in Thomson ISI data base, 4 articles – in the journal quoted in other data bases, 2 articles – in material reviewed during international conferences. 8 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level:

1. Conference of Young Lithuanian Scientists *Science – the Future of Lithuania* (5 presentations), Vilnius, Lithuania, 2011–2013.
2. 11th International conference *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius, Lithuania, 2013.
3. 54th International Scientific Conference *Innovative Materials, Structures and Technologies*, Riga, Latvia, 2013.
4. 23rd *European Young Geotechnical Engineers Conference*, Barcelona, Spain, 2014.

Structure of the thesis

The dissertation consists of the introduction, three Chapters, the general conclusion and the list of references, resources and publications of the author on the topic of the dissertation, the abstract in English and 2 annexes. The total scope of dissertation – 125 pages excluding annexes, 11 equations, 93 figures, 12 tables and 124 references.

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to the supervisor of the scientific work, the Head of the Department of Geotechnical Engineering Prof Dr Arnoldas Norkus for advice and assistance in preparing the dissertation.

For support and friendship during the PhD studies, the author expresses gratitude to the staff of the Department of Geotechnical Engineering, especially to Assoc Prof Jonas Amšiejus and PhD students. Also, the author express his gratitude to the colleagues from Second University of Naples, Gdansk University of Technology, Munich Technical University, and to the company Wille Geotechnik, especially to Dr Martin Tazl.

The author also expresses gratitude to Research Council of Lithuanian for the financial support during the PhD studies.

1. Overview of soil engineering geological conditions, morphology parameters, experimental and numerical tests

The sediments that were deposited in the Lithuanian coast of the Baltic Sea were formed during Quaternary. There are two geologically and geomorphologically different sectors of the Lithuanian coastal area: the continental coast and Curonian spit (Gudelis 1992). The investigated area is located in the southern part of Lithuanian continental coastal zone of Baltic Sea, the northern part of Klaipėda city (Skudis *et al.* 2014).

To the north of the Klaipėda city, only the immediate near-shore contains a sandy strip of Holocene marine sediments (m IV), which occurs in up to 4-5 meters of the sea water depth. The material composing the near-shore sediments in the continental coast zone mainly consists of different sand, where prevailing medium coarse and fine sand (Repečka 1999; Gulbinskas, Trimonis 1999) with admixture of gravel and organic matter (Gadeikis, Repečka 1999, Dundulis *et al.* 2006). This sand was used for investigations (one sample of 14 kg).

The average density of particles (ρ_s) value of marine sands is 2.67 Mg/m³ and varies from 2.65 to 2.71 Mg/m³, respectively. The bulk density of the sand varies from 1.83 to 2.09 Mg/m³, where average is 1.98 Mg/m³. Regardless to the genesis of marine sand and their grain size distribution, the mineral composition consists mainly of quartz and feldspar. The natural moisture content depends on the degree of saturation of water and ranges from 13.7 to 27.7%. The void ratio (e) in fine sand varies from 0.474 to 0.778, respectively (Gadeikis, Repečka 1999; Dundulis *et al.* 2006).

The mineralogical composition of sand was determined by Amšiejus *et al.* (2010), were basic consistency of the sand is: ~85% quarts, ~6% feldspar with remaining contribution of carbonate, mica and some other minerals.

The main morphological parameters of investigated sand fractions employed in 2D view analysis includes (Kavrus, Skuodis 2012; Prušinskienė 2012): area, equivalent diameter, sphericity, circularity, form coefficient and angularity.

Morphological parameters are calculated applying the specialized software STIMAN. The input data for the calculation program of STIMAN is/are the view/s of picture/s, which determines the selected morphological parameters according to the developed algorithm. The morphological parameters were determined for all grains of selected sand fractions. The analysis of the determined morphological parameters within each fraction shows that the shape of all grains is sufficiently similar – Id est the grains differ principally only in size. Therefore, in the case of the analysed sand, it is sufficient to simulate the grains of the actual sand soil via the generalized discrete model of particle (Id est via a single typical shape) with different sizes per all fractures.

In the confined compression test, or oedometer test, a cylindrical soil sample is enclosed in a very stiff steel ring and loaded through a porous plate. During the loading process soil density increases and volume of the pores decreases. This soil property is called compression (Amšiejus *et al.* 2002). Void ratio change is obtained only when soil is loaded with high stress values. Such interpretation of the compression curve is not reliable due to two reasons:

1. In the contact place of porous stone and soil sample, contact settlements occur at the low stress due to not perfect soil surface. Contact settlements ensure good porous stone and soil sample contact between each other.
2. When testing clay soils with large sand or gravel particles, sample surface imperfections occur during soil sample preparation on the sample side, in a contact with the oedometer ring surface. Due to these surface imperfections, the soil sample expands in the horizontal direction during the loading process, and it continues until a sufficient contact with the oedometer ring. This can be considered as an explanation of the appearance of additional sample settlement.

Other authors present soil compression curves with vertical loading form 5 or 10 kPa (Sohby *et al.* 2005; Lupogo 2013; Comina *et al.* 2008; Tong, Yin 2011; Shipton, Coop 2012). In this case, it is not necessary to show what happens with the soil compression curve when vertical stress is from 0 to 5 or 10 kPa.

In the determination of soil shear strength in direct shear tests, soil shearing area and position are well known due to the apparatus construction. Some of the devices are able to test square (Zhang *et al.* 2001; Lai 2004) or circular (Kang *et al.* 2013; Lai 2004; Amšiejus *et al.* 2014; Alikonis *et al.* 1999; Yuan *et al.* 2013) soil samples and in both cases there is a possibility to do a test with different testing device scale (Ohja, Trivedi 2013; Radu *et al.* 2014; Liu *et al.* 2009). Nevertheless, in all cases of the mentioned above soil shearing testing procedure a constant soil shearing area is used.

Many researchers report about the almost absence of the investigations on the analysis of the systematic reasons of inaccuracies of shear devices directly resulting the testing results and/or their improvements aiming to reduce them. The most often testing cases are: when the soil sample is sheared under the constant vertical stress subjected onto the top of sample, or under the constant height of the sample (constant sample volume), respectively. The both above listed testing cases have been considered for air-dry typical Baltic seashore sand for the samples of the maximum and the minimum void ratios e . The second

step of investigations was provided with constant and variable shearing areas (Skuodis, Tamošiūnas 2014). Furthermore, the peculiarities of determining quartz sand shear strength according to the Mohr-Coulomb strength criterion via direct shear test and that of factors influencing the characteristic angle of internal friction and cohesion values of obtained strength parameters are considered with evaluation of testing quantity influence for shear strength parameters (Skuodis, Norkus 2014).

Evaluation of the actual compressibility properties via soil compression tests is important for employment of subsequent numerical analysis of stress and strain state of ground subjected by supplement loading (e.g. loads transmitted via foundations from a superstructure, interaction of structure and soil strata, etc). The confined compression (oedometer) test is approved as a relatively fast and simple laboratory test. It is performed under different conditions, loading paths and durability. Test conditions depend on physical changes in multiphase system of soil, generally related with reorganisation of soil grains, that of initial change of skeleton in cohesive soils and velocity of water filtration for saturated soils. One must note that in some cases the duration of testing procedure for prediction of long term soil behaviour and in other specific cases is very long (Tong, Yin 2011), thus sometimes taking into account the time and test cost ratio it is not worth even to start the test. On the other hand, one cannot qualitatively explain the variation of soil compression test results, basing on some processing of already known testing and analysis data separately or in concern with view analysis. It is obvious, that having not identified the actual physical mechanism for soil grain reorganisation during compression process and its peculiarities, one cannot explain the observed scatter of results under disposal. This mechanism cannot be recorded by applying usual techniques of testing and view analysis but can be simulated applying the relevant DEM techniques: that of the mathematical models of processes and discrete models for soil grains (Skuodis *et al.* 2014).

The above-mentioned circumstances, as well as the permanently reducing computational costs, the development of numerical techniques and software in the field of multi-scale analysis (including the particle strata mechanics), initiated a fast development and the applications numerical analysis in the field of the soil behaviour by means of the discrete element method (DEM). Such approach, combined with an experimental analysis for validation and calibration of the mathematical models, is definitely a promising one, allowing to reduce the price and quantity of laboratory tests and a reasonless conservatism in determining the values of mechanical properties of soils in near future.

A finite element program (PLAXIS 3D Foundation) was finally used, so as to compare the obtained results with that from the experimental part of the thesis and numerical DEM simulations part. The Mohr-Coulomb soil model was used to simulate the soil behaviour, constantly taking regard to the fact that the simulation of geotechnical issues by means of the finite element approach inevitably involves some numerical and modeling errors, lying these partly on the operator ability (Vitale, Skuodis 2013).

Numerical simulation via DEM was provided using DEMMAT code (Balevičius *et al.* 2004). The quality of implementation is handled by a physically observable behaviour of interactions: particle-particle, particle-wall, particle-bottom and/or top plate and by the validation with the results obtained from physical experiments. Detailed information about used models and parameters in DEM simulation is given by Skuodis *et al.* (2014).

For soil modeling with FEM, there was used experimentally and numerically (with DEM) obtained soil sample Young's modulus. More information about FEM modeling and soil parameters used in simulation is given by Vitale and Skuodis (2013) and Skuodis and Norkus (2014).

2. Experimental and numerical investigation of soil behaviour parameters

Morphology parameters were obtained for 4 different collected soil samples (Šlečkuvienė, Skuodis 2013). The grading curves of these soil samples are given in Fig. S1. Creation of a discrete model for the typical shape particle requires determination of the mean morphological parameters. The obtained mean 2D morphological parameters of the particles are given in the Table S1. The mean shape of investigated sand grain was determined using Krumbein and Slos (1951) and Cho *et al.* (2006) given solutions for sand shape characterization according to the particle sphericity and roundness.

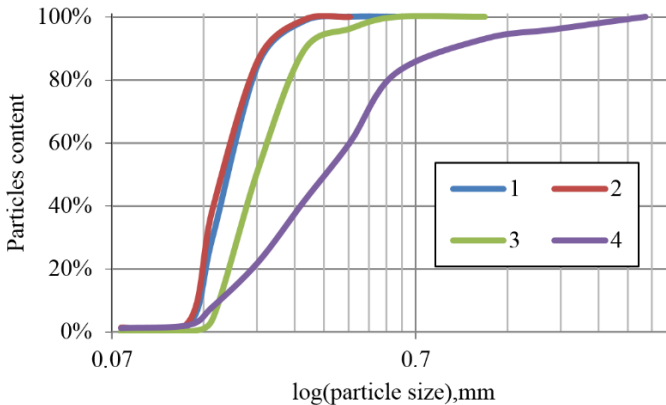


Fig. S1. Grading curves of investigated soil samples

Table S1. Mean morphological parameters of investigated sands (Šlečkuvienė, Skuodis 2013)

Soil indication	A_{2D} , mm ²	$d_{ekv,2D}$, mm	$K_{f,2D}$	S_{2D}	C_{2D}	Q_{2D}
1	0.01122	0.340	0.702	0.836	0.515	0.410
2	0.05634	0.254	0.744	0.862	0.515	0.463
3	0.104	0.335	0.728	0.853	0.499	0.280
4	1.725	1.0	0.712	0.844	0.468	0.277

According to the results in Table S1, it was decided to continue the rest investigations of detailed morphology parameters with the first soil type. The decision is based on the obtained particles equivalent diameter, form coefficient, sphericity, circularity and angularity. The first soil type has the best complex of obtained morphological parameters in comparison with the other three soil types. The analysis of the change of morphology

parameters of investigated first soil type according to equivalent diameter increment is shown in Fig. S2.

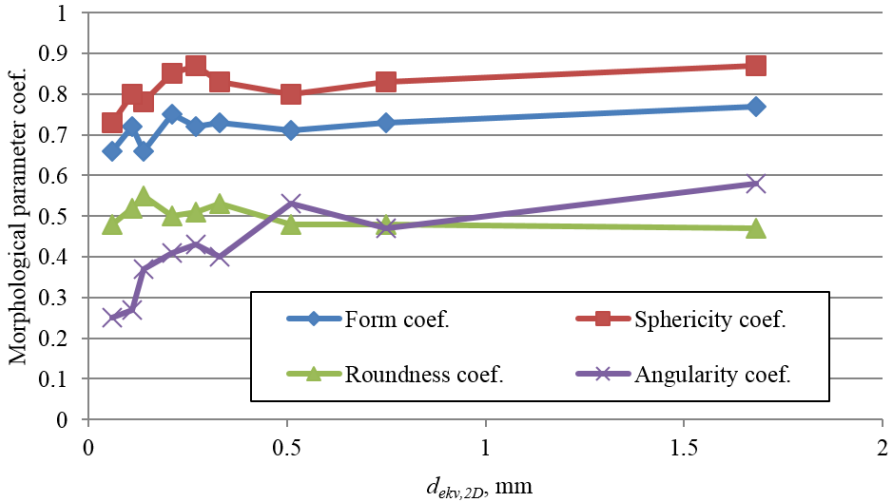



Fig. S2. Morphological parameters versus $d_{ekv, 2D}$

The mean shape (Table S2.) of investigated sand grain was determined using Krumbein and Slos (1951) and Cho *et al.* (2006) solutions for sand shape characterization given according to the particle sphericity and roundness.

Table S2. Mean 2D case morphological parameters (Skuodis *et al.* 2014)

Morphological parameter	Mean value
Area, mm ²	0.112
Equivalent diameter (mm)	0.340
Sphericity	0.836
Circularity	0.515
Form coefficient	0.702
Angularity	0.410
Particle shape	

Compression tests were performed using the oedometer test device ADS 1/3 ($H = 3.39$ cm; $D = 7.14$ cm). Testing program consists of the study of the influence of vertical load ramp on the compression results, the study of crashing of separate particles, and upgrade of testing procedure (Fig. S3), respectively. As expected, loading ramp has no influence on sample deformation results. Based on these obtained results, it was decided to

use load ramp 400 kPa/min for all the rest compression tests presented in this thesis. Knowing that there is a possibility to crush sand particles with maximum vertical load, sieve tests were performed before and after different maximum sample loading: 0; 200; 400; 600 and 800 kPa, respectively. The analysis of obtained results revealed that sand particles are not crushed up to 800 kPa maximum vertical loading. Due to this reason, it was decided to use maximum vertical loading 400 kPa for all the rest compression tests with oedometer.

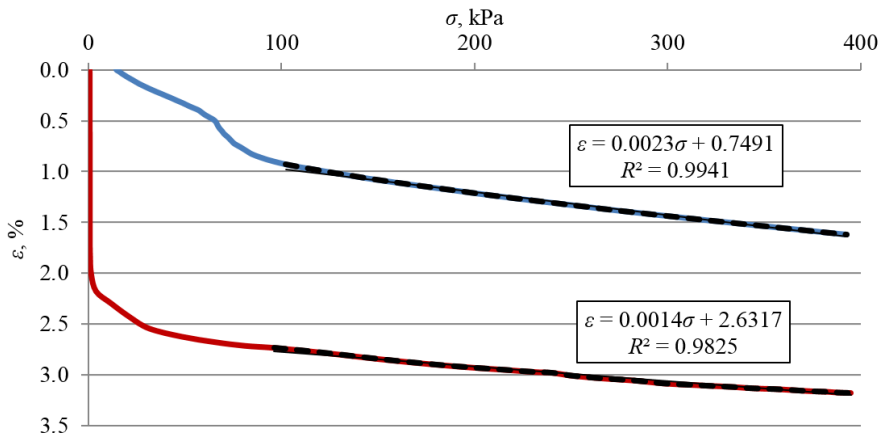


Fig. S3. Comparison of soil compression methodologies: blue – standard procedure; red – improved procedure

The main finding from the compression test procedure is presented in Fig. S3. Comparison of the standard and improved procedures consists of two different stages. The first comparison stage involves vertical loading values from 0 to 100 kPa. In this stage, the standard test procedure cannot evaluate immediate settlements (Skuodis, Amšiejus 2011), since for contact between porous stone and soil ensurance, 10 kPa vertical stress is established. The improved testing procedure is better than the standard one, as porous stone is positioned in the calibrated height, selected according to the initial sample height. Performing compression test with the improved testing procedure, it is possible to analyse compression curve from 0 kPa. The standard and improved testing procedures differ in their obtained compression curve values only, and the character of their vertical strain values remains the same. In the standard procedure, a smaller compressed sample deformation ($\epsilon = 1.6168\%$) is obtained comparing with the improved testing procedure ($\epsilon = 3.1763\%$).

This research part is intended to investigate direct shear test peculiarities, compare different direct shear testing procedures and obtained results, improve the direct shear testing procedure, analyse influence of vertical stress value and testing quantity on soil shearing strength parameters.

Shear strength properties of the sand in the Klaipėda area were examined with loose and dense sand samples, for determination of direct shear device accuracy. During this investigation, two different testing procedures were verified: the direct shear test with constant vertical stress and with constant sample volume (Skuodis *et al.* 2013). Both of these testing procedures were performed with a constant and variable shearing gap

between the top and bottom shearing rings. Analysis of results revealed that different testing procedures lead to different soil shear strength parameters (Table S3).

Table S3. Soil shearing strength parameters (Skuodis *et al.* 2013)

Testing procedure	Soil density	Shearing strength parameter	Shearing gap	
			Constant	Variable
Constant stress	Loose	φ_m°	26.52	26.73
Constant volume	Loose	φ_m°	30.19	12.36
Constant stress	Dense	φ_m°	47.09	35.18
Constant volume	Dense	φ_m°	35.21	27.88
Constant stress	Loose	c_m , kPa	11.92	0.38
Constant volume	Loose	c_m , kPa	4.08	5.79
Constant stress	Dense	c_m , kPa	24.01	10.37
Constant volume	Dense	c_m , kPa	4.90	28.10

Being aware of all the peculiarities of the direct shear device, it was decided to improve the direct shear testing procedure. Improvement is performed by adding variable shearing area A during horizontal movement of the bottom shearing ring (Skuodis, Tamošiūnas 2014). When testing sand according to variable shearing area, vertical and tangential stresses are recalculated every second during the entire test procedure. As expected, implementation of this variable shearing area into the testing procedure and recalculation of vertical and tangential stresses provides a different stress state for a tested soil sample (Table S4).

Table S4. Comparison of peak soil shearing strength parameters (Skuodis, Tamošiūnas 2014)

A		A_0		$\Delta\sigma$, %	$\Delta\tau_f$, %
σ , kPa	τ_f , kPa	σ , kPa	τ_f , kPa		
100.14	61.20	89.89	54.94	11.40	11.39
199.75	105.51	181.16	95.69	10.26	10.26
300.20	184.76	271.38	167.02	10.62	10.62

The next investigation stage was performed with soil direct shear testing – analysis of vertical stress and testing quantity influence on soil shearing strength parameters. This research involved vertical stress ranges from 25 up to 600 kPa, respectively. Peak shearing strength values were obtained by maximum τ/σ ratio value. Analysis of the results revealed that, for example, direct shear tests performed with 25–100 kPa vertical stress range gives $\varphi_m = 26.22^\circ$, and testing sand with vertical stress 300–400 kPa – $\varphi_m = 29.12^\circ$. Nevertheless, the tested soil was prepared with the same initial density, difference between φ_m occurs due to vertical stress value used during testing procedure. For sheared loose sand with higher range of vertical stress increment of φ_m is obtained, and for dense sand – vice versa.

Investigations of test quantity influence on sand shearing strength parameters demonstrate that when the mean shearing strength values are evaluated, this has almost no influence on shear strength parameters. When evaluating the characteristic sand shearing

strength, testing quantity has an impact on its values only when less than 18 tests are performed. Having performed more than 18 tests, the same results were obtained in all of them. Explanation of this factor is related with t_a influence for characteristic shear strength parameters (Skuodis, Norkus 2014). The example of characteristic shearing strength parameters is presented in Fig. S4.

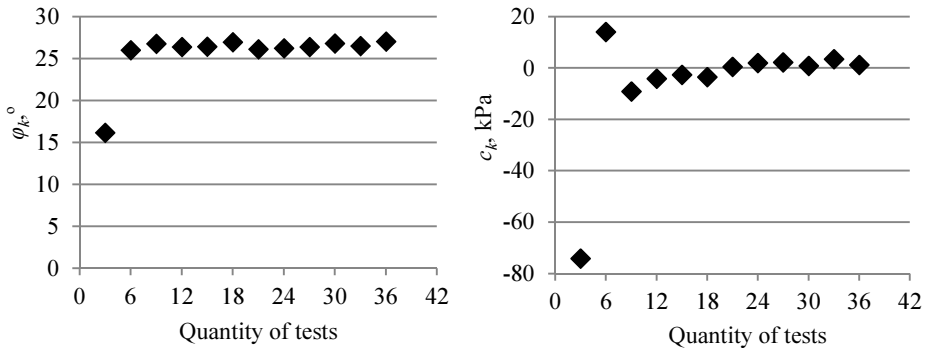


Fig. S4. Angle of internal friction versus quantity of tests (on the left) and cohesion versus quantity of tests (on the right)

Numerical FEM simulations were performed with “PLAXIS 3D Foundation” program. Initial parameters are given in Table S5. FEM simulation is provided for the validation of experimental and numerical DEM results. The obtained simulated sand settlements in the oedometer device with two different initial Young’s modulus ($E_{oed} = 22.16$ and 19.03 MPa) showed almost the same displacement difference (9.44%) as the difference between used Young’s modulus (10.53%).

Table S5. Parameters used for FEM modeling (Skuodis, Norkus 2014)

Parameter	Symbol	Unit	Value
Initial void ratio	e_o	–	0.798
Unsaturated density	ρ_{unsat}	kg/m ³	1500
Puason’s coefficient	ν	–	0.270
Material model	–	Mohr–Coloumb	–
Mean angle of internal friction	φ_m	°	27.82
Mean cohesion	c_m	kPa	1.12
Mean dilatation angle	ψ_m	°	0.00
Oedometric Young’s modulus	E_{oed}	MPa	22.16; 19.03*

* Note: $E_{oed} = 22.16$ MPa was calculated based on stress at the top porous stone and $E_{oed} = 19.03$ MPa based on stress at the bottom porous stone.

When $E_{oed} = 22.16$ MPa is used for the simulation, the displacement is $s = 1.73$ cm and when $E_{oed} = 19.03$ MPa, the displacement is $s = 1.91$ cm.

Numerical DEM simulations are performed with the same granulometric curve as obtained in experimental testing for the Klaipėda sand. The analysis of influence of simulated particles shape on compression results is presented in Fig. S5.

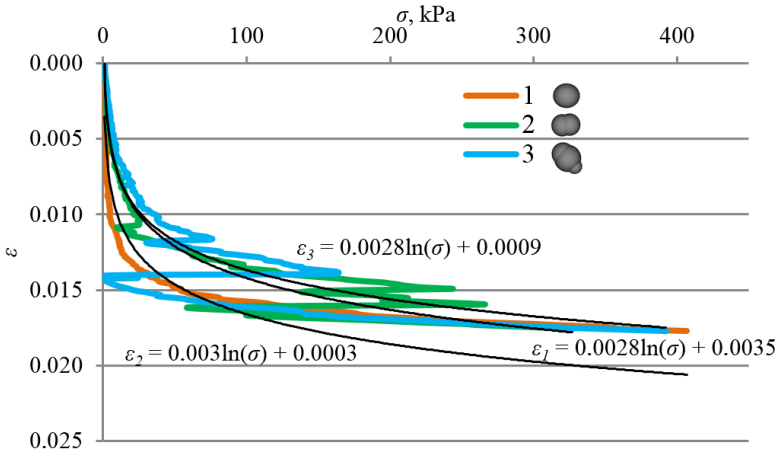


Fig. S5. Comparison of compression results with different particle shape

The stress jumps in Fig. S5 are explained in detail by Skuodis *et al.* (2014). Following the results in Fig. S5, there was a decision taken to use particle shape generated with 3 spheres.

3. Validation of experimental and numerical investigations

Reliability and accuracy of numerical DEM modeling of sand soil behaviour depends on the modeled soil and discretization level of particles. In this thesis, the same numerical granulometric curve as obtained experimentally was used (Fig. S6). Comparison of results revealed that to recreate morphology parameters, involvement of different quantity of spheres for single particle subscription is necessary: 8–11 spheres for form coefficient, 7–11 spheres for sphericity, 8–12 spheres for circularity, 3–4 spheres for angularity, respectively. Analysing angularity recreation with different quantity of spheres, the angularity coefficient decreases when more than 7 spheres are used for single particle subscription.

Validation of experimental and numerical ($E_p = 78$ GPa and $\rho_s = 2650000$ kg/m³) compression results is presented in Fig. S7.

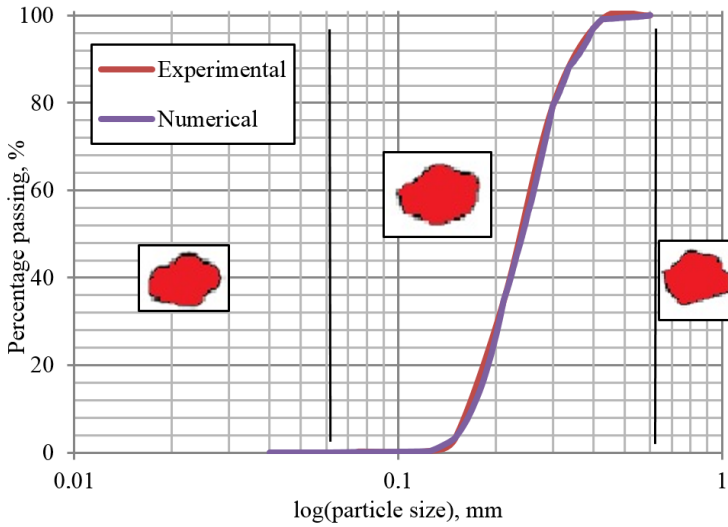


Fig. S6. Numerical and experimental granulometric curves

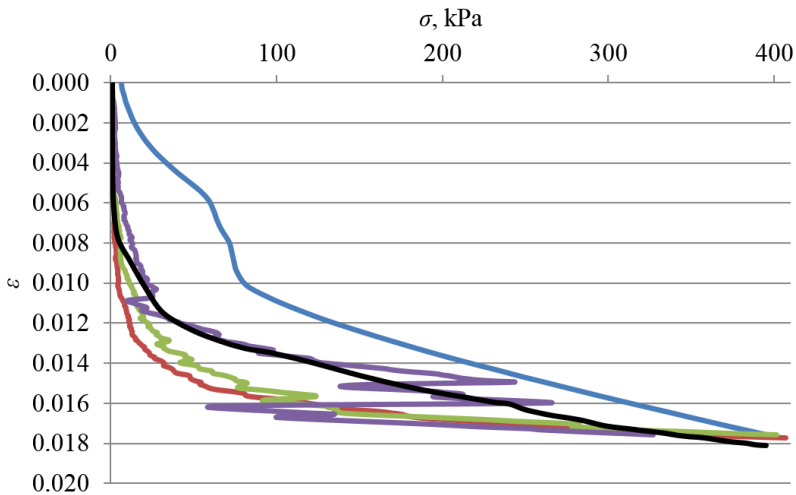


Fig. S7. Comparison of compression results: blue – standard experiment; red – numerical experiment (1 sphere); green – numerical experiment (2 spheres); purple – numerical experiment (3 spheres); black – improved experiment

The analysis of compression results revealed (Fig. S7) that the increased spheres quantity for single particle discretization leads the numerical compression curve to the experimental one. For a more qualitative match of experimental and numerical curves, it is better to use the improved experimental compression curve which is closer to the numerical results. In this case, the curves of numerical and improved experimental results get

closer to each other. Usually, only numerical tests are corrected with non-normal coefficients to get the same result curve as in the experiment.

General conclusions

Summarizing the results of the dissertation, following statements could be drawn:

1. Morphology parameters of particles have a significant influence on deformable behaviour of sandy soils due to rearrangement of particles under loading. Therefore, for interpretation of obtained laboratory testing and numerical simulation results, it is necessary to provide a direct evaluation of morphology parameters of soil particles.
2. A view analysis of sand particles and processing of obtained results is necessary for creating relevant DEM and mathematical models of sand soil particles. Only direct evaluation of morphology parameters allows to ensure a rational recreated particle discrete model.
3. The improved methodology proposed for standard laboratory soil compressibility and direct shear testing allows to eliminate systematic errors of measured soil response values and interpretation of results. This ensures a proper comparative analysis of laboratory testing and numerical simulation results and their validation.
4. Applying the developed improvement of compression testing, the actual compressive graph is obtained. The method evaluates deflections of porous stone at the contact surface of soil sample and allows to evaluate stress jumps resulting from rearrangement of particles during the loading cycle.
5. Applying the developed improvement of direct soil shear testing, the errors conditioned by variation of gap between shear rings of the standard device structure are properly evaluated. Testing soil under constant loading, the systematic error of measured normal and shear stresses at limit state can reach up to 10%, and this error is eliminated by introducing a variable shear area. To determine characteristic shear strength values, it is suggested eliminating the influence of the statistic criterion t_α factor. It is recommended to perform at least 18 tests to obtain reliable values.
6. The comparative analysis of adequacy of numerical compressibility simulation of soil versus accuracy of discrete models of particles, created in accordance of morphology parameters, has been performed. The sufficient accuracy of simulated graph of compressibility versus the one obtained by improved laboratory testing methodology was achieved for the discrete model of particles, constructed from 3 spheres. The rate of calculations can be reduced up to 5 times if the density of particles artificially increased without changing the nature of the physical process.
7. The results of laboratory testing by improved methodology and that of numerical simulation results of compressibility coincide. The improved methods proposed for laboratory testing can be introduced in relevant standards for testing of sandy soils. The obtained results of numerical simulations can serve for subsequent development of DEM techniques and their implementation in engineering practice.

Priedai*

A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

*Priedai pateikiami kompaktiniame diske

Šarūnas SKUODIS

SMĖLIO DALELIŲ MORFOLOGINIŲ
PARAMETRŲ ĮTAKOS GRUNTO
MECHANINĖMS SAVYBĖMS EKSPERIMENTINIAI
IR SKAITINIAI TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (O2T)

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL
INVESTIGATIONS OF SAND PARTICLES
MORPHOLOGY PARAMETERS INFLUENCE
ON SOIL MECHANICAL PROPERTIES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (O2T)

2015 10 29. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“,
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius