



**VILNIAUS UNIVERSITETAS
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS
GEOMOKSLŲ INSTITUTAS
HIDROGEOLOGIJOS IR INŽINERINĖS GEOLOGIJOS KATEDRA**

Rokas Sušinskis

Hidrogeologija ir inžinerinė geologija
Magistro baigiamasis darbas

Dulkio kiekio įtaka vidinės trinties kampo vertėms smėliuose

Darbo vadovas
Doc., Dr. Gintaras Žaržojus

Vilnius 2025



**VILNIUS UNIVERSITY
FACULTY OF CHEMISTRY AND GEOSCIENCES
INSTITUTE OF GEOSCIENCES
HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY**

Rokas Sušinskis

Hydrogeology and engineering geology
Master's thesis

**Effect of silt content on angle of internal friction of sand-silt
mixtures**

Scientific adviser
Assoc. Prof., Dr. Gintaras Žaržojus

Vilnius 2025

TURINYS

Turinys.....	3
IVADAS	5
1. Literatūros apžvalga	6
1.1 Rupių gruntų stiprumas	6
1.1.1 Granulometrija ir dalelių forma.....	7
1.1.2 Tankio efektai	8
1.2 Dulkių stiprumas	9
1.3 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms.....	9
1.3.1 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms dulkiuose	9
1.3.2 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms rupiuose gruntuose	10
1.4 Ribinis smulkiosios frakcijos kiekis (angl. Limiting fines content).....	12
1.5 Vidinės trinties kampo priklausomybė nuo dulkio kiekio.....	12
1.6 Literatūros apibendrinimas	16
2. Metodologija	17
2.1 Mišiniai.....	17
2.2 Tyrimų metodika	17
2.3 Fizinių savybių nustatymas	18
2.3.1 Granulimetrinės sudėties nustatymas	18
2.3.2 Plastiškumo ir takumo ribų nustatymas.....	22
2.3.3 Proktoro bandymas	23
2.3.4 Piknometro bandymas	24
2.4 Tiesioginio kirpimo bandymas	25
3. Rezultatai, tyrimų analizė ir vertinimas	28
3.1 Purūs ($I_D = 0$), išdžiovinti mišiniai	28
3.1.1 Vidinės trinties kampas	28
3.1.2 Kerpamieji stipriai	30
3.1.3 Tankis	31
3.1.4 Drėgnis	34
3.2 Tankūs ($I_D = 1$), optimalaus drėgnio mišiniai.....	35
3.2.1 Vidinės trinties kampas	35
3.2.2 Kerpamieji stipriai	37
3.2.3 Tankis	38
3.2.4 Drėgnis	39

3.3 Poringumas	40
IŠVADOS	42
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	43
SANTRAUKA	46
SUMMARY	47
PRIEDAI	48

IVADAS

Darbo temos aktualumas ir problema:

Šio darbo tyrimų objektas yra dulkingi smėliai. Natūraliai slūgsantys dulkingi smėliai gali būti naudojami kaip įvairių antžeminių ar požeminių konstrukcijų pagrindai, tuo tarpu iškastas gruntas gali būti naudojamas įvairioms dangoms ar sampyloms. Vidinės trinties kampas yra vienas iš pagrindinių rodiklių, nusakančių rupių gruntų stiprumą. Šis rodiklis ypač svarbus pamatų projektavime bei šlaitų stabilumo analizei. Nors smėlių be smulkiosios frakcijos priemaišos savybės yra gana ger ištirtos, tyrimų su dulkingais smėliais – palyginti nedaug. Šiame darbe atliktas dulkingo smėlio vidinės trinties kampo ($\phi, ^\circ$) tyrimas. Pagrindinis dėmesys bus skirtas vidinės trinties kampo priklausomybei nuo dulquio frakcijos kiekio smėlio masėje. Šis darbas iš dalies yra bakalauro darbo tęsinys, kadangi jo metu pastebėtos tendencijos neatitinkančios dalies mokslinių tyrimų rezultatų. Šiame darbe išanalizavus analogiškus tyrimus atliktus užsienyje pastebėta, kad įvairių autorių tyrimų rezultatai išsiskiria, yra nustatomos skirtingos tendencijos ar skirtingi tendencijų lūžimo taškai.

Darbo tikslas ir uždaviniai:

Darbo tikslas – atlikti kirpimo bandymus su skirtingus dulquio frakcijos kiekius turinčias smėlių mišiniais, nustatyti jų vidinės trinties kampo vertes, gautus rezultatus analizuoti, interpretuoti ir palyginti su jau esamais tyrimais. Šitam tikslui pasiekti buvo išsikelti šie uždaviniai:

1. Įsigilinti į esamą tyrimų padėti šioje srityje.
2. Surinkti medžiagą, kuri bus naudojama mišiniams gaminti.
3. Paruošti mišinius, kurie bus naudojami tyrimams.
4. Atlikti tiesioginio kirpimo ir kitus reikalingus bandymus užsibrėžtomis sąlygomis.
5. Gautus rezultatus susisteminti, išanalizuoti, juos įvertinti ir pateikti išvadas.

Darbo metodai:

Pagrindinis metodas naudotas šiame darbe yra tiesioginio kirpimo bandymas. Jis naudojamas siekiant įvertinti vidinės trinties kampo vertes. Mišiniams, kurie bus naudojami kirpimo bandymams paruošti ir jų savybėms apibūdinti, taip pat atlikti granulimetrinės sudėties nustatymo tyrimai tiek sietų, tiek hidrometro metodais, piknometro, proktoro, takumo ir plastingumo ribų bandymai.

Už pagalbą rašant šitą magistro darbą dėkoju savo darbo vadovui doc., dr. G. Žaržojui, už pagalbą renkant mėginius dėkoju UAB „Geotestus“ kolektyvui. Taip pat, už pagalbą atliekant laboratorinius tyrimus dėkoju VU Gruntų mechanikos laboratorijos kolektyvui.

Ankstesniuose darbuose šio baigiamojo darbo dalys nebuvo skelbtos ar kitaip panaudotos.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Per pastaruosius 50 metų atlikta daug tyrimų, kurių tikslas buvo charakterizuoti rupius gruntus be smulkiosios frakcijos priemaišų. Tačiau atlikta palyginti nedaug tyrimų, kurie nagrinėja dulkingo smėlio mechanines savybes. Pastebima, kad natūraliai aplinkoje susidarę dulkingi smėliai dažniausiai yra tankūs ir įvairaus drėgnio. Dulkingi smėliai būna pamatų pagrindu, terpė statiniams ar tuneliams, tiesiamos komunikacijos. Tai yra sudėtingos mechaninės elgsenos gruntai ir jų tyrimai padeda plačiau suprasti apie savybių formavimosi dėsningumus. Natūralūs smėliai dažniausiai turi įvairų kiekį smulkiosios frakcijos priemaišų, kuris turi įtakos jų mechaninėms savybėms, o pastarųjų metų tyrinėjimais daugiausiai buvo vertinamos „švarių“ smėlių savybės (Prasad ir Pandey, 2013).

Šio skyriaus tikslas yra išanalizuoti ir įvertinti ankstesnių autorių tyrimų rezultatus, jų naudotus metodus, atsižvelgiant į šių tyrimų patirtį, bei pastabas suteikti teorinį pagrindą atliekamam tyrimui.

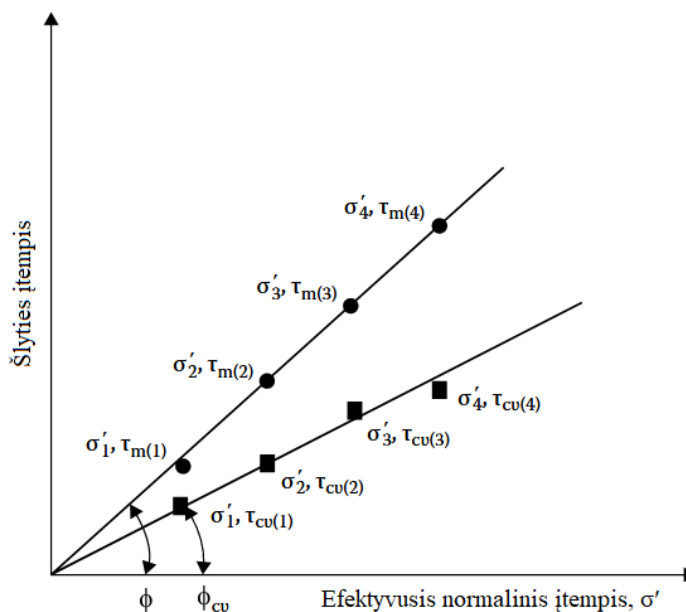
1.1 Rupių gruntų stiprumas

Smėlių ir žvyrų stiprumo charakteristikos yra panašios. Kadangi šie gruntai yra laidūs vandeniui, jie greitai drenuojasi. Tai nesankabūs gruntai, todėl jų stiprumą galima išreikšti formule:

$$\tau = \sigma' \times \tan \varphi' \quad (1)$$

kur τ - šlyties įtempis irimo metu, σ' - efektyvusis normalinis įtempis (kPa), φ' – efektyvusis vidinės trinties kampas (laipsn.).

Jei naudojamas išdžiovintas smėlis, nesusidaro porinis slėgis (u) ir tokiu atveju suminis normalinis įtempis (σ) yra lygus efektyviajam normaliniam įtempiui (σ'). Vidinės trinties kampas rupiems gruntams yra įvertinamas Moro-Kulono stiprumo kriterijaus grafike (1 pav.) vaizduojamos gaubiančiosios polinkio kampo, gruntų atveju tai tiesė, kurios lygtis yra Kulono lygtis (1). Moro-Kulono irimo gaubiančioji gali būti įvertinta brėžiant liniją per taškus, kurie atitinka eksperimento rezultatus. Kad būtų galima brėžti liniją, reikia atlikti mažiausiai 2 bandymus su skirtingomis vertikaliomis apkrovomis. Atitinkamai liekaninis, dar kitaip vadinamas kritinis vidinės trinties kampas (φ_{cv}), gali būti įvertintas brėžiant liniją per normalinio įtempio ir kritinio šlyties įtempio (τ_{cv}) atitikmens vietas. Kritinės būsenos vidinės trinties kampas rodo sąlygas, kuriomis šlytis vyksta pastoviu greičiu ir bandinio tūris nesikeičia. Puriems smėliams vidinės trinties kampo vertės yra apylygės kritinės būsenos vidinės trinties kampo vertėms (Coulomb, 1776; Mohr, 1900).



1 pav. Maksimalaus ir kritinės būsenos vidinės trinties kampo, gauto tiesioginio kirpimo bandymo metu, palyginimas (pagal Das, 2019).

Pagrindiniai faktoriai, lemiantys efektyvųjį vidinės trinties kampą, įprastai yra tankis, granulimetrinė sudėtis, deformacijų kraštinės sąlygos uždaviniui spręsti ir faktoriai lemiantys dalelių skilimą šlyties metu, tokie kaip normalinis įtempis, mineralai sudarantys daleles ir dalelių dydis bei forma (Duncan ir kt., 2014).

1.1.1 Granulimetrija ir dalelių forma

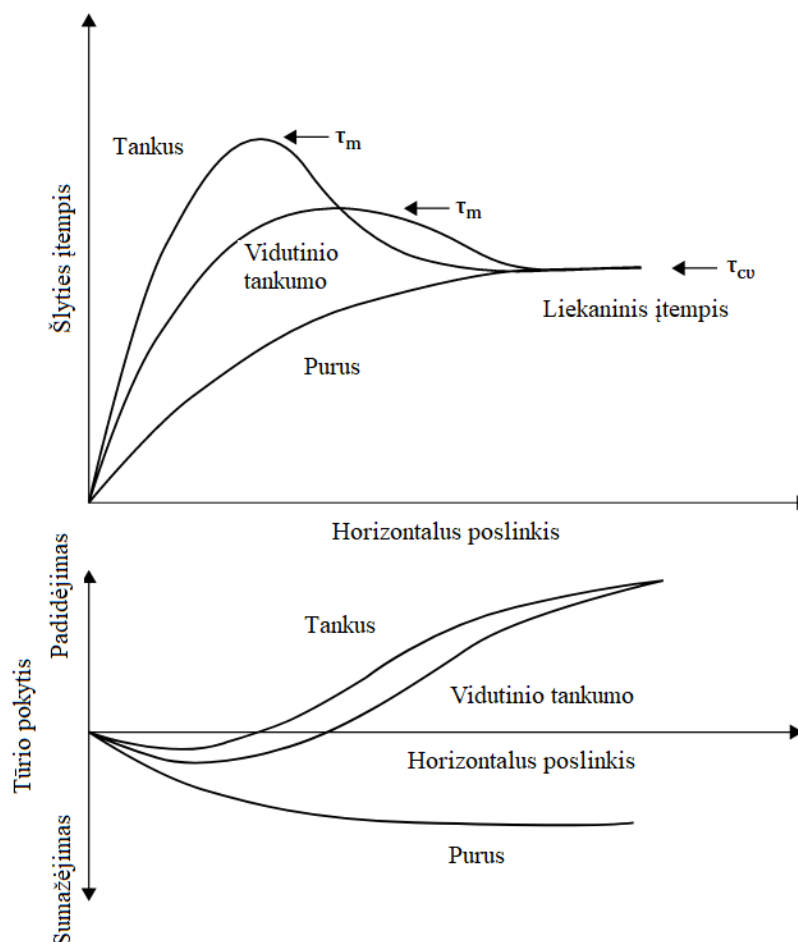
Nustatytos reikšmingos priklausomybės tarp dalelių dydžių medianos (D_{50}), rūšiutumo koeficiento (C_u) ir vidinės trinties kampo verčių. Pastebima, kad rupesni gruntai ir gruntai su didesnėmis rūšiutumo koeficiento reikšmėmis pasižymi didesnėmis vidinės trinties kampo vertėmis (Rasti ir kt., 2021). Kampuotos dalelės grunte mažina gruntą sudarančių dalelių mobilumą, kas lemia tokio grunto pasipriešinimą tankinimui ir didesnes vidinės trinties kampo vertes (Shin ir Santamarina, 2013). Mineraloginė sudėtis taip pat turi nemažą reikšmę smėlių stiprumui, Lee, Guimaraes ir Santamarina (2007) pastebi, kad smėliai, turintys žėručio priemaišų, pasižymi mažesnėmis vidinės trinties kampo vertėmis. Gruntų granulimetrinė sudėtis turi kur kas didesnę įtaką rupių gruntų stiprumui, tame tarpe ir vidinės trinties kampo reikšmėms, nei gruntus sudarančių dalelių forma ir jų apzulinimo laipsnis (Sezer ir kt., 2011).

Šiame darbe nebus vertinama dalelių formos ir mineraloginės sudėties įtaka.

1.1.2 Tankio efektai

Efektyvaus vidinio trinties kampo vertės didėja kartu su tankiu. Tarp puriausios ir tankiausios būsenos įprastai yra apie 10 laipsnių skirtumas (Duncan ir kt., 2014).

Priklausomai nuo grunto tankio skiriasi ir jo kirpimo grafikai. Paveikslas (2 pav.) rodo tipinius tiesioginio kirpimo bandymo rezultatus puriuose, vidutinio tankumo ir tankiuose smėliuose.



2 pav. Tiesioginio kirpimo rezultatai skirtingo tankumo smėliniuose gruntuose (pagal Das, 2019).

Pagal grafika (4 pav.) galima daryti šias išvadas:

1. Tankiuose ir vidutinio tankumo smėliuose šlyties įtempis didėja kartu su horizontaliu poslinkiu iki didžiausios (pikinės) vertės (τ_m), tada vėl sumažėja iki apytikriai pastovios vertės dar vadinamos liekaniniu arba kritiniu šlyties įtempiu (τ_{cv}).
2. Puriuose smėliuose šlyties įtempis didėja iki didžiausios vertės ir tada išlieka pastovus.
3. Tankiams ir vidutinio tankumo smėliams, bandinio tūris iš pradžių šiek tiek sumažėja, vėliau pradeda didėti kartu su horizontaliu poslinkiu. Esant didelėms horizontalaus poslinkio vertėms tūris išlieka sąlyginai pastovus.
4. Puriems smėliams bandinio tūris palaipsniui mažėja kol pasiekia tam tikra reikšmę ir po to išlieka pastovus (Das, 2019).

1.2 Dulkių stiprumas

Dulkių mechaninė elgsena nėra taip gerai ištirta ir suprantama kaip smėlių ir molių. Jų stiprumas priklauso nuo tų pačių principų kaip ir kitų gruntų, tačiau jų elgsenos įvairovė yra labai didelė ir šiuo metu turima informacija nėra pakankama numatyti ir įvertinti jų savybes tokiu pačiu patikimumu kaip rupių ir molinių gruntų. Dulkių gali pasižymėti tiek savybėmis būdingoms smulkiems smėliams, tiek savybėmis būdingomis moliams, dėl šios priežasties juos patogiau skirstyti į neplastiškus, kurių savybės artimesnės smėliams ir plastiškus, kurie artimesni moliams. Priešingai nei moliai, neplastiški dulkių beveik visada linkę plėstis šlyties metu, net kai jie yra sutankinti. Tai, taip pat apsunkina jų mechaninių savybių tyrimus (Torrey, 1982; Wang ir Ronaldo, 2012).

1.3 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms.

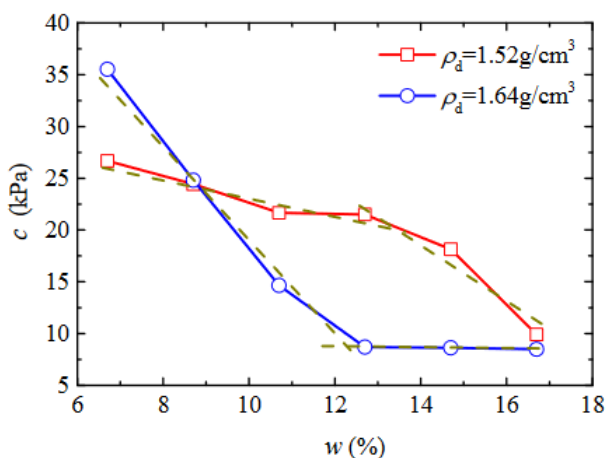
1.3.1 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms dulkiuose

Zhou et al. (2020) tyrė mažo plastiškumo dulkių stiprumines savybes atlikdami bandymus su skirtingo drėgnio bandiniais. Tyrimai atlikti esant dviem sauso grunto tankiams (ρ_d) - 1,52 Mg/m³ ir 1,64 Mg/m³ ir 6 skirtingais drėgniais: 6,7%, 8,7%, 10,7%, 12,7%, 14,7% ir 16,7%. Naudotos 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ir 400 kPa vertikalios apkrovos.

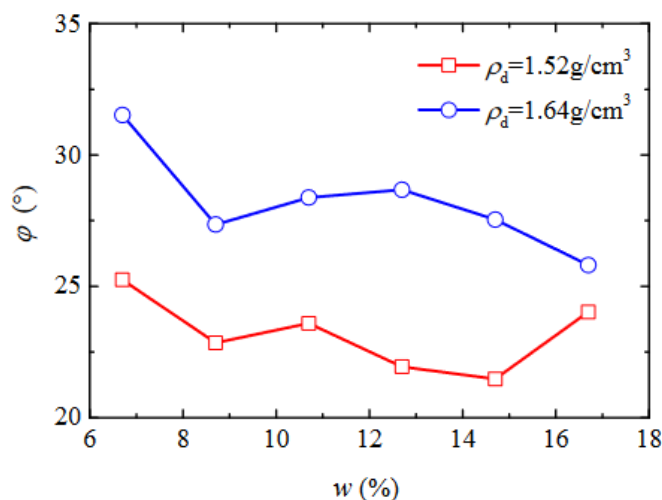
Padarytos išvados:

1. Esant vienodai apkrovai - kuo mažesnis drėgmės kiekis, tuo didesnis kerpamasis stipris.
2. Esant vienodam grunto skeleto tankiui - kerpamojo stiprio vertės didėja, didėjant vertikaliai apkrovai.
3. Esant vienodam drėgniui - kuo didesnis grunto skeleto tankis, tuo didesnis ir kerpamasis stipris.

Kaip matoma 3 paveiksle, sankiba priklauso nuo drėgmės kiekio ir didėjant drėgmės kiekiui, sankiba mažėja. Santykis išreiškiamas dviejų dalių priklausomybės linija, kurios lūžio taškas yra apytikriai ties optimaliu drėgmės kiekiu (w_{opt}). Grafike (4 pav.) parodyta vidinės trinties kampo priklausomybė nuo drėgmės kiekio. Iš rezultatų galima spręsti, kad drėgmės kiekis neturi didelės įtakos vidinės trinties kampo vertėms esant tam pačiam grunto skeleto tankiui, tačiau pastebima tendencija, kad didėjant drėgmės kiekiui vidinės trinties kampas po truputį mažėja.



3 pav. Drėgnio ir sankibos priklausomybė neplastiškuose dulkiuose (Zhou et al., 2020).

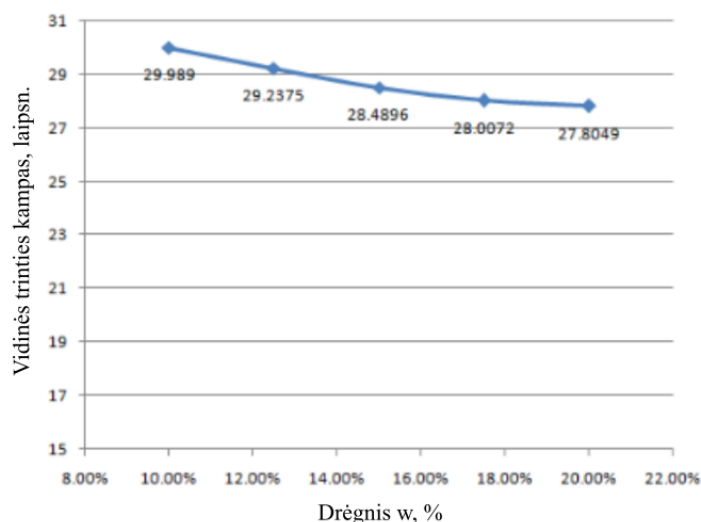


4 pav. Vidinės trinties kampo ir drėgmės priklausomybė neplastiškuose dulkiuose (Zhou et al., 2020).

1.3.2 Drėgmės įtaka vidinės trinties kampo vertėms rupiuose gruntuose

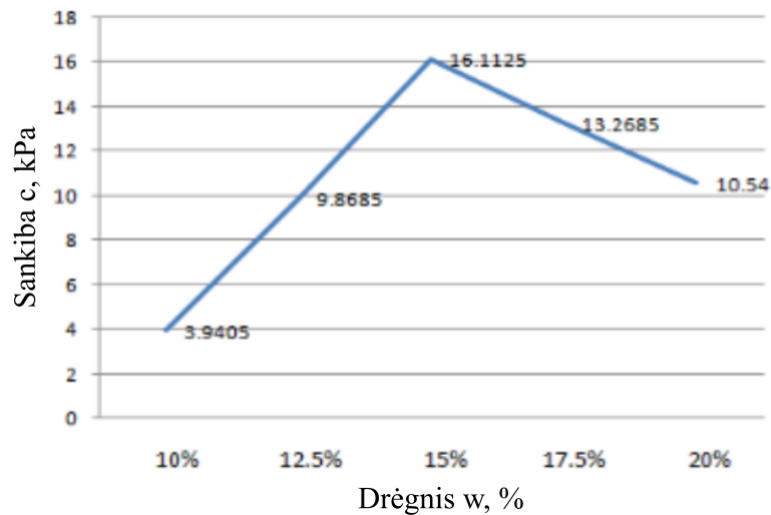
Išdžiovinto smėlio kerpamasis stipris yra mažas, didinant drėgmės kiekį, kerpamasis stipris palaipsniui didėja dėl vandens plėvelių esančių tarp dalelių traukos. Pasiekus tam tikrą drėgnį kerpamasis stipris ima vėl mažėti.

Kai sauso grunto tankis (ρ_d) yra pastovus, smėliuose vidinės trinties kampas nežymiai mažėja su didėjančiu drėgmės kiekiu. Šiuo atveju, ant smėlio dalelių susidaranti plėvelė padeda dalelėms lengviau slysti viena kitos atžvilgiu ir sumažina trintį, bet kadangi smėlio dalelės palyginti su molio dalelėmis yra didelės, jų bendras paviršiaus plotas yra mažesnis ir jos neišlaiko savo paviršiuje daug vandens, pastebima vandens įtaka vidiniam trinties kampui nėra labai žymi. Grafikas 5 pav. rodo nustatytą vidinės trinties kampo ir drėgmės kiekio priklausomybę.



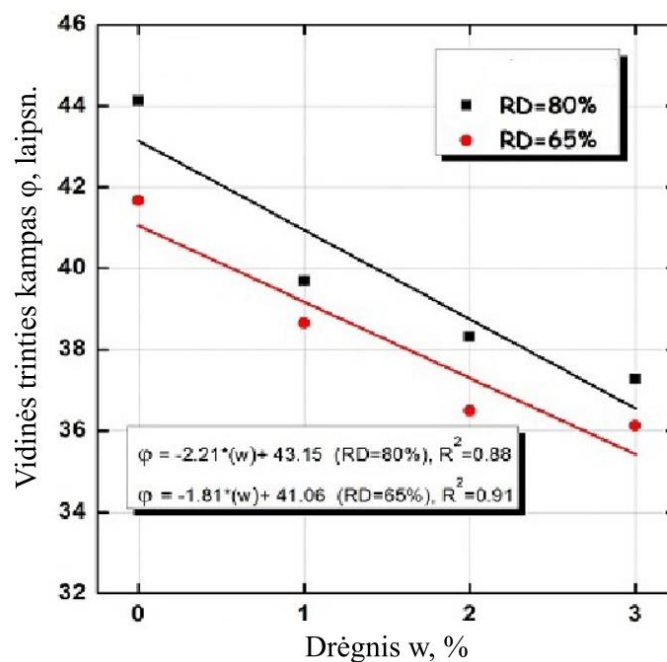
5 pav. Drėgmės ir vidinės trinties kampo priklausomybė smėliniuose gruntuose, pagal Li ir Gao (2016).

Panašiai kaip ir su kerpamuoju stipriu, sankiba didėja iki tam tikro kiekio drėgmės, po to vėl mažėja. Būtina pabrėžti, kad ši sankiba yra sukeliamą kapiliarinių jėgų veikiančių tarp dalelių, todėl ji sukelia tik tariamosios sankibos efektą. Sankibos ir drėgmės koreliacijos grafikas pavaizduotas 6 pav. (Li ir Gao, 2016).



6 pav. Drėgnio ir sankibos priklausomybė smėliniuose gruntuose, pagal Li ir Gao (2016).

Mažas drėgmės kiekis (iki 3%) taip pat gali turėti nemažą įtaką smėlių stiprumui. Bouri ir kt.(2020) tyrimo metu buvo aiškinamasi kaip maži drėgmės kiekiai įtakoja smėlinių gruntų vidinės trinties kampo vertes. Pastebėta, kad intervale nuo 0% iki 3% drėgmės kiekio, mėginiuose su 65% tankumo rodikliu vidinės trinties kampas sumažėja nuo 41,67° iki 36,13°, o mėginiuose su 80% tankumo rodikliu nuo 44,13° iki 37,23°. Bandymų rezultatai pavaizduoti 7 pav. Taigi, mažas kiekis drėgmės turi didelę reikšmę vidinės trinties kampo vertėms.



7 pav. Drėgmės kiekio įtaka vidinės trinties kampo vertėms (pagal Bouri ir kt., 2020).

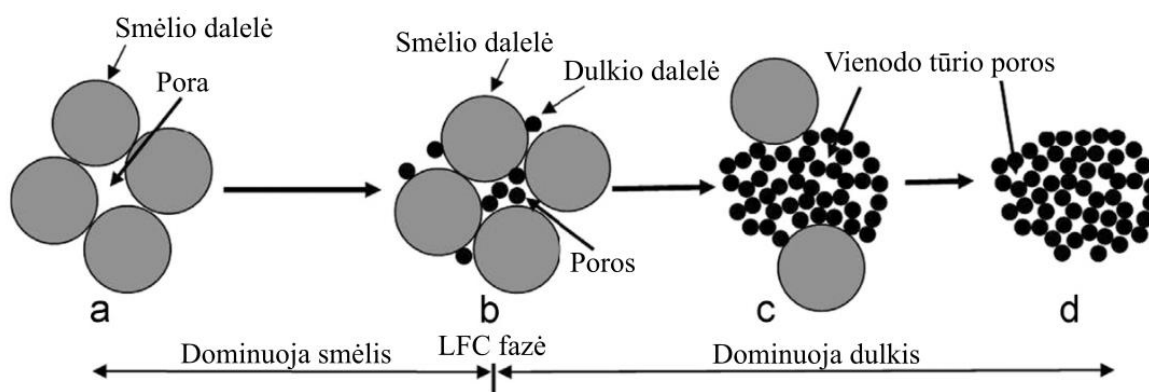
1.4 Ribinis smulkiosios frakcijos kiekis (angl. Limiting fines content)

Pridedant dulquio frakcijos dalelių į smėlį jis pereina iš vienos fazės į kitą per tašką, kuris apibūdiną mišinio elgseną, jis dar vadinamas ribiniu smulkiosios frakcijos kiekiu (LFC). Nesiekiant jo, mišinys yra daugiausia sudarytas iš rupių dalelių, ir dulquio dalelių, kurios yra pasiskirsčiusios rupių dalelių sudaromame skelete. Perėjus šią ribą susidaro pakankamas dulquio dalelių kiekis ir smėlio dalelės praranda kontaktą viena su kita, tarpai tarp jų užpildomi dulkiu. LFC, pagal Hazirbaba (2005) apskaičiuojamas:

$$LFC = \frac{W_{fines}}{W_{sand} + W_{fines}} = \frac{\rho_s \cdot e_s}{\rho_s \cdot e_s + \rho_d(1 + e_f)} \quad (2)$$

kur W_{fines} – smulkios frakcijos svoris, W_{sand} – smėlio frakcijos svoris, ρ_s – smulkios frakcijos kietų dalelių tankis, ρ_d – smėlio frakcijos sauso grunto tankis, e_f – smulkios frakcijos poringumo koeficientas, e_s – smėlio frakcijos poringumo koeficientas

Vizualiai šie struktūros pokyčiai vaizduojami 8 paveiksle. (a) parodo „švaraus“ smėlio struktūrą. Pridėjus nedidelį kiekį dulquio frakcijos į mišinį, dulgis užpildo tarpus tarp smėlio dalelių (b). Pasiekus tam tikrą kiekį dulquio frakcijos jis pradeda atskirti smėlio daleles viena nuo kitos (c), šis kiekis ir yra LFC. Pridedant dulquio į mišinį tarp (b) ir (c) smėlio daleles tampa atskirtos, kol galiausiai pasiekia gryną dulką (d). LFC dažniausiai yra pasiekiamas tarp 20 ir 30%.. Esant pastoviam poringumui (angl. constant global void ratio) maksimalūs šlyties įtempiai mažėja didėjant dulquio frakcijos kiekiui iki LFC, po to vėl pradeda didėti (Karim ir Alam, 2017).



8 pav. Smėlio – dulquio mišinio struktūros pokyčiai, keičiantis dulquio frakcijos kiekiui, pagal Karim ir Alam, (2017).

1.5 Vidinės trinties kampo priklausomybė nuo dulquio kiekio

Smėlių be priemaišų arba kitaip „švarių“ smėlių stiprumo ir deformacinės savybės jau yra plačiai ištirtos, tačiau natūraliai gamtoje slūgsantys smėliai dažniausiai savo sudėtyje turi smulkiosios frakcijos priemaišų - dulquio ir molio dalelių, kurios paveikia jų mechanines savybes (Salgado ir kt., 2000).

Bakalauriniame darbe (Sušinskis, 2023) tiesioginio kirpimo metodu gauti rezultatai rodo, kad natūralūs smėliai, su didesne smulkiosios frakcijos priemaiša, pasižymi didesnėmis vidinės trinties kampo vertėmis, pastebima tendencija ϕ vertėms augti su dulquio kiekiu. Tyrimai atlikti su purios būsenos smėliais turinčiais nuo 5% iki 24% smulkiosios frakcijos priemaišos.

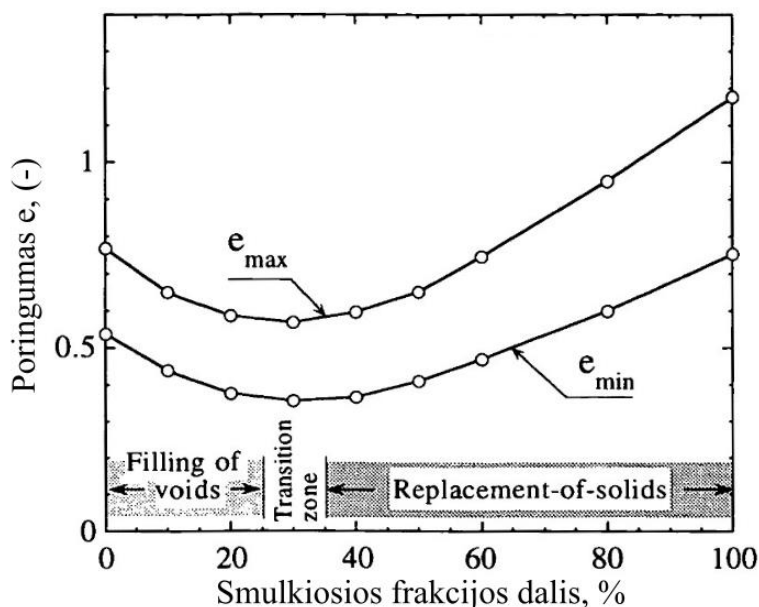
Salgado ir kt. (2000) atliko tyrimus su neplastiškos smulkiosios frakcijos ir smėlio mišiniais, tyrimai buvo atlikti su mišiniais, kuriuose buvo nuo 5 iki 20% smulkiosios frakcijos (pagal masę). Tyrimai atlikti naudojant drenuotą konsoliduotą triašį bandymą, su vandeniu prisotintais gruntais. Tyrimai atlikti esant dviem sąlygoms: esant 400 kPa hidrostatiniam slėgiui ir 30% tankumo rodikliui ir esant 100 kPa hidrostatiniam slėgiui ir 80% tankumo rodikliui. Rezultatai rodo, kad kritinės būsenos vidinės trinties kampas didėja, didėjant smulkiosios frakcijos kiekiui, dilatacija taip pat didėja. Kadangi šie du rodikliai didėja, vidinis trinties kampas taip pat didėja.

Murthy ir kt. (2007) tyrimai atlikti su 5 – 15% dulquio-smėlio mišiniais, naudojant triašį drenuotą konsoliduotą metodą, testuojamas gruntas buvo prisotintas vandeniu. Rezultatai rodo taip pat kaip ir Salgado ir kt.(2000), kad didėjant smulkios frakcijos kiekiui, didėja kritinės būsenos vidinės trinties kampas. Taip pat, šiame tyrime pastebėta, kad maži kiekiai (iki 5%) neplastiškos smulkiosios frakcijos nedaro didelės įtakos pagrindinėms mechaninėms smėlinių gruntų savybėms. Tai leidžia tokiems gruntams taikyti modeliavimą, kuris taikomas ir „švariems“ smėliams.

Panašius rezultatus rodo ir Ni ir kt. (2004) tyrimas, kurio metu nustatyta, kad pridėjus 9% neplastiško dulquio (sutrintas silicis) į „švarų“ smėlį jis padidina to smėlio kritinės būsenos vidinės trinties kampą 2,5%. Sladen ir kt. (1985) tyrimai rodo, kad pridėjus smulkiosios frakcijos į smėlio mišinį taip pat didėja kritinės būsenos vidinės trinties kampas.

Ching, Chang ir Zhen-Yu (2010) tyrimuose padaryta išvada, kad kai kuriais atvejais ϕ_{cs} nėra priklausomas nuo dulquio frakcijos kiekio. Bouckovalas ir kt. (2003) atlikti tyrimai su 0 - 10% dulquio-smėlio mišiniais, rodo, kad ϕ_{cs} nėra priklausomas nuo dulquio frakcijos kiekio. Panašius rezultatus gauna ir Thevanayagam ir kt. (2002).

Cubrinovski ir Ishihara (2002) tyrimuose nustatyta, kad tiek maksimalus, tiek minimalus poringumo koeficientas mažėja nuo 0% iki 20% smulkiosios frakcijos priemaišos. Intervale nuo 20% iki 40% smulkiosios frakcijos priemaišos pastebima pereinamoji zona, kurioje smulkioji frakcija užpildo poras ir pradeda pakeisti stambesnes daleles. Nuo 40% minimalus ir maksimalus poringumo koeficientas nuosekliai didėja iki kol pasiekia didžiausią vertę ties 100% smulkiosios frakcijos kiekiu. Grafiškai šis poringumo pokytis pavaizduotas 9 pav.



9 pav. Maksimalaus ir minimalaus poringumo koeficiento priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos priemaišos smėlių mišiniuose, pagal Cubrinovski ir Ishihara (2002).

Li et al. 2021 atliko tyrimą su tiesioginio kirpimo aparatu, kuriame buvo tirta dulquio frakcijos įtaka dulquio-smėlio mišiniams kuriuose yra 0; 5; 10 ir 20% dulquio frakcijos. Kirpimo bandymai atlikti esant 3 sąlygoms:

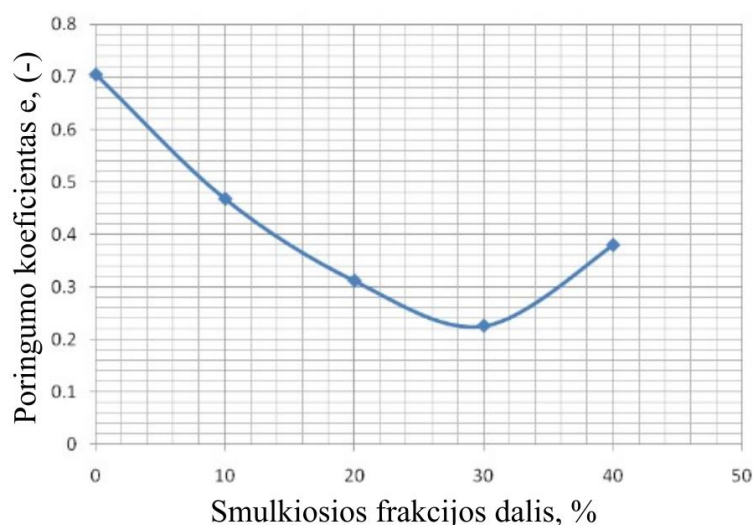
- Optimalaus drėgnio
- Vidutinio sauso tankio
- Prisotintos būsenos

Rezultatai rodo, kad optimalaus drėgnio atveju vidinės trinties kampas didėja, didėjant dulquio frakcijos kiekiui. Vidutinio sauso tankio atveju, taip pat vidinės trinties kampas didėja, didėjant dulquio frakcijos kiekiui. Kadangi dulquio maksimalus sausas tankis yra mažesnis už smėlio, pridėdant dulquio frakcijos į mišinį, jo tankis didėja, kas padidina jo stiprumą. Prisotintos būsenos mišinių vidinės trinties kampo tendencija yra atvirkštinė – didėjant dulquio kiekiui, jis mažėja, tai galima aiškinti tuo, kad vanduo turi 2 neigiamus efektus tokio tipo grunto stiprumui: perteklinis vanduo mažina kapiliarinių jėgų poveikį tarp dalelių ir porinio vandens egzistavimas pakeičia perduodamo įtempio poveikius.

Visomis sąlygomis sankiba didėjant dulquio frakcijos kiekiui didėja.

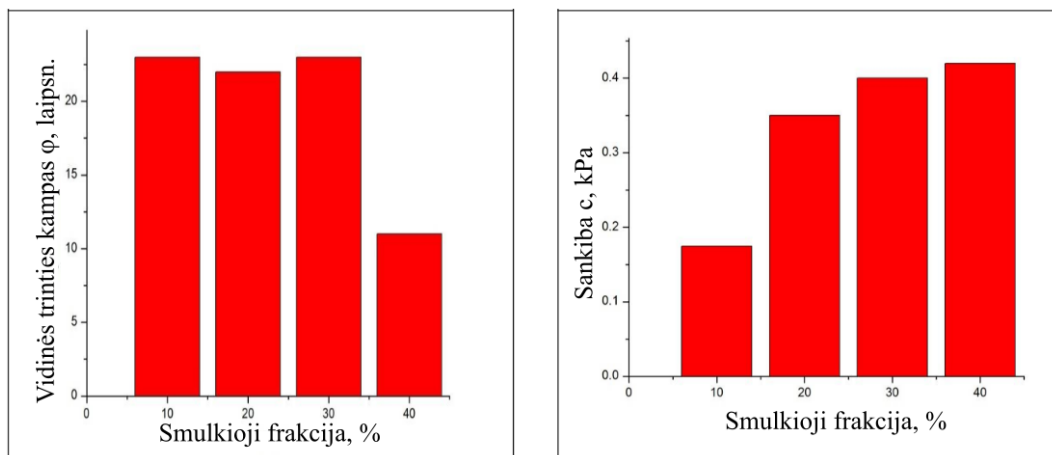
Norsyahariati, Hui ir Juliana (2016) atlikti tiesioginio kirpimo bandymai su tokios pačios morfologinės sudėties 20% ir 40% dulquio-smėlio mišiniais. Pastebėta, kad maksimalus šlyties įtempis yra didesnis bandinyje su 40% dulquio frakcijos. Tačiau jo vidinės trinties kampas mažesnis. 20% mėginyje buvo pakankamas smulkių dalelių kiekis užpildyti tuštumas tarp smėlio dalelių, kad jos negalėtų slysti ir riedėti viena kitos atžvilgiu. 40% mėginyje dulquio dalelės labiau dominuoja ir jo vidinės trinties kampas yra mažesnis. Sankiba didesnė 40% bandinyje, kadangi yra didesnis smulkių dalelių kiekis, dėl to yra didesnis kontaktinio paviršiaus plotas.

Prasad ir Pandey (2013) tyrė neplastiško dulquio kiekio įtaką mechaninėms smėlinių gruntų savybėms. Šio tyrimo metu buvo pastebėta, kad grunto kietų dalelių tankis ir netiesiogiai iš jo išskaičiuotas poringumo koeficientas priklauso nuo smulkiosios frakcijos kiekio. Poringumo koeficientas mažėja iki 30% smulkiosios frakcijos, po šio taško didėjant smulkiosios frakcijos kiekiui mišinyje jis vėl auga (10 pav.). Nustatyta, kad optimalus smulkiosios frakcijos kiekis mažiausiam poringumo koeficientui yra 30%. Analogiškai rezultatai gauti ir lyginant optimalų drėgnį ir maksimalų sauso grunto tankį su smulkiosios frakcijos kiekiu.



10 pav. Poringumo koeficiento priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos kiekio, pagal Prasad ir Pandey (2013).

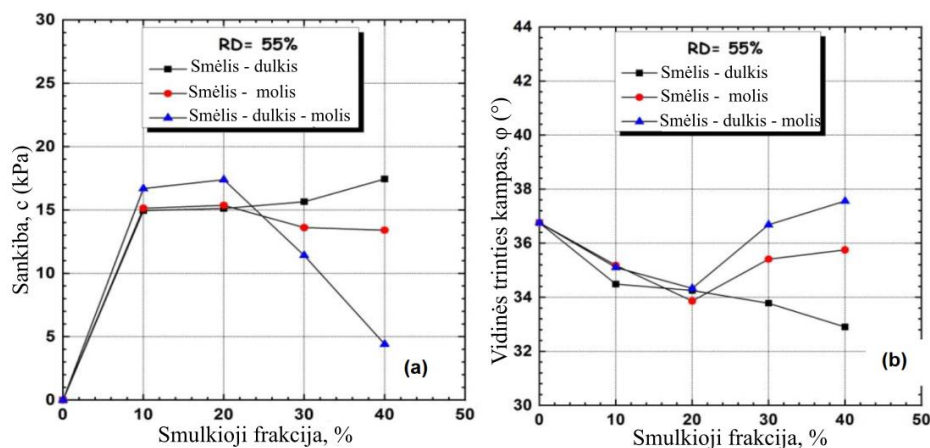
Nustačius vidinės trinties kampo vertes mišiniams taip pat pastebėta, kad vidinės trinties kampas didėja iki 30% smulkiosios frakcijos, o vėliau staigiai mažėja. Tuo tarpu sankiba didėja kartu su smulkiosios frakcijos kiekiu, šie rezultatai pavaizduoti 11 paveiksle.



11 pav. Priklausomybės tarp vidinio trinties kampo; sankibos ir smulkiosios frakcijos kiekio (Prasad ir Pandey, 2013).

Kalbant apie bandinius sausoje būsenoje, Thevanayagam ir Martin (2002), bei Lade ir Yamamuro (1997) atlikti tyrimai parodė, kad, kai yra maža smulkiosios frakcijos priemaiša smėliuose (<5%), smulkiosios frakcijos dalelės yra laisvai talpinamos erdvėje tarp rupesnių smėlio dalelių. Šlyties metu šios dalelės neužpildo erdvės tarp smėlio dalelių, tai lemia bandinio susispaudimą ir stiprumo sumažėjimą. Kita vertus, jei smulkiosios frakcijos priemaiša yra >5%, mechaninės savybės jau lemia kontaktai tarp smulkiosios frakcijos ir smėlio dalelių. Šitas kontaktinio paviršiaus ploto padidėjimas lemia ir didesnę grunto stiprumą.

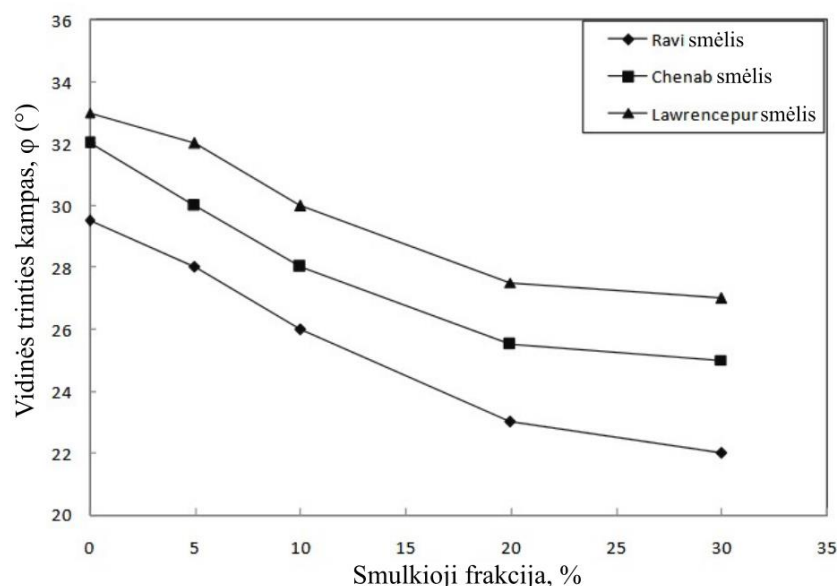
Mohammed ir kt. (2024) atlikti tiesioginio kirpimo bandymai su išdžiovintais mėginiais, esant vidutiniam tankumo rodikliui (55%) parodė, kad skirtingai nei smėlio mišiniai su molio ar molio ir dulkio smulkusiosiomis frakcijos, smėlio mišiniai tik su dulkio frakcijos priemaiša pasižymi mažėjančiu vidinės trinties kampu (iki 40% smulkiosios frakcijos). Sankiba šiuo atveju didėja iki tam tikro taško (apie 20%), vėliau vėl pradeda mažėti su smulkiosios frakcijos priemaiša. Šio tyrimo rezultatai matomi 12 pav.



12 pav. Sankibos (a) ir vidinės trinties kampo (b) priklausomybė nuo skirtingų tipų ir kiekių smulkiosios frakcijos priemaišų, pagal Mohammed ir kt. (2024).

Panašius rezultatus gauna ir Bouri ir kt. (2020), bei Mujtaba ir Farooq (2014). Bouri ir kt. (2020) Tyrimuose atliktuose su 0;10;20;30 ir 40% mišiniais, esant 65% ir 80% tankumo rodikliams, vidinės trinties kampas mažėja, didėjant smulkiosios frakcijos priemaišai.

Mujtaba ir Farooq (2014) pastebi, kad dulquio frakcijos dalelių priemaiša turi didesnę įtaką smulkesnio smėlio mišiniams. Rupauso smėlio ir smulkiosios frakcijos mišiniuose (0% - 30%) vidinės trinties kampas sumažėjo 18,2%, tuo tarpu smulkesnio smėlio mišiniuose 21,8% ir 28,8%, taip pat pastebima, kad sumažėjimas kur kas staigesnis intervale nuo 0% iki 20% smulkiosios frakcijos kiekio. Šio tyrimo metu nustatyti vidinės trinties kampo verčių pokyčiai pavaizduoti 13 paveiksle.



13 pav. Vidinės trinties kampo vertės skirtingo rūpumo smėlių ir smulkiosios frakcijos mišiniuose, pagal Mujtaba ir Farooq (2014) .

1.6 Literatūros apibendrinimas

Iš ankščiau atliktų tyrimų matoma, kad rezultatų įvairovė yra labai didelė, kaip ir buvo jau ankščiau minėta Duncan, Wright ir Brandon (2014) dulkių elgsenos įvairovė yra labai didelė ir šiuo metu turima informacija nėra pakankama numatyti ir įvertinti jų savybes tokiu pačiu patikimumu kaip rupių ir molinių gruntų. Panašūs rezultatai pastebimi ir ankščiau atliktuose tyrimuose.

Kirtinės būsenos vidinės trinties kampas didėja Salgado ir kt. (2000), Murthy ir kt. (2007), Ni ir kt. (2004), Sladen ir kt. (1985) tyrimuose.

Kirtinės būsenos vidinės trinties kampas nėra priklausomas nuo dulquio frakcijos priemaišos mišinyje pagal Ching, Chang ir Zhen-Yu (2010), Thevanayagam ir kt. (2002) gautus rezultatus. Bouckovalas ir kt. (2003) atlikti tyrimai rodo, kad 0-10% smulkiosios frakcijos priemaiša įtakos neturi kritiniam vidinės trinties kampo vertėms.

Vidinės trinties kampas didėja Prasad ir Pandey (2013), Thevanayagam ir Martin (2002), Lade ir Yamamuro (1997) ir Salgado ir kt. (2000) atliktuose tyrimuose. Li et al. (2021) vidinės trinties kampas didėja tyrimuose atliktuose su vidutinio sauso tankio ir optimalaus drėgnio mišiniais.

Vidinės trinties kampas mažėja Bouri ir kt. (2020), Mujtaba ir Farooq (2014), Mohammed ir kt. (2024), Norsyahariati, Hui ir Juliana (2016) atliktuose tyrimuose, Li et al. (2021) tyrimuose pastebima, kad kampas mažėja tik prisotintos būsenos sąlygomis.

Šie tyrėjų rezultatų skirtumai lemia tolesnių tyrimų poreikį.

2. METODOLOGIJA

2.1 Mišiniai

Norint pašalinti morfologijos ir smėlių frakcijų įtaka nuspręsta naudoti sertifikuota UAB „Anykščių kvarcas“ 0,0 - 0,4 mm kvarcinį smėlį.

Smulkiosios frakcijos ir kvarcinio smėlio mišiniai maišomi atsižvelgiant į LST EN ISO 17892-4: 2017 standarte nurodytas ribas, bandymai bus atliekami su kvarciniu smėliu ir 5%; 15% ir 30% smulkiosios frakcijos mišiniais. 30% riba pasirinkta atsižvelgiant į tai, kad 35% yra ribinė vertė, nuo kurios mišinio mechaninę elgseną jau gali būti priklausoma nuo smulkiosios frakcijos, kaip jau buvo aptarta 2.5 skyriuje

Pirmiausia lauko darbų metu buvo surinkti gruntai, kurie vizualiai įvertinti kaip dulkingi smėliai arba smėlingi dulkiai. Šiems gruntams buvo atlikti granulimetrinės sudėties bandymai (hidrometro metodu) ir pagal gautus duomenis atrinkti tinkami bandiniai. Smulkioji frakcija buvo atskirta iš atrinktų gruntų naudojant plovimo per sietus metodą. Atskiriama <0,063 mm frakcija. Vienas iš smulkiosios frakcijos bandinių buvo atskirtas ne iš natūralaus grunto, šis bandinys atskirtas iš pirkinių kvarco miltų, jis pasirinktas norint įvertinti dulquio frakcijos be molio priemaišos savybes, kadangi visi natūralūs gruntai buvo su molio priemaiša. Smulkiosios frakcijos medžiaga ir kvarcinis smėlis yra išdžiovinami krosnyje ir vėliau (pagal masę) sumaišomi mišiniai, kurie bus naudojami vėlesniems tyrimams.

2.2 Tyrimų metodika

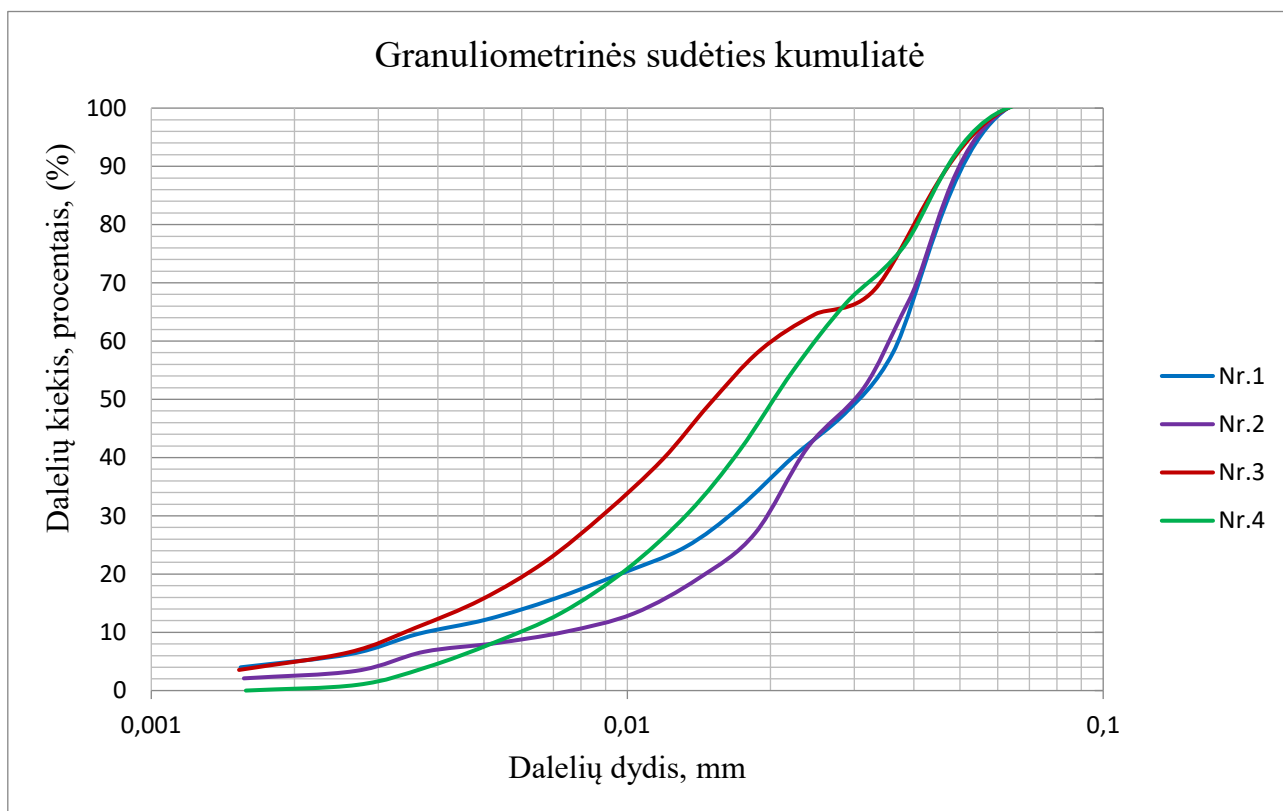
1. Atliekami tyrimai su kvarciniu smėliu:
 - Granulometrija (sietų metodas)
 - Proktoro bandymas
 - Piknometro bandymas
 - Tiesioginis kirpimas
 - Drėgnis iškart po kirpimo.
2. Atskiriama smulkioji frakcija iš natūralaus grunto, naudojant sietus (<0,063 mm)
Su smulkiąją frakcija atliekama:
 - Granulometrija (hidrometro metodas)
 - Piknometro bandymas
 - Plastiškumo ir takumo ribų nustatymas
3. Pagaminami mišiniai (5%; 15% ir 30%)
4. Atliekami bandymai su mišiniais:
 - Proktoro bandymas
 - Piknometro bandymas
 - Tiesioginis kirpimas
 - Plastiškumo ir takumo ribų nustatymas 30% mišiniams, jei nustatoma, kad pasižymi plastiškumu bandymas atliekamas ir su 15% mišiniu.
5. Atliekami tiesioginio kirpimo bandymai su krosnyje išdžiovintais puriais, $I_D = 0$ (I_D - tankumo rodiklis, vnt.d) mišiniais.
6. Atliekami tiesioginio kirpimo bandymai su optimalaus drėgnio sutankintais, $I_D = 1$, mišiniais.
7. Atliekami skaičiavimai, rezultatų vertinimas ir analizė.

2.3 Fizinių savybių nustatymas

2.3.1 Granulimetrinės sudėties nustatymas

Granulimetrinės sudėties analizė atliekama remiantis LST EN ISO 17892-4: 2017 standartu. Šio bandymo metu naudojant specializuotus sietus yra išskiriamos 9 frakcijos. Po siojimo kiekviename sietė likusi medžiaga yra pasverama ir fiksuojamos masės vertės. Pagal gautas mases yra suskaičiuojami procentiniai masės kiekiai, pagal kuriuos yra braižoma granulimetrinė kumuliatyvinė kreivė kuri leidžia vizualiai įvertinti gruntą sudarančių dalelių dydžių pasiskirstymą. Smulkiosios frakcijos granulimetrinė sudėtis buvo nustatoma naudojant hidrometro metodą, taip pat naudojant LST EN ISO 17892-4: 2017 standartą.

Iš viso buvo išskirti 4 smulkiosios frakcijos bandiniai, kurie buvo naudojami mišiniam pagaminti. Mėginiai Nr. 1; 2 ir 3 atskirti iš natūralaus grunto surinkto lauko darbų metu, plaunant surinkta medžiagą per 0,063 mm sietą. Mėginys Nr. 4 naudojant tokį pat metodą atskirtas iš pirktinio malto kvarco. Granulimetrinės sudėties rezultatai, nustatyti hidrometro metodu, pateikti 1 lentelėje, mėginių granulimetrinės sudėties kumuliatės pateiktos 14 pav. Visų smulkiosios frakcijos mėginių pavadinimas pagal LST EN ISO 17892-4: 2017 yra dulkis (Si). Didžiausios molio frakcijos priemonės pastebimos mėginiuose Nr.1 ir Nr. 3 (iki 5%).

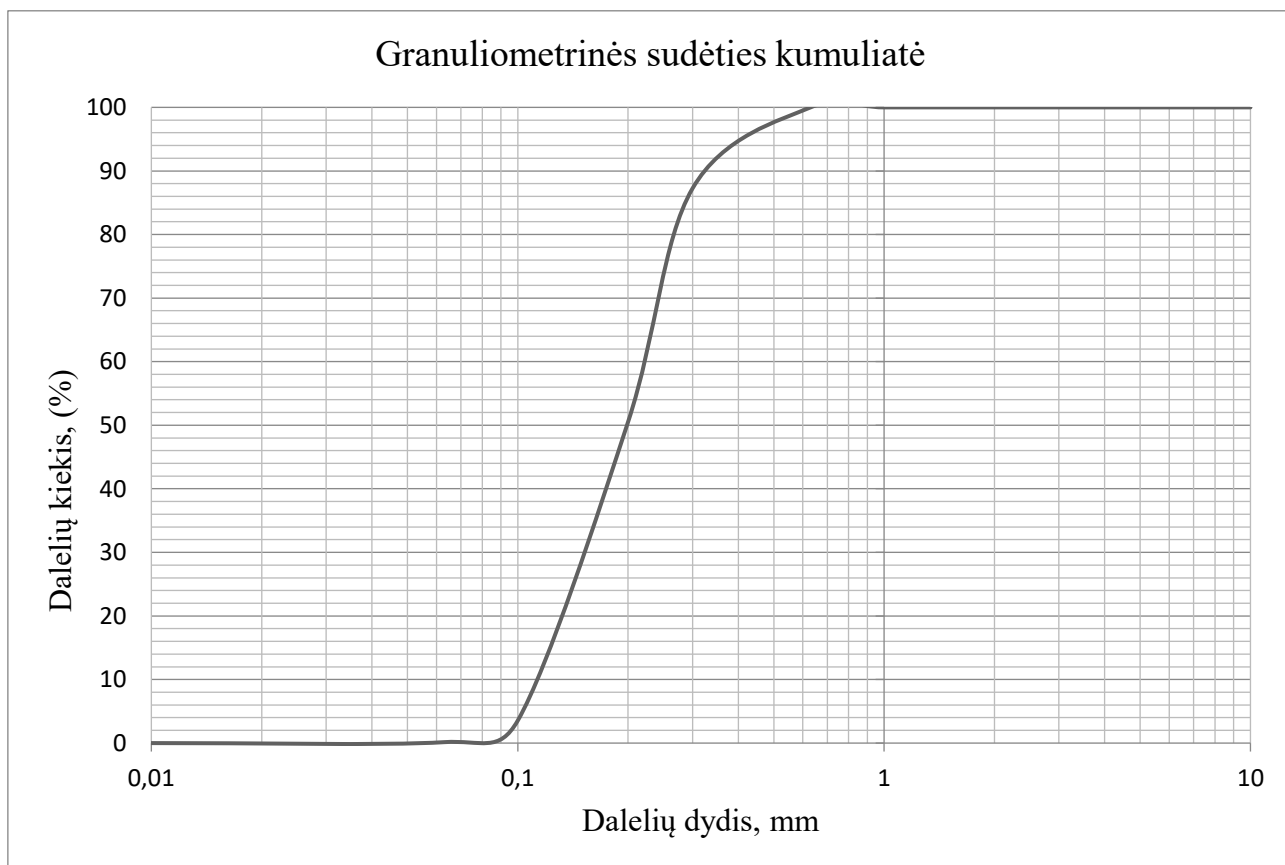


14 pav. Smulkiosios frakcijos granulimetrinės kreivės.

1 lentelė. Smulkiosios frakcijos granuliometriniai duomenys.

Mėginys	Molis	Dulkis			Smėlis
		Smulkus	Vidutinis	Rupus	
	<0,002	0,002-0,0063	0,0063-0,02	0,02-0,063	>0,063
Nr.1	4,97	8,94	22,27	59,13	0
Nr.2	2,6	6,19	22,16	64,91	0
Nr.3	4,88	14,62	39,97	37,41	0
Nr.4	0,00	10,13	38,57	48,43	0

Atlikus UAB „Anykščių kvarcas“ 0,0-0,4 mm frakcijos džiovinto kvarcinio smėlio sijojimo bandymus sietų metodų gauti granuliometrinės sudėties rezultatai. Šio smėlio granuliometrinės sudėties kumuliatė pateikta 15 pav., o dalelių kiekiai procentais kiekvienoje frakcijoje 2 lentelėje.



15 pav. kvarcinio smėlio naudoto mišiniam granuliometrinė kreivė.

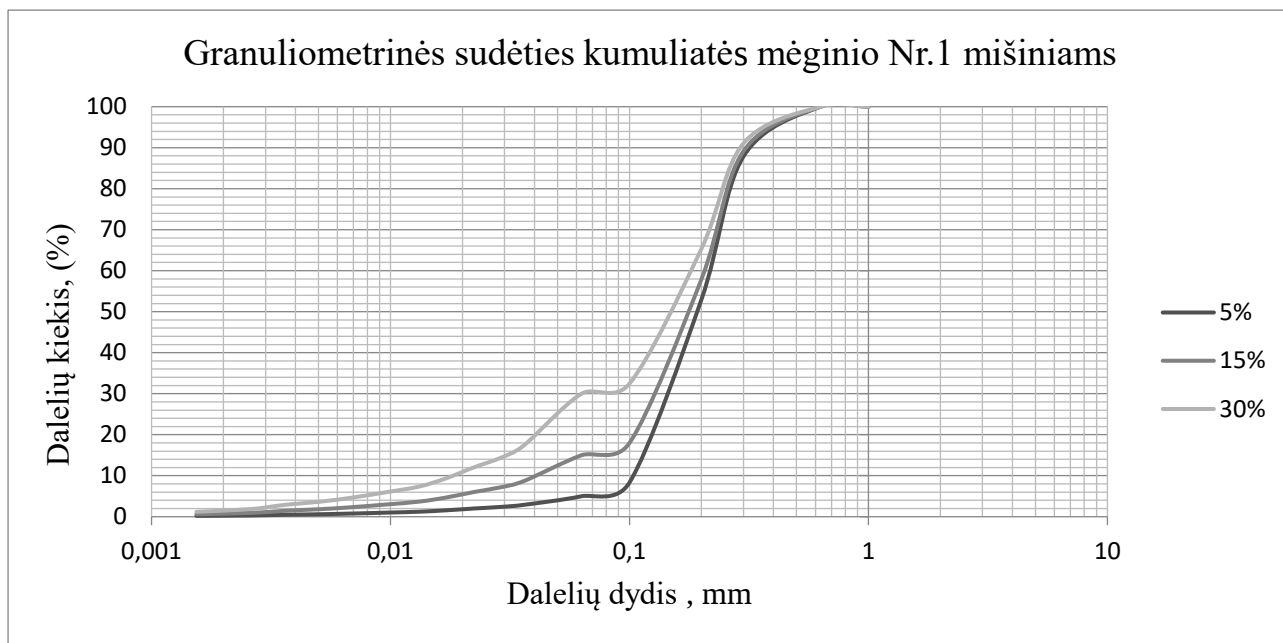
2 lentelė. Kvarcinio smėlio frakcijų kiekiai.

Dalelių kiekis, procentais				
<0,063	0,063-0,2	0,2-0,6	0,6-2,0	>2,0
0,15	50,34	49,51	0,00	0,00

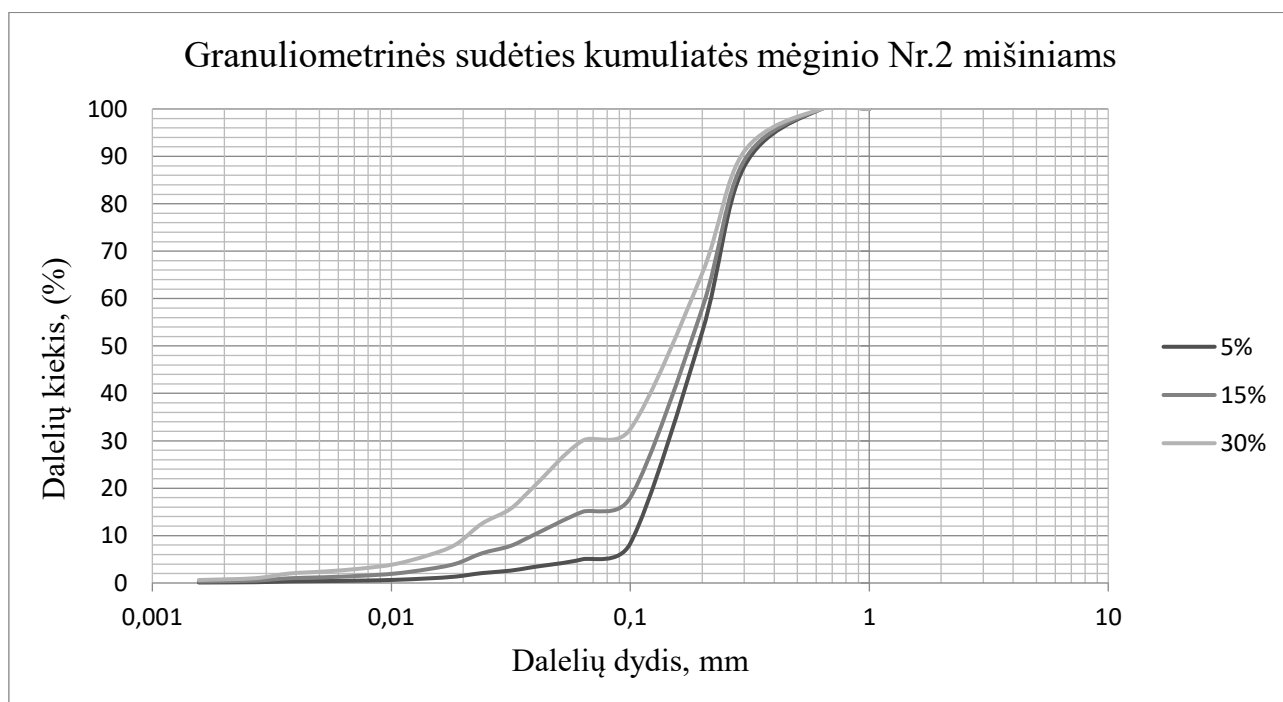
Naudojant kvarcinį smėlį ir anksčiau aprašytus smulkiosios frakcijos bandinius buvo pagaminti mišiniai. Iš viso buvo pagaminta 12 mišinių naudojant kiekvieną atskirtą smulkiąją frakciją, sudarant 5%; 15% ir 30% smulkiosios frakcijos mišinius.

Mišinių pagamintų su Nr.1 smulkiąją frakcija granulimetrinės sudėties kreivės pavaizduotos 16 paveiksle, su Nr.2 - 17 paveiksle, su Nr.3 - 18 paveiksle, su Nr.4 - 19 paveiksle.

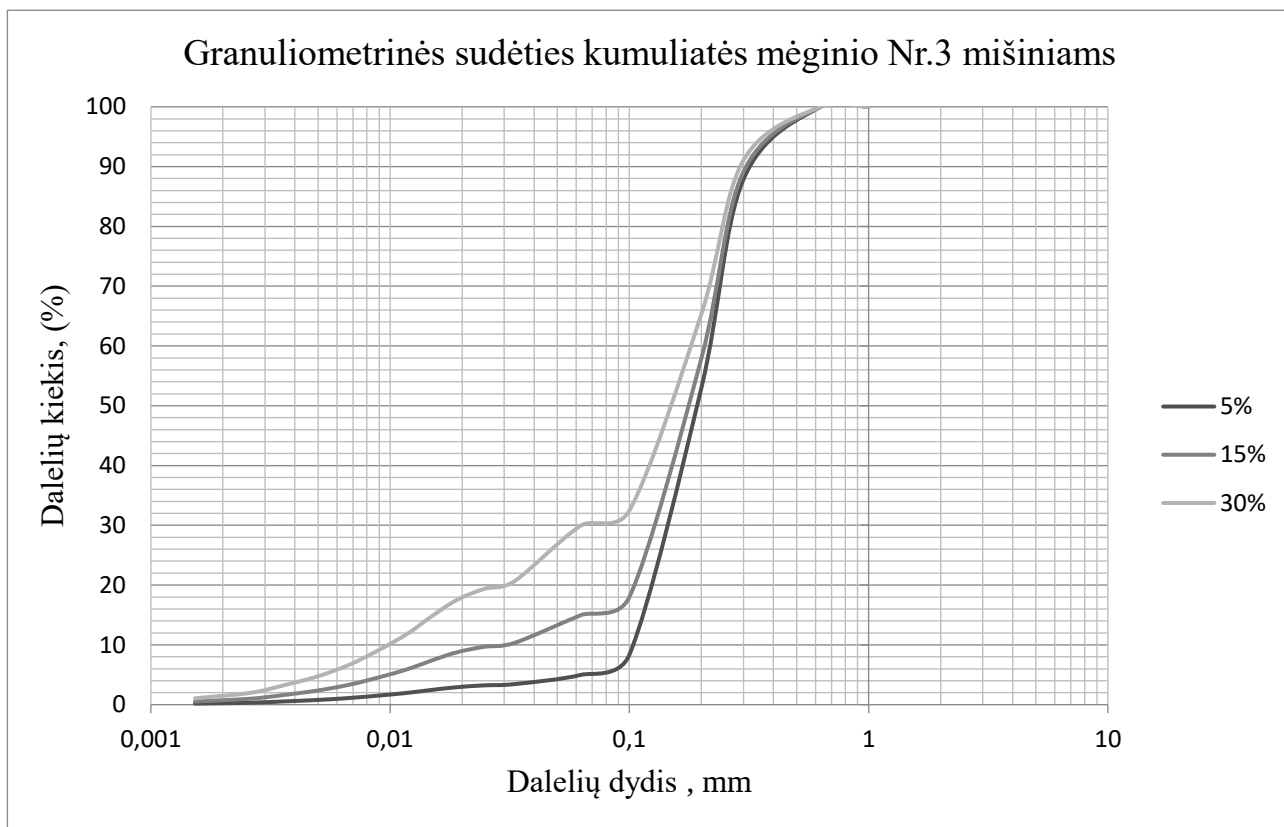
Apskaičiuoti dalelių skersmenys atkankantys 10% ir 50% grunto masės kreivėje, bei rūšiuotumo (C_U) ir sanklodos (C_C) koeficientų vertės pateiktos 3 lentelėje.



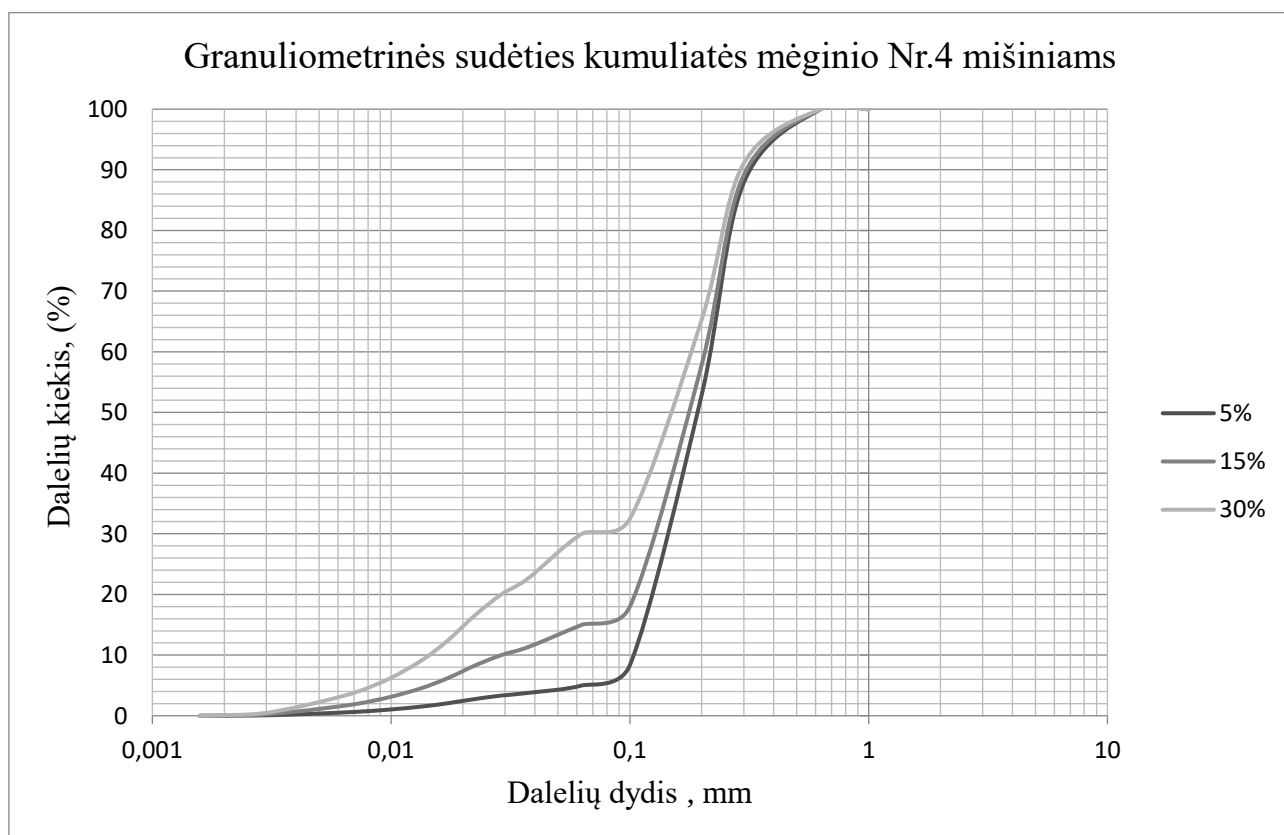
16 pav. Mėginio Nr.1 mišinių granulimetrinės sudėties kreivės.



17 pav. Mėginio Nr.2 mišinių granulimetrinės sudėties kreivės.



18 pav. Mėginio Nr.3 mišinių granulimetrinės sudėties kreivės.



19 pav. Mėginio Nr.4 mišinių granulimetrinės sudėties kreivės.

Lentelė 3. Mišiniuose nustatyti dalelių dydžio ir sanklodos rodikliai.

	d₁₀	d₅₀	C_u	C_c
Mišinys Nr.1 (5%)	0,104	0,195	2,0	1,1
Mišinys Nr.1 (15%)	0,040	0,180	5,1	2,2
Mišinys Nr.1 (30%)	0,018	0,155	10,1	1,2
Mišinys Nr.2 (5%)	0,105	0,195	2,0	1,1
Mišinys Nr.2 (15%)	0,038	0,180	5,4	2,3
Mišinys Nr.2 (30%)	0,021	0,155	8,8	1,0
Mišinys Nr.3 (5%)	0,105	0,195	2,0	1,1
Mišinys Nr.3 (15%)	0,030	0,180	6,8	3,0
Mišinys Nr.3 (30%)	0,010	0,155	18,5	2,1
Mišinys Nr.4 (5%)	0,105	0,195	2,0	1,1
Mišinys Nr.4 (15%)	0,030	0,180	6,9	3,0
Mišinys Nr.4 (30%)	0,015	0,155	18,5	1,4

Smulkiosiose frakcijose, atskirtose iš natūralių gruntų, yra pastebima molio frakcijos dalelių priemaiša, mišiniuose didžiausias molio frakcijos kiekis yra iki 1,5%, pagal masę. Mėginyje Nr. 4 nepastebima molio frakcijos priemaiša. Molio frakcijos kiekiai mišiniuose pavaizduoti 4 lentelėje.

4 lentelė. Molio frakcijos priemaiša mišiniuose.

Molio frakcijos kiekis mišiniuose, %			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1	0,25	0,75	1,49
2	0,13	0,39	0,78
3	0,24	0,73	1,46
4	0	0	0

2.3.2 Plastiškumo ir takumo ribų nustatymas

Norint įsitikinti, kad tiriamas gruntas yra mažo plastiškumo dulkis atliekami plastiškumo ir takumo ribų nustatymai. Takumo riba nustatoma naudojant krentančio kūgio metodą. Plastiškumo riba nustatoma naudojant kočiojimo metodą. Abu metodai taikomi remiantis LST EN ISO 17892-12:2018. Kontroliniai takumo ir plastiškumo ribų nustatymai atlikti atskirtai smulkiajai frakcijai ir mišiniams su 30% smulkiosios frakcijos. Atskirtos smulkiosios frakcijos mėginių takumo drėgnių vertės yra nuo 19,9% iki 22,13%. Mėginiai Nr.2 ir Nr.4 nepasižymi plastiškumu, o mėginiai Nr.1 ir Nr.3 pagal LST EN ISO 14688-2: 2018 priskiriami prie mažo plastiškumo dulkių. Pastebima, kad mažu plastiškumu pasižymi mėginiai su didesne molio frakcijos priemaiša (4 lentelė). Atskirtos smulkiosios frakcijos konsistencijų tyrimų rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Konsistencijos ribų nustatymo rezultatai smulkiajai frakcijai.

Mėginys	w _L , %	w _p , %	I _p , vnt.d.
Nr.1	19,90	16,03	0,039
Nr.2	21,93	-	-
Nr.3	20,34	16,51	0,038
Nr.4	22,13	-	-

Nustatytas 30% mišinių takumo drėgnis yra nuo 12,69% iki 15,33%. Visi mišiniai nepasižymi plastiškumu, todėl, pagal LST EN ISO 14688-2: 2018 reikalavimus priskiriami prie neplastikų gruntų. Bandymo rezultatų duomenys pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Konsistencijos ribų nustatymo rezultatai 30% mišiniams.

Mėginio Nr.	w _L , %	w _P , %
1	12,69	-
2	15,33	-
3	13,16	-
4	14,19	-

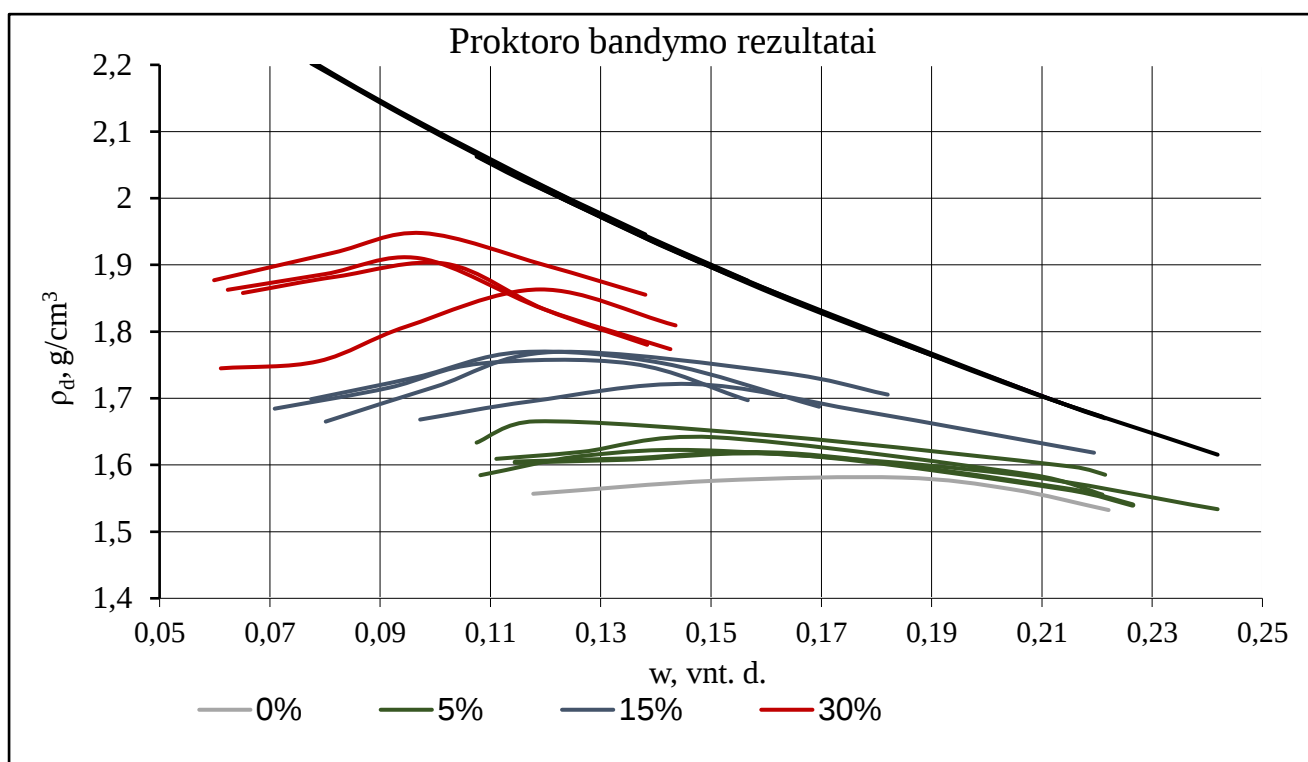
2.3.3 Proktoro bandymas

Proktoro bandymas naudojamas nustatyti optimalų drėgnį (w_{opt}) ir maksimalų sauso grunto tankį (ρ_d), jis atliekamas pagal LST 1360-2:2022 standartą.

Rupių gruntų tankumo būsenai įvertinti naudojamas tankumo rodiklis (I_D), jis parodo koks yra grunto tankumas lyginant su jo tankiausia ir puriausia būsena. I_D šiame darbe skaičiuojamas naudojant 4 formulę. Naudojantis proktoro bandymo metu gautu maksimaliu sauso grunto tankiu, bus apskaičiuojamas maksimalus poringumo koeficientas (e_{max}).

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100\% \quad (3)$$

Su kiekvienu mišiniu ir kvarciniu smėliu atlikti proktoro bandymai. Proktoro kreivių rezultatai pateikti 20 pav. Iš rezultatų pastebima, kad didėjant smulkiosios frakcijos priemaišai, mažėja mėginių optimalusis drėgnis ir didėja sauso grunto tankis.



Nustatytas optimalusis drėgnis kvarciniam smėliui yra 18,5%, 5% smulkiosios frakcijos mišiniams varijuoja nuo 13,5% iki 15,8%, 15% mišiniams – nuo 12% iki 14,1% ir 30% mišiniams – nuo 9,4% iki 11,9%. Optimaliųjų drėgnių duomenys pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Nustatytos optimaliųjų drėgnių (w_{opt}) vertės mišiniuose.

Mėginys	Optimalus drėgnis w , %			
	5%	15%	30%	0%
Nr.1	15,8	12,1	9,9	18,5
Nr.2	14,5	14,1	9,4	
Nr.3	14,7	12	9,5	
Nr.4	13,5	12,2	11,9	

Sauso grunto tankis nustatytas kvarciniam smėliui yra $1,58 \text{ Mg/m}^3$, didėjant smulkiosios frakcijos priemaišai jo vertės auga. 5% mišiniuose vertės siekia nuo $1,62 \text{ Mg/m}^3$ iki $1,67 \text{ Mg/m}^3$, 15% mišiniuose – nuo $1,72 \text{ Mg/m}^3$ iki $1,77 \text{ Mg/m}^3$ ir 30% mišiniuose – nuo $1,87 \text{ Mg/cm}^3$ iki $1,95 \text{ Mg/m}^3$. Sauso grunto tankių duomenys pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Nustatyti sauso grunto tankiai mišiniuose.

Mėginys	Sauso grunto tankis ρ_d , Mg/m^3			
	5%	15%	30%	0%
Nr.1	1,62	1,76	1,9	1,58
Nr.2	1,62	1,72	1,91	
Nr.3	1,64	1,77	1,95	
Nr.4	1,67	1,77	1,87	

2.3.4 Piknometro bandymas

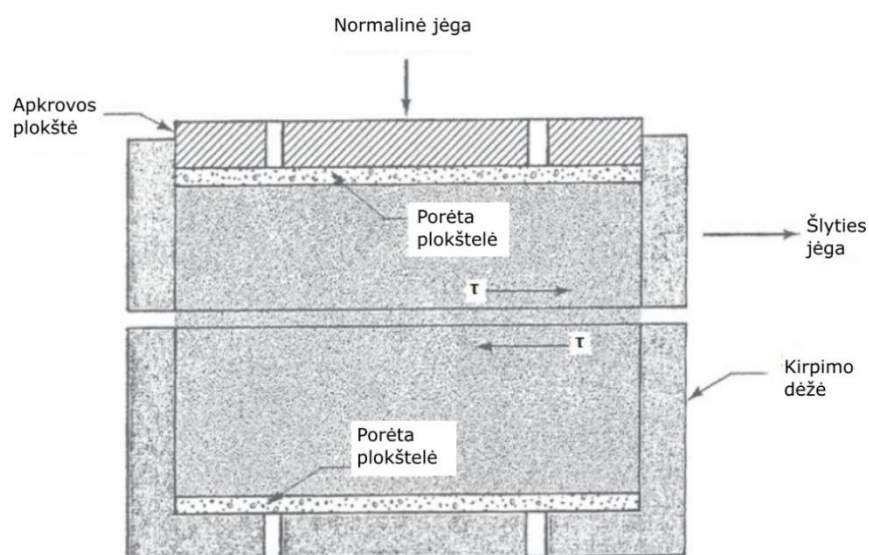
Piknometro bandymai atliekami kiekvienam mišiniui naudojantis LST EN ISO 17892-3:2016 standartu. Naudojant šį metodą, gaunama kiekvieno mišinio kietų dalelių tankio (ρ_s) vertė. Šios vertės bus naudojamos visuose kituose sekančiuose skaičiavimuose. Nustatyti mišinių kietų dalelių tankiai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Mišiniuose nustatytas kietų dalelių tankis.

Kietų dalelių tankis ρ_s , Mg/m^3			
Mišiniai	5%	15%	30%
Nr.1	2,653	2,658	2,665
Nr.2	2,651	2,654	2,658
Nr.3	2,652	2,655	2,661
Nr.4	2,650	2,650	2,650
Kvarcinis smėlis	2,65		

2.4 Tiesioginio kirpimo bandymas

Parametrus, reikiamus įvertinti gruntų stiprumus, galima gauti atliekant kirpimo bandymus. Vienas iš populiariausių metodų, kuris bus naudojamas ir šiame darbe yra tiesioginis kirpimo bandymas. Paprasčiausią bandymo įrangą sudaro metalinė kirpimo talpa, į kurią yra įdedamas gruntas. Ši talpa gali būti tiek kvadrato tiek žiedo formos. Šiame darbe naudoto kirpimo aparato talpa yra žiedo formos. Talpa per vidurį yra padalinta į dvi dalis. Normalinis įtempis (σ) yra sukeliamas uždedant apkrovą iš viršaus. Šlyties įtempis yra sukeliamas stumiant viršutinę talpos dalį horizontaliai apatinės dalies atžvilgiu, taip sukeliamas irimas tarp apatinės ir viršutinės talpos dalių. Bandymo metu yra matuojama šlyties jėga, horizontalus viršutinės talpos dalies poslinkis, bei vertikalus bandinio poslinkis. Paveiksle 21 pav. pavaizduota įrangos schema ir veikiančios jėgos.



21 pav. Tiesioginio kirpimo bandymo schema, pagal Das (2019).

Tiesioginio kirpimo aparatu buvo nustatomas kiekvieno bandinio kerpamasis stipris, horizontalus poslinkis, bei vertikalus poslinkis. Naudotas tiesioginio kirpimo aparatas pavaizduotas 22 pav.



22 pav. Tiesioginio kirpimo aparatas (Sušinskis, 2023).

Tarpas tarp žiedų.

LST EN ISO 17892-10:2019 standartas nurodo, kad tarpas tarp apatinio ir viršutinio žiedo kirpimo aparate smulkiems gruntams turėtų būti 0,5 mm, o rupiems ne didesnis nei 1,0 mm.

Šiame darbe tarpas tarp apatinio ir viršutinio žiedo buvo pasirinktas atsižvelgiant į mišiniuose esančių didžiausių dalelių dydį. Visi kirpimo bandymai atliekami esant 0,7mm tarpui tarp žiedų.

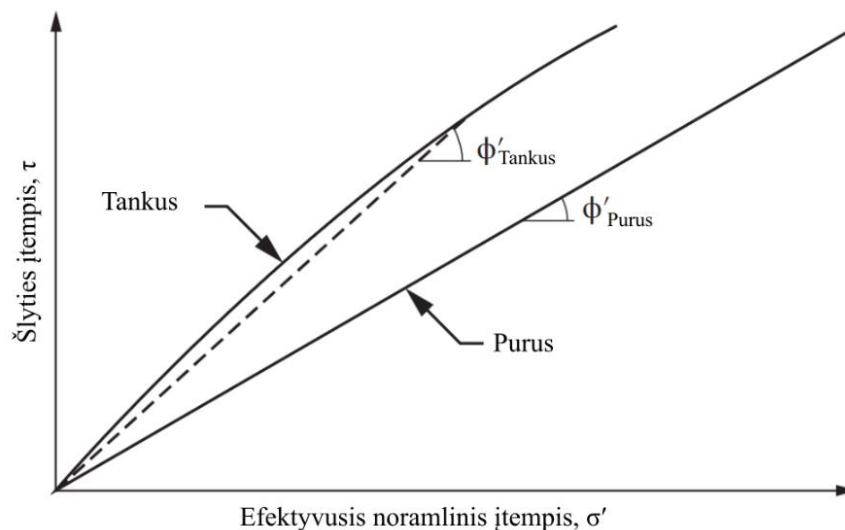
Kirpimo greitis

Pagal Bolton'ą (1979), grunto kirpimo greitis yra parenkamas atsižvelgiant į grunto laidumą vandeniui: smėliams – 1 mm/min, dulkiams – 0,01 mm/min, moliams – 0,001 mm/min.

Pasirinktas kirpimo greitis – 0,5 mm/min atsižvelgiant į mišinių granulimetrinę sandarą, kirpimo aparato technines galimybes ir laiko sąnaudas. Šiame darbe nebus dirbama su gruntais, kurie yra prisotinti vandeniu ar kuriuose dominuoja vien tik smulkioji frakcija, todėl pasirinktas kirpimo greitis pagal Duncan, Wright ir Brandon (2014) didelės įtakos neturės, kadangi porinis slėgis neturėtų susidaryti.

Apkrovos

Esant didesniems slėgiams, jėgos, veikiančios į dalelių kontaktus, yra didesnės. Kuo didesnės šios jėgos, tuo didesnė tikimybė, kad dalelės skils šlyties metu, vietoj to, kad slystu ar riedėtų. Dalelės skyla dėl to, kad tai reikalauja mažiau energijos ir keičiasi pats deformacijos mechanizmas didėjant slėgiui, pasipriešinimas šlyčiai nedidėja proporcingai ribiniam slėgiui. Dėl šių dalelių skilimų irimo gaubiančiosios yra išlenktos, tankūs gruntai pasižymi labiau išlenktomis irimo gaubiančiosiomis nei purus, kaip matoma 23 pav. (Duncan, Wright ir Brandon, 2014).

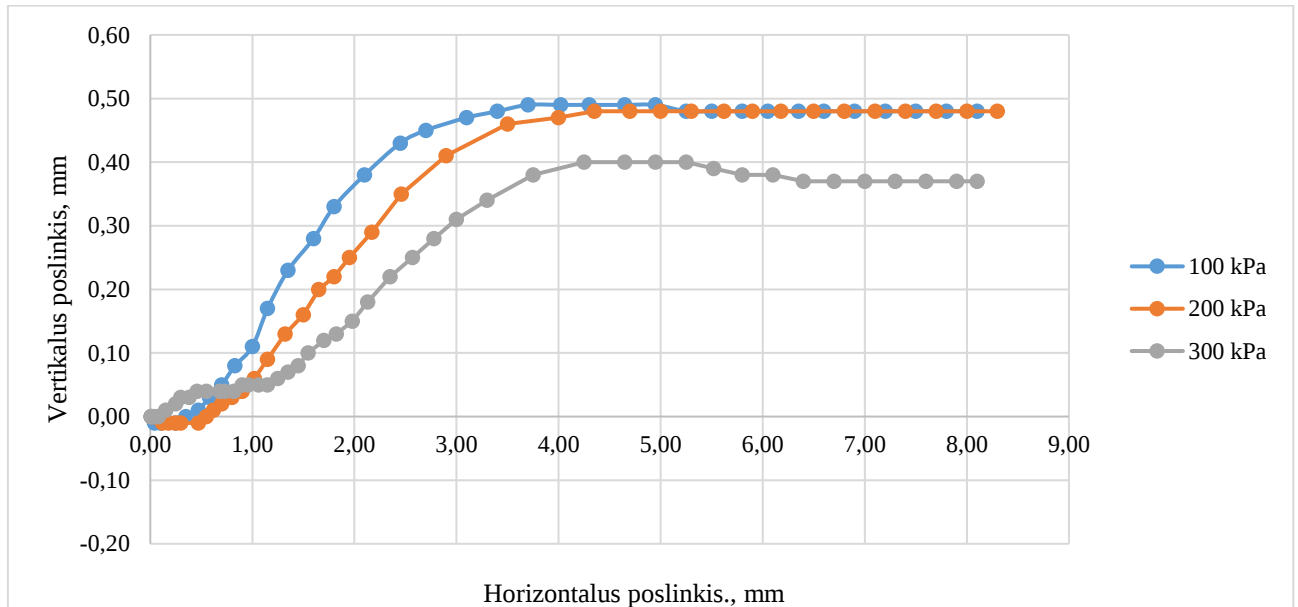


23 pav. Irimo gaubiančiosios išlenkimas realybėje, dėl skylančių dalelių, pagal Duncan ir kt. (2014).

Pasirinktos standartinės 100, 200, 300 kPa vertikalios apkrovos atsižvelgiant į kirpimo aparato galimybes ir tai, kad didesnės apkrovos išlenktų irimo gaubiančiąją, dėl grunto dalelių trupinimo kirpimo metu.

Vertikalus poslinkis

Išmatuotas vertikalus poslinkis vos tik uždėjus apkrovą, norint apskaičiuoti ir įvertinti fizinius parametrus kirpimo pradžioje, bei vertikalus poslinkis kirpimo metu, norint įvertinti kaip keičiasi bandinio tankis, poringumas ir mechaninė elgsena kirpimo metu. Naudojantis šiais duomenimis buvo braižomi poslinkio pokyčio grafikai. Šio grafiko pavyzdys pavaizduotas 24 pav.



24 pav. Vertikalaus ir horizontalaus poslinkio pavydinis grafikas.

Skaičiavimas

Šiame darbe vidinės trinties kampas (φ) apskaičiuojamas naudojant mažiausių kvadratų metodą. Vidinės trinties kampas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\tan\varphi = \frac{(n \sum_{i=1}^n \tau_{ui} \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_{ui} \sum_{i=1}^n \sigma_i)}{\Delta} \quad (4)$$

$$\Delta = n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma_i)^2 \quad (5)$$

kur φ – vidinės trinties kampas (laipsn.), n – bandymų kiekis, τ_{ui} – nustatytas šlyties įtempis (kPa), σ_i – normalinis įtempis (kPa).

Kitas skaičiavimo metodas - priimama sąlyga, kad sankiba yra lygi 0. Naudojant šį metodą yra braižoma krypties linija nuo 0;0 taško grafike per atitinkamus maksimalaus kerpamojo stiprio ir normalinio įtempio susikirtimo taškus. Šis metodas bus naudojamas apskaičiuoti krosnyje išdžiovinto grunto vidinės trinties kampo vertes, kadangi tokiuose gruntuose sankiba teoriškai susidaryti neturėtų.

Visi kiti skaičiavimai, reikalingi kirpimo duomenų analizei, vykdomi remiantis LST EN ISO 17892-10:2019 standartu.

3. REZULTATAI, TYRIMŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS

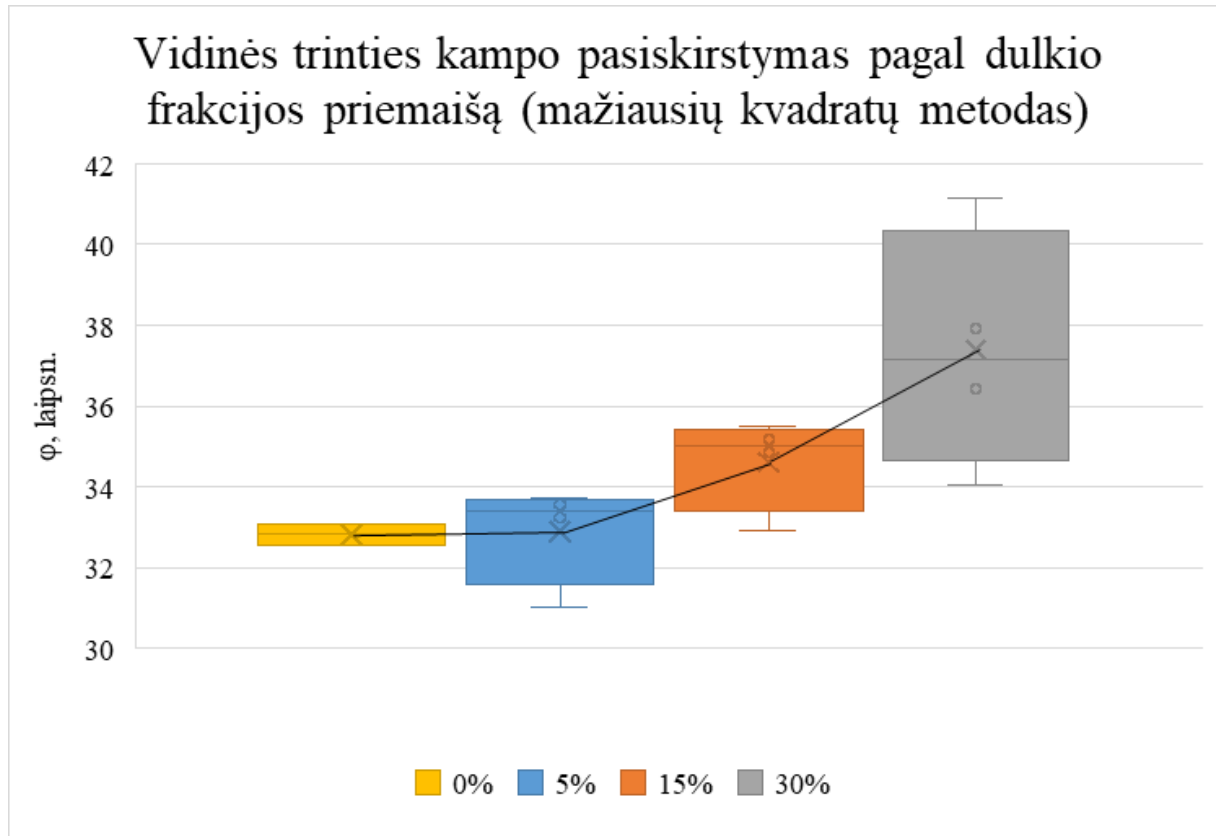
3.1 Purūs ($I_D = 0$), išdžiovinti mišiniai

3.1.1 Vidinės trinties kampas

Vidinės trinties kampo vertės apskaičiuotos naudojant mažiausių kvadratų metodą ir priimant sąlygą, kad $c = 0$. Mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotos vertės pateiktos 10 lentelėje. Pastebima, kad vidinės trinties kampas didėja katu su smulkiosios frakcijos priemaiša. Šie rezultatai grafiškai pavaizduoti 25 pav. Mažiausios reikšmės nustatytos 0% ir 5% mišiniuose jos vyrauja nuo 31° iki 34° , 15% mišiniuose fiksuojamos šiek tiek didesnės vertės – nuo 33° iki 36° ir didžiausiomis vertėmis pasižymi 30% mišiniai, jų vertės yra nuo 34° iki 41° . Šie rezultatai atitinka Prasad ir Pandey (2013), Thevanayagam ir Martin (2002), Lade ir Yamamuro (1997), bei Li et al. (2021) tyrimų išvadas.

10 lentelė. Vidinės trinties kampo vertės džiovintuose bandiniuose.

Vidinės trinties kampas ϕ , laipsniai			
Mėginys	5%	15%	30%
Kvarcinis smėlis	32,57 - 33,08		
1	33,57	34,86	36,42
2	33,73	32,91	37,92
3	31,04	35,18	41,15
4	33,24	35,49	34,06



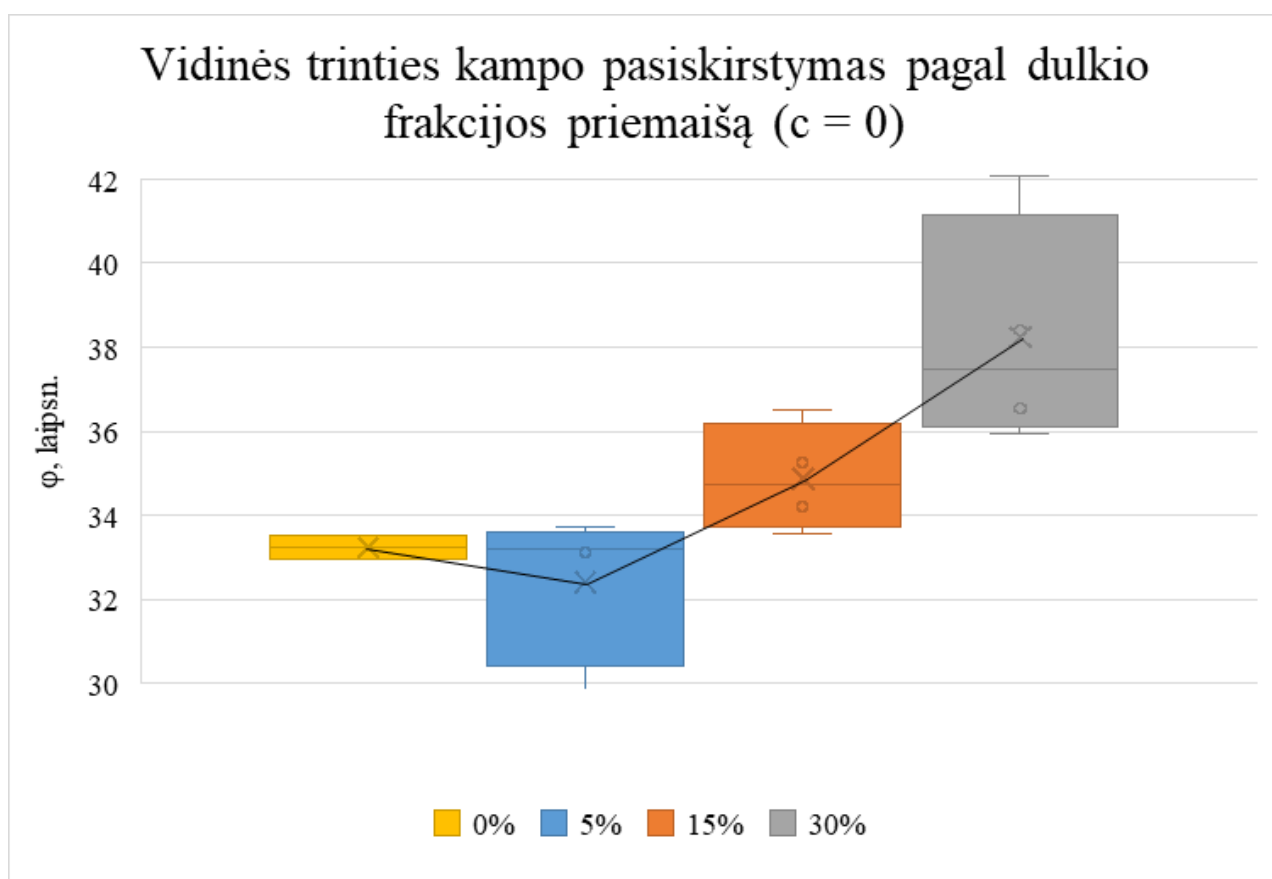
25 pav. vidinės trinties kampo ir dulquio kiekio pasiskirstymas.

Skaičiavimai atlikti priimant, kad $c = 0$ rodo tokią pat tendenciją. Šiuo atveju skaičiavimai su sąlyga $c = 0$ yra tikslesni, kadangi teoriškai sankiba išdžiovintame nerišliame grunte neturėtų susidaryti. Naudojantis mažiausių kvadratų metodu sankiba gali atsirasti dėl daugybės faktorių. Dažniausiai šie faktoriai yra žmogaus klaidos, grunto nehomogeniškumas ir įrangos netikslumas, kitaip sakant - metodikos netobulumas.

Vidinės trinties kampo reikšmės apskaičiuotos priimant sąlygą $c = 0$ pateiktos 11 lentelėje. Rezultatai grafiškai pavaizduoti 26 pav.

11 lentelė. Vidinės trinties kampai apskaičiuoti priimant, kad $c = 0$.

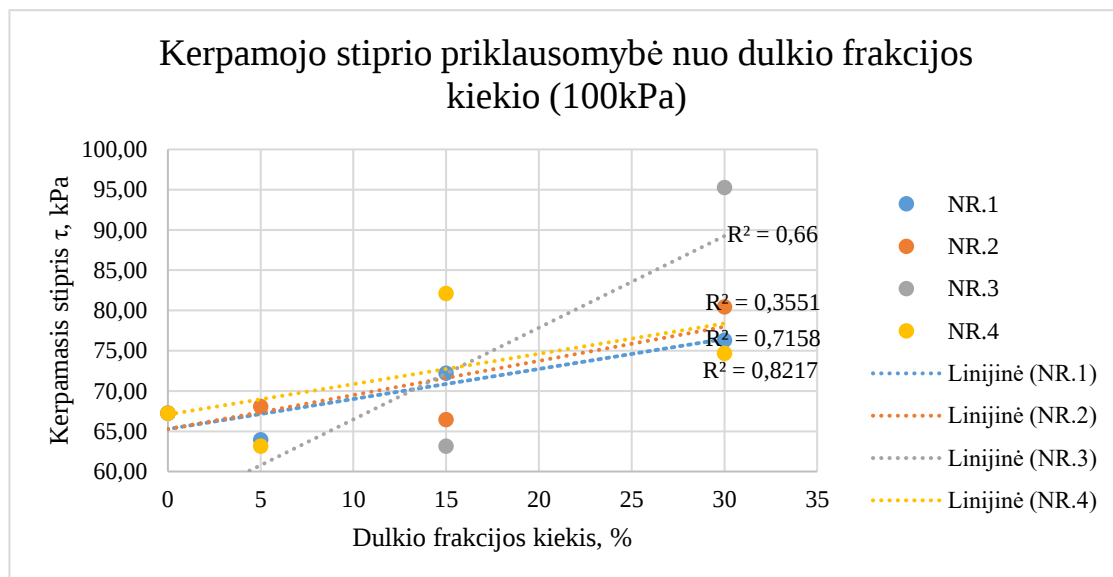
Vidinės trinties kampas ϕ , laipsniai ($c=0$)			
Mėginys	5%	15%	30%
Kvarcinis smėlis	32,97-33,51		
1	33,28	35,26	36,54
2	33,72	33,56	38,41
3	29,52	34,21	42,08
4	33,13	36,50	35,95



26 pav. vidinės trinties kampo ($c = 0$) ir smulkiosios frakcijos kiekio pasiskirstymas.

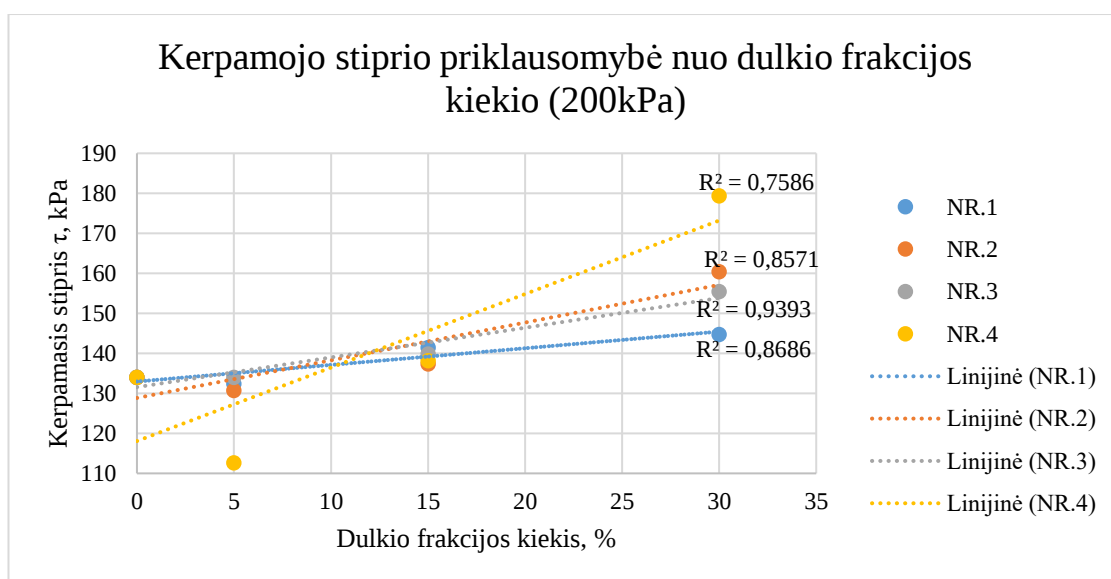
3.1.2 Kerpamieji stipriai

Analizuojant kerpamuosius stiprius taip pat pastebima tendencija didėti kerpamajam stipriui, didėjant smulkiosios frakcijos priemaišai. Dauguma atveju koreliacijos koeficientas rodo stiprų ryšį. ($R > 0,8$). Tik dviem atvejais ryšys yra vidutinis: Mėginio Nr.2 mišiniuose esant 100 kPa vertikalčiai apkrovai ir Mėginio Nr.3 mišiniams esant 300 kPa vertikalčiai apkrovai. Kerpamojo stiprio priklausomybės nuo smulkiosios frakcijos esant skirtingoms normalinėms apkrovoms vaizduojamos paveiksluose 27; 28 ir 29.



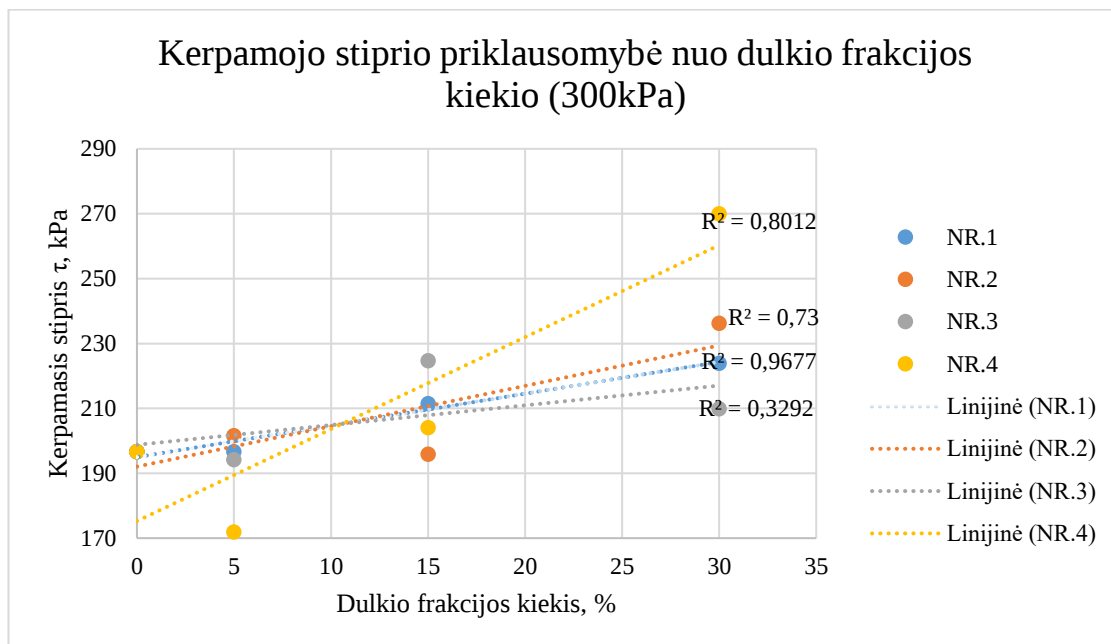
27 pav. kerpamojo stiprio priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos kiekio esant 100 kPa vertikalčiai apkrovai.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis esant 100 kPa apkrovai yra 67,26 kPa, 5% mišinių vidurkis – 61,69 kPa, 15% mišinių vidurkis – 70,97 kPa, 30% mišinių vidurkis – 81,69 kPa.



28 pav. kerpamojo stiprio priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos kiekio esant 200 kPa vertikalčiai apkrovai.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis esant 200 kPa apkrovai yra 130,74 kPa, 5% mišinių vidurkis – 127,44 kPa, 15% mišinių vidurkis – 139,19 kPa, 30% mišinių vidurkis – 160 kPa.



29 pav. kerpamojo stiprio priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos kiekio esant 300 kPa vertikaliai apkrovai.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis esant 200 kPa apkrovai yra 196,28 kPa, 5% mišinių vidurkis – 191,13 kPa, 15% mišinių vidurkis – 209,06 kPa, 30% mišinių vidurkis – 235,03 kPa.

Apskaičiuotas kiekvienos dulgio kiekio grupės variacijos koeficientas esant skirtingoms vertikaloms apkrovoms yra nuo 0,013 iki 0,12. Didžiausiais variacijos koeficientais ir standartiniais nuokrypiais pasižymi mišiniai su 30% dulgio kiekiu.

3.1.3 Tankis

Pirmiausiai buvo matuojamas laisvai į žiedą supilamos medžiagos tankis. Tankių duomenys pateikiami 12 lentelėje, o statistiniai duomenys 13 lentelėje. Pastebima, kad statistiniai kriterijai rodo nedidelę imties variaciją ($COV = 0,018$).

12 lentelė. Laisvai į žiedą supiltos medžiagos tankis.

Tankis ρ , Mg/m ³ (išmatuotas kirpimo žiede)			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1 (100kPa)	1,47	1,44	1,44
2 (100kPa)	1,47	1,46	1,45
3 (100kPa)	1,46	1,48	1,41
4 (100kPa)	1,51	1,49	1,40
kvarcinis smėlis (100kPa)	1,45		
1 (200kPa)	1,48	1,45	1,45
2 (200kPa)	1,45	1,48	1,45
3 (200kPa)	1,46	1,47	1,41
4 (200kPa)	1,50	1,48	1,40
kvarcinis smėlis (200kPa)	1,43 - 1,47		
1 (300kPa)	1,44	1,44	1,44
2 (300kPa)	1,47	1,46	1,44
3 (300kPa)	1,46	1,46	1,42
4 (300kPa)	1,50	1,47	1,40
kvarcinis smėlis (300kPa)	1,45 - 1,46		

Lentelė 13. Laisvai į žiedą supiltos medžiagos tankio statistiniai duomenys

Tankis (išmatuotas kirpimo žiede)	
Vidurkis, Mg/m³	1,454
Dispersija	0,001
Standartinis nuokrypis	0,026
Variacijos koeficientas	0,018
Moda	1,441

Prieš pradėdant kirpimą buvo pamatuojamas vertikalus nuosėdis, kuris susidaro iš karto nuleidus vertikalią apkrovą ant bandinio, pagal nuolydžio duomenis buvo perskaičiuojamas žiede esančio grunto tankis. Gauti rezultatai pateikti 14 lentelėje, o statistiniai rodikliai 15 lentelėje.

Pastebima, kad kuo didesnis dulkių frakcijos kiekis bandiniuose, tuo jis labiau linkęs susispausti, tai lemia didesnę jo tankį. Kvarcinio smėlio tankis uždėjus apkrovą nuo išmatuoto žiede pasikeitė nuo 1,45 Mg/m³ iki 1,53 Mg/m³; 5% procentų mišinio – nuo 1,45 Mg/m³ iki 1,58 Mg/m³; 15% procentų mišinio – nuo 1,45 Mg/m³ iki 1,66 Mg/m³ ir didžiausiu tankio pokyčiu pasižymi mišiniai su 30 % smulkiosios frakcijos – tankis padidėjo nuo 1,45 Mg/m³ iki 1,79 Mg/m³. Pastebima, kad tankio variacijos koeficientas skirtingo smulkiosios frakcijos kiekio mišiniuose nėra didelis, COV kinta nuo 0,017 iki 0,024.

14 lentelė. Medžiagos tankis uždėjus vertikalią apkrovą.

Tankis ρ, Mg/m³ (uždėjus apkrovą)			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1 (100kPa)	1,58	1,66	1,78
2 (100kPa)	1,57	1,66	1,79
3 (100kPa)	1,54	1,62	1,75
4 (100kPa)	1,58	1,71	1,86
kvarcinis smėlis (100kPa)	1,49 - 1,59		
1 (200kPa)	1,59	1,67	1,79
2 (200kPa)	1,56	1,64	1,79
3 (200kPa)	1,53	1,64	1,75
4 (200kPa)	1,61	1,70	1,87
kvarcinis smėlis (200kPa)	1,51		
1 (300kPa)	1,63	1,66	1,78
2 (300kPa)	1,58	1,63	1,79
3 (300kPa)	1,55	1,66	1,76
4 (300kPa)	1,62	1,69	1,81
kvarcinis smėlis (300kPa)	1,51 - 1,57		

15 lentelė. Medžiagos tankio uždėjus vertikalią apkrovą statistiniai duomenys.

Tankis (uždėjus apkrovą)				
	0%	5%	15%	30%
Vidurkis, Mg/m³	1,530	1,58	1,66	1,79
Dispersija	0,001	0,001	0,001	0,002
Standartinis nuokrypis	0,037	0,030	0,028	0,040
Variacijos koeficientas	0,024	0,019	0,017	0,022

Panaši tendencija pastebima ir analizuojant tankio pokytį, kuris apskaičiuotas naudojant kirpimo pabaigoje išmatuotą vertikalų nuosėdį. Kirpimo pabaigoje apskaičiuotų tankių duomenys pateikti 16 lentelėje, o statistiniai duomenys 17 lentelėje. Vidutiniškai 5% mišinyje tankis kirpimo metu padidėjo per 0,61%; 15% mišinyje – 1,85%; 30% mišinyje – 3,24%.

16 lentelė. Bandinio tankis kirpimo pabaigoje.

Tankis ρ , Mg/m ³ (kirpimo pabaigoje)			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1 (100kPa)	1,59	1,68	1,84
2 (100kPa)	1,58	1,68	1,87
3 (100kPa)	1,55	1,65	1,81
4 (100kPa)	1,60	1,74	1,87
kvarcinis smėlis (100kPa)	1,69		
1 (200kPa)	1,60	1,69	1,85
2 (200kPa)	1,58	1,68	1,85
3 (200kPa)	1,55	1,67	1,81
4 (200kPa)	1,62	1,73	1,93
kvarcinis smėlis (200kPa)	1,66 - 1,68		
1 (300kPa)	1,63	1,70	1,84
2 (300kPa)	1,59	1,67	1,85
3 (300kPa)	1,56	1,69	1,81
4 (300kPa)	1,63	1,72	1,86
kvarcinis smėlis (300kPa)	1,64 - 1,65		

17 lentelė. Bandinio tankio kirpimo pabaigoje statistiniai duomenys

Tankis (kirpimo pabaigoje)				
	0%	5%	15%	30%
Vidurkis, Mg/m³	1,670	1,59	1,69	1,85
Dispersija	0,000	0,001	0,001	0,001
Standartinis nuokrypis	0,020	0,029	0,027	0,032
Variacijos koeficientas	0,012	0,018	0,016	0,017

Taigi, kaip matoma iš aukščiau pateiktų duomenų , mišiniai su didesniu dulkių kiekiu pasižymi didesnėmis tankio vertėmis, kas lemia didesnes vidinės trinties kampo vertes.

3.1.4 Drėgnis

Kirpimai buvo atliekami medžiaga išdžiovinus krosnyje 24h, 105 laipsnių temperatūroje. Išėmus medžiagą iš krosnies ji sugėrė nedidelį kiekį patalpoje esančios drėgmės. Drėgnio reikšmės vyrauja nuo 0,01% iki 0,14%, vidutinė vertė yra 0,06%, standartinis nuokrypis 0,039. Šiek tiek didesnėmis vertėmis pasižymi mišiniai su didesniu smulkiosios frakcijos kiekiu. 5% mišiniuose vidutinė vertė yra 0,04%, 15% mišiniuose – 0,07% ir 30% mišiniuose – 0,09%

Galima teigti, kad toks drėgmės kiekis bandymo rezultatams įtakos neturi, remiantis Bouri ir kt. (2020) atliktu tyrimu.

3.2 Tankūs ($I_D = 1$), optimalaus drėgnio mišiniai

3.2.1 Vidinės trinties kampas

Vidinės trinties kampo vertės gautos optimalaus drėgnio ir maksimalaus sauso tankio ($I_D = 1$) mišiniuose pavaizduotos 30 paveiksle. Mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotos vertės pateiktos 18 lentelėje, o statistiniai duomenys 19 lentelėje. Grafike (18 pav.) pastebima, kad mažiausiomis vidinės trinties kampo vertėmis pasižymi kvarcinis smėlis be priemaišų. Visuose mišiniuose išskyrus Nr. 4 pastebima tendencija vidinės trinties kampui mažėti, kai didėja smulkiosios frakcijos kiekis. Plačiau apie šį išskirtinumą sekančiame poskyryje.

Vertinant kiekvienos grupės mišinių vidurkius pastebima, kad vidinės trinties kampo vertės didėja iki 15% dulquio kiekio mišinyje, vėliau sumažėja. Svarbu pabrėžti, kad skirtingai nei pirmiau minėta sąlyga, matomas akivaizdus vidinės trinties kampo verčių skirtumas tarp 0% ir 5% mišinių. Tipinės vidinės trinties kampo variacijos koeficiento vertės smėliuose yra nuo 0,05 iki 0,15 (Phoon ir kt., 1999). Šiame tyrime nustatytos variacijos koeficientų vertės neviršija 0,08, todėl rezultatai yra gana patikimi.

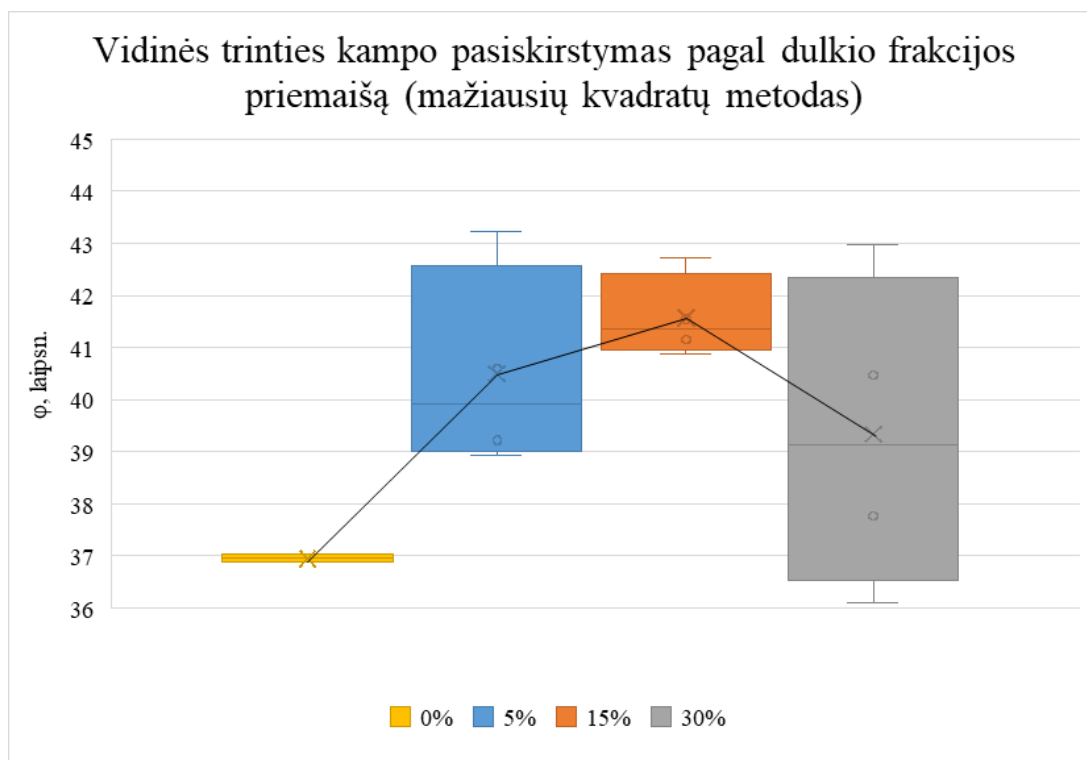
Li et al. (2021) tyrime pastebėta tendencija, kad optimalaus drėgnio sąlygomis didėjant dulquio priemaišai vidinės trinties kampo vertės didėja, tačiau tyrimas atliktas tik su mišiniais iki 20% dulquio priemaišos. Taigi norint detaliau įvertinti kur yra tendencijos lūžio taškas reikėtų atlikti tyrimus su tarpiniais priemaišų kiekiais. Šie rezultatai iš dalies prieštarauja Ziaie Moayed, Alibolandi ir Alizadeh (2016) analogiško tyrimo metu gautiems rezultatams, kuriuose visais atvejais pastebimas vidinės trinties kampo mažėjimas su dulquio kiekiu nuo 0% iki 30%.

18 lentelė. Vidinės trinties kampo vertės (mažiausių kvadratų metodas).

Vidinės trinties kampas ϕ , laipsniai			
Mėginys	5%	15%	30%
Kvarcinis smėlis	36,88 - 37,03		
1	38,94	40,88	40,47
2	43,22	41,55	36,11
3	39,22	41,15	37,77
4	40,61	42,72	42,97

19 lentelė. Vidinės trinties kampo verčių statistiniai duomenys.

Vidinės trinties kampas ϕ , laipsniai				
	0%	5%	15%	30%
Vidurkis	36,96	40,50	41,57	39,33
Dispersija	0,011	3,838	0,657	9,109
Standartinis nuokrypis	0,106	1,959	0,810	3,018
Variacijos koeficientas	0,003	0,048	0,019	0,077



30 pav. Vidinės trinties kampo verčių pasiskirstymas mišiniuose su skirtingais smulkiosios frakcijos kiekiais.

Beveik visuose kirpimuose su šia sąlyga irimo gaubiančioji nekerta koordinatų pradžios (0;0) taško. Mišiniai turi mažus kiekius molio dalelių, kurios pasižymi sankiba (iki 1,5%). Taigi mišiniuose išmatuojama sankibos vertė naudojant mažiausių kvadratų metodą yra tariamoji sankiba.

Šis fenomenas nesankabiuose gruntuose atsiranda, kai gruntai yra neprisotinti vandeniu ir tarp juos sudarančių dalelių veikia kapiliarinės jėgos. Šios jėgos traukia sudrėkintas grunto daleles viena prie kitos, taip sukurdamos silpna sankiba. Makroskopinėje skalėje šios kapiliarinės jėgos sukuria tariamąją sankibą (Ziaie Moayed ir kt., 2016).

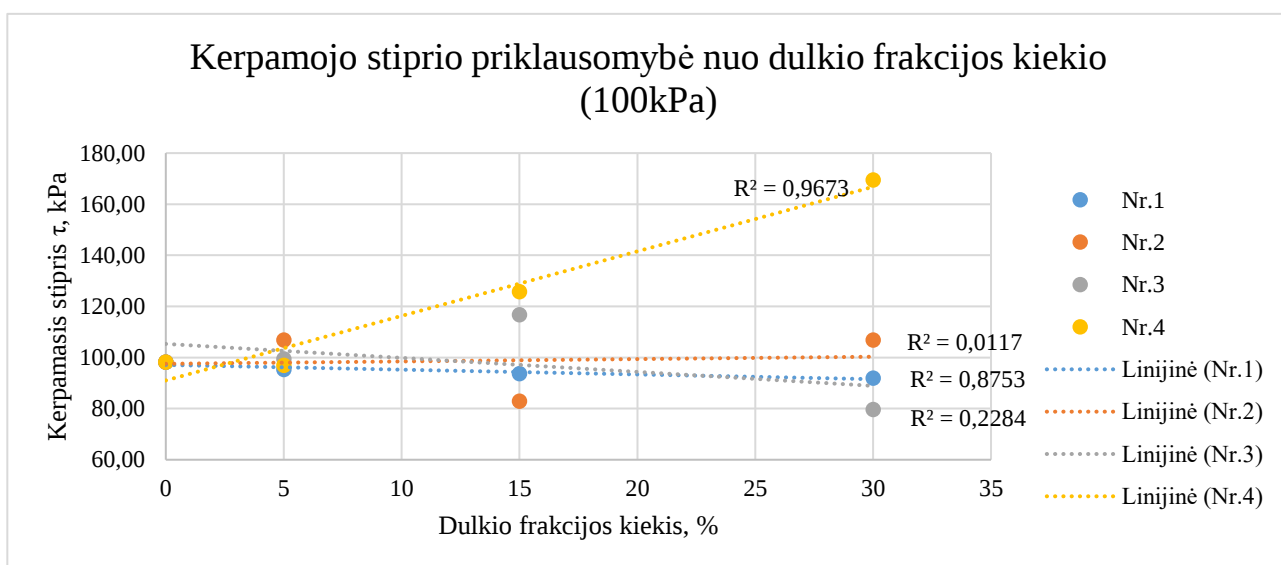
Dar vienas faktorius, lemiantis tariamosios sankibos atsiradimą, yra kirpimo talpos matmenys. Ziaie Moayed ir kt. (2016) pastebi, kad kirpimo talpos matmenys turi didelę įtaką tariamosios sankibos vertėms. Kuo mažesni kirpimo talpos matmenys, tuo didesnės tariamosios sankibos vertės. Kadangi šių autorių tyrimai taip pat buvo atlikti optimalaus drėgnio ir maksimalaus sauso tankio sąlygomis su skirtingo dulquio kiekio priemaišomis smėliuose, juos galima palyginti su esamu tyrimu. Ziaie Moayed ir kt. (2016) atliko tyrimus su 60 x 60 mm; 100 x 100 mm ir 300 x 300 mm kvadrato formos kirpimo talpomis ir pastebėjo, kad tariamoji sankiba mažėja nuo mažiausios iki didžiausios kirpimo dėžės. 0% mišiniuose sumažėjo nuo 19,79 kPa iki 0,46 kPa; 10% - nuo 23,29 kPa iki 0,02 kPa; 20% - nuo 21,04 kPa iki 0,03 kPa ir 30% mišiniuose nuo 7,31 kPa iki 0,05 kPa.

Šiame tyrime buvo naudotas 71,5 mm diametro žiedas, kuris kirpimo plokštumos plotu artimiausias 60 x 60 mm talpai ir nustatytos vidutinės tariamosios sankibos vertės 0% mišiniams – 26,86 kPa; 5% - 16,15 kPa; 15% - 16,03 kPa; 30% - 29,9 kPa. Taigi šiuo atveju tariamosios sankibos atsiradimą lemia ir kirpimo dėžės matmenys.

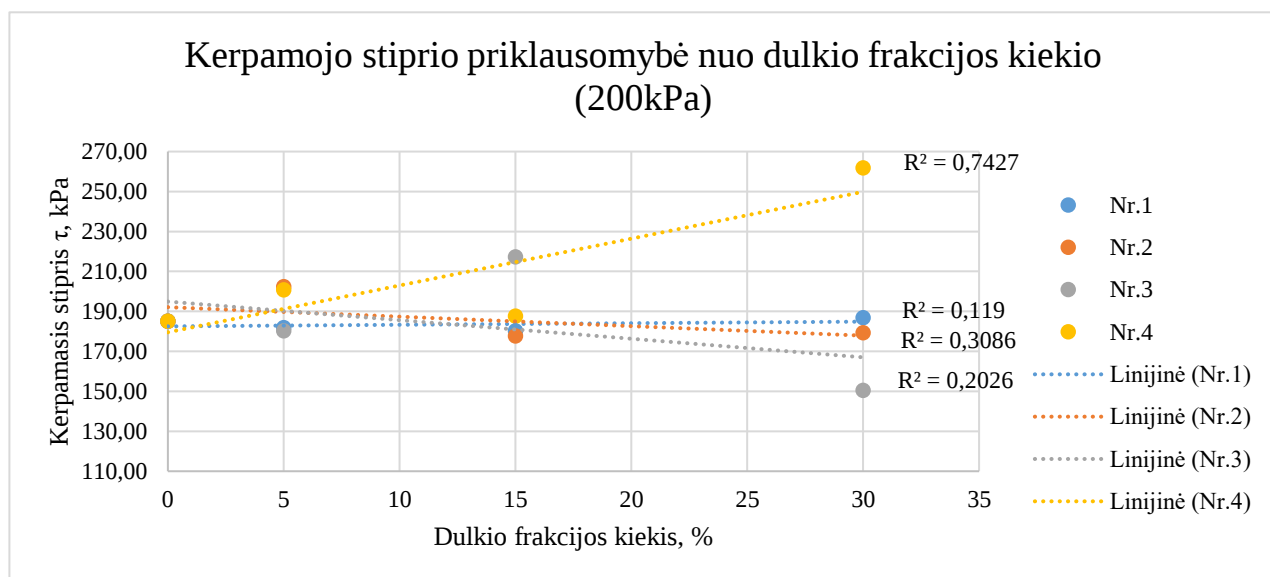
Dar vienas faktorius, lemiantis tariamosios sankibos atsiradimą, yra dalelių sukibimas, dėl jų paviršiaus formos. Kuo didesnis dalelės kampuotumas, tuo didesnė ir sukibimo galimybė, kas padidina tariamosios sankibos vertę (Lu ir Likos, 2013).

3.2.2 Kerpamieji stipriai

Analizuojant kerpamuosius stiprius pastebima, kad visuose mėginiuose, išskyrus Nr. 4 mišinius, maksimalus kerpamasis stipris, keičiantis smulkiosios frakcijos kiekiui mišinyje, nesikeičia arba nežymiai mažėja. Įvertinus koreliacijos koeficiento vertes visuose Nr. 4 dulgio mišiniuose pastebimas stiprus ryšys (R nuo 0,86 iki 0,99), kuris rodo tendenciją kerpamajam stipriui didėti kartu su dulgio kiekiu mišinyje. Natūralaus dulgio mišiniuose Nr.1, Nr.2 ir Nr.3 matoma, kad beveik visiais atvejais kerpamasis stipris nepriklauso nuo dulgio kiekio mišinyje, nustatomas silpnas arba keliais atvejais vidutinis ryšys (R reikšmės nuo 0,11 iki 0,56). Šiuo atveju išsiskiria Nr.1 (100kPa) mišiniai, kur $R = 0,94$ ir Nr.1 (300kPa) mišiniai, kur $R = 0,73$. Kadangi matomas toks tendencijų išsiskyrimas tolimesnėje analizėje bus vertinami tik mėginių Nr.1, Nr.2 ir Nr.3 statistiniai rodikliai. Maksimalių kerpamųjų stiprių grafikai esant skirtingoms vertikaliosioms apkrovoms pavaizduoti 31; 32 ir 33 paveiksluose.



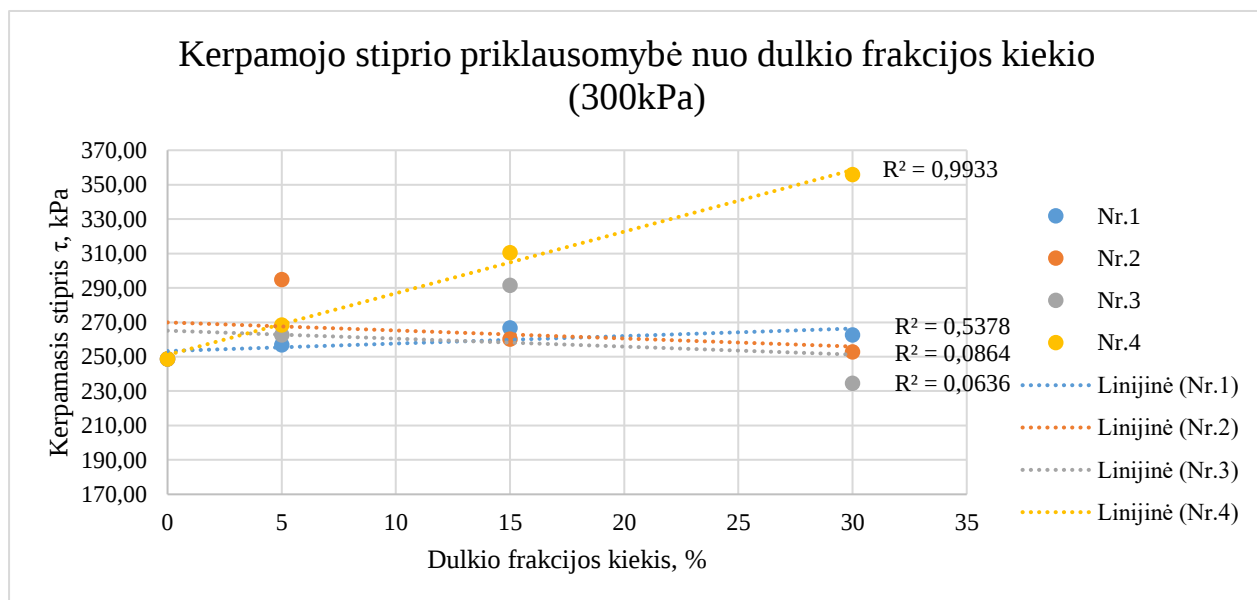
31 pav. Nustatytas maksimalus kerpamasis stipris mišiniuose esant 100 kPa normaliniai apkrovai.



32 pav. Nustatytas maksimalus kerpamasis stipris mišiniuose esant 200 kPa normaliniai apkrovai.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis, esant 100 kPa apkrovai, yra 98,17 kPa, 5% mišinių vidurkis – 100,51 kPa, 15% mišinių vidurkis – 97,76 kPa, 30% mišinių vidurkis – 92,82 kPa.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis, esant 200 kPa apkrovai, yra 185,15 kPa, 5% mišinių vidurkis – 188,17 kPa, 15% mišinių vidurkis – 191,74 kPa, 30% mišinių vidurkis – 172,23 kPa.



33 pav. Nustatytas maksimalus kerpamasis stipris mišiniuose esant 300 kPa normaliniai apkrovai.

Apskaičiuotas kvarcinio smėlio kerpamojo stiprio (τ) vidurkis, esant 300 kPa apkrovai, yra 248,63 kPa, 5% mišinių vidurkis – 271,44 kPa, 15% mišinių vidurkis – 272,81 kPa, 30% mišinių vidurkis – 250 kPa. Apskaičiuotas kiekvienos dulkių kiekio grupės variacijos koeficientas esant skirtingoms vertikalioms apkrovoms yra nuo 0,019 iki 0,177.

Kadangi visiems mėginiams atskirose grupėse buvo sudarytos sąlyginai vienodos tankio ir drėgnio sąlygos, mėginio Nr.4 mišinių tendenciją didėti kerpamajam stipriui didėjant šio mėginio dulkių kiekiui galima aiškinti tik pačios smulkiosios frakcijos fizinėmis savybėmis. Greičiausiai, todėl, kad buvo naudotas maltas dulkių frakcijos kvarcas, jo dalelės, palyginti su dulkių atskirtais iš natūralių gruntų, yra kur kas kampuotesnės ir mažiau sferiškos. Kaip ir buvo anksčiau minėta Shin ir Santamarina (2013) kampuotos dalelės grunte mažina tą gruntą sudarančių dalelių mobilumą, kas lemia didesnius kerpamuosius stiprius ir vidinės trinties kampo vertes. Taip pat kaip ir nustatė Lu ir Likos (2013) - kuo didesnis dalelės kampuotumas tuo didesnė ir sukibimo galimybė, kas padidina tariamosios sankibos vertę. Nr. 4 (30%) mišinyje nustatyta tariamosios sankibos vertė yra 76,05 kPa. Ši vertė yra apytikriai lygi skirtumui tarp apskaičiuotų natūralių dulkių kerpamųjų stiprių vidurkių ir nustatytų mišinio Nr. 4 (30%) kerpamųjų stiprių.

3.2.3 Tankis

Mėginiai, skirtingai nei pirma sąlyga, nepasižymėjo vertikaliu nuolydžiu uždedant apkrovą kirpimo aparate. Kvarcinio smėlio vidutinis tankis – 1,9 Mg/m³; 5% mišinių – 1,91 Mg/m³; 15% mišinių - 1,99 Mg/m³ ir 30% mišinių 2,12 Mg/m³. Variacijos koeficientas atskiroms mišinių grupėms

vyrauja nuo 0,005 iki 0,017. Detalesni rezultatai parodyti 20 lentelėje, o pagal juos apskaičiuoti statistiniai duomenys 21 lentelėje.

Kirpimo metu tankio pokyčiai vyko analogiškai 2 paveiksle vaizduojamam grafikui tankaus smėlio atvejais, kai kirpimo pradžioje tūris šiek tiek sumažėja ir vėliau didėja iki tam tikros vertės nuo kurios nebesikeičia. Šis tūrio padidėjimas lemia tankio sumažėjimą. Įvertinus vertikalios poslinkio duomenis kiekvienam mėginiui kirpimo metu, pagal vertes kirpimo pabaigoje buvo apskaičiuotas medžiagos tankis kirpimo pabaigoje ir tankio pokytis procentais nuo kirpimo pradžios iki pabaigos. Tankio pokyčiai fiksuojami nuo 0,18% iki 1,73%, vidurkis – 1%, COV – 0,38.

20 lentelė. Apskaičiuotos tankio vertės atskiruose mišiniuose.

Tankis ρ , Mg/m ³			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1 (100kPa)	1,89	1,99	2,10
2 (100kPa)	1,90	1,94	2,11
3 (100kPa)	1,95	2,01	2,16
4 (100kPa)	1,92	2,01	2,11
kvarcinis smėlis (100kPa)	1,89 - 1,90		
1 (200kPa)	1,88	1,99	2,10
2 (200kPa)	1,88	1,96	2,10
3 (200kPa)	1,96	2,01	2,15
4 (200kPa)	1,93	2,01	2,10
kvarcinis smėlis (200kPa)	1,89 - 1,90		
1 (300kPa)	1,87	1,98	2,11
2 (300kPa)	1,89	1,95	2,09
3 (300kPa)	1,95	2,01	2,15
4 (300kPa)	1,93	2,00	2,10
kvarcinis smėlis (300kPa)	1,90 - 1,91		

21 lentelė. Apskaičiuotų tankio verčių atskiruose mišiniuose statistiniai duomenys

Tankis				
	0%	5%	15%	30%
Vidurkis, Mg/m³	1,899	1,911	1,988	2,115
Dispersija	0,000	0,001	0,001	0,001
Standartinis nuokrypis	0,009	0,032	0,026	0,025
Variacijos koeficientas	0,005	0,017	0,013	0,012
MIN	1,889	1,865	1,938	2,090
MAX	1,911	1,956	2,011	2,163

3.2.4 Drėgnis

Atliekant bandymus buvo stengiamasi mėginius pagaminti su drėgmės kiekiu kuo artimesniu mišinio optimaliam drėgniui, kuris nustatytas anksčiau. Kaip ir minėta 3.2 skyriuje optimalusis drėgnis priklauso nuo smulkiosios frakcijos kiekio mišinyje. Buvo išskirtos mėginių grupės pagal smulkiosios frakcijos priemaišą. Drėgnių rezultatus, kurie buvo nustatomi iškart po kirpimo bandymo galima matyti 22 lentelėje, o statistinius duomenis 23 lentelėje.

22 lentelė. Drėgnis skirtinguose mišiniuose po tiesioginio kirpimo bandymo.

Drėgnis w, %			
Mėginio Nr.	5%	15%	30%
1 (100kPa)	13,89	12,22	9,86
2 (100kPa)	15,15	12,58	10,26
3 (100kPa)	15,57	10,90	10,64
4 (100kPa)	14,76	11,02	9,60
kvarcinis smėlis (100kPa)	16,46 - 16,7		
1 (200kPa)	14,50	12,04	9,86
2 (200kPa)	16,13	12,56	10,35
3 (200kPa)	15,60	11,73	10,38
4 (200kPa)	15,64	11,58	9,49
kvarcinis smėlis (200kPa)	18,17 - 18,53		
1 (300kPa)	14,85	12,13	9,93
2 (300kPa)	16,34	12,03	10,53
3 (300kPa)	15,90	12,29	9,69
4 (300kPa)	15,88	13,22	10,36
kvarcinis smėlis (300kPa)	18,85 - 19,6		

Variacijos koeficientų vertės skirtingose dulkių kiekio grupėse yra mažos (COV nuo 0,04 iki 0,07).

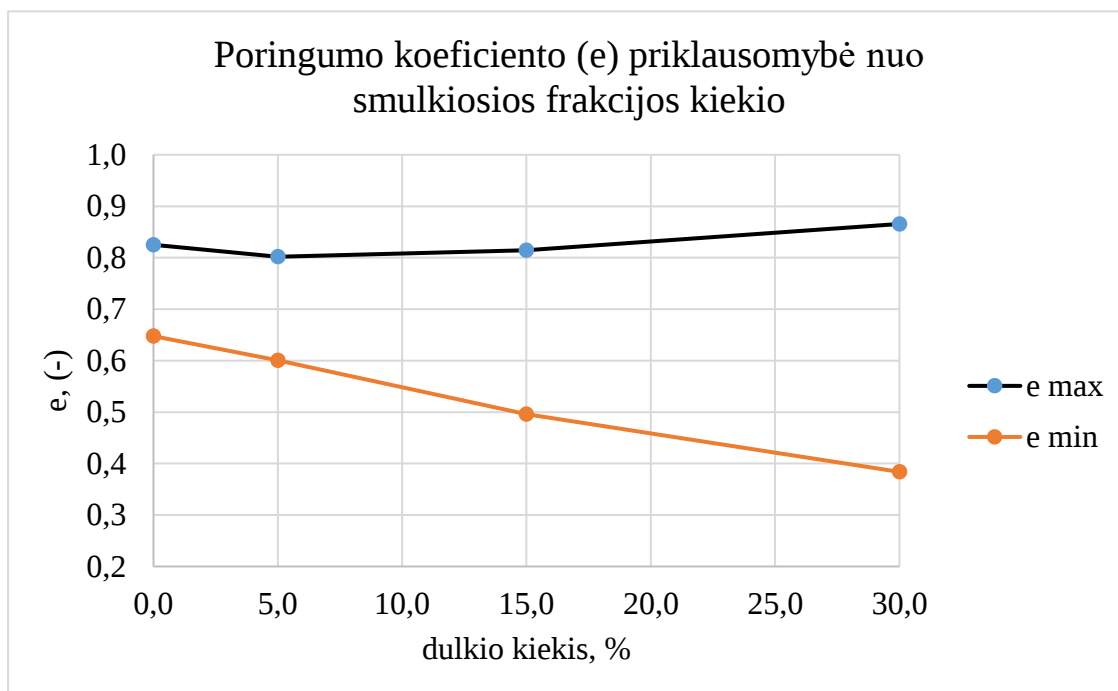
23 lentelė. Drėgnio skirtinguose mišiniuose po tiesioginio kirpimo bandymo statistiniai duomenys.

Drėgnis w, %				
	0%	5%	15%	30%
Vidurkis, Mg/m³	18,05	15,35	12,03	10,08
Dispersija	1,53	0,53	0,42	0,15
Standartinis nuokrypis	1,24	0,73	0,65	0,39
Variacijos koeficientas	0,07	0,05	0,05	0,04
MIN	16,46	13,89	10,90	9,49
MAX	19,60	16,34	13,22	10,64

3.3 Poringumas

Šio tyrimo metu apskaičiuotos maksimalaus ir minimalaus poringumo reikšmės pateiktos 34 paveiksle. Mažiausiu (vidutiniu) poringumu, $e_{\max}$ atveju, pasižymi mišiniai su 5% smulkiosios frakcijos. Vertinant minimalų poringumo koeficientą pastebima, kad yra tendencija jam mažėti, didėjant smulkiosios frakcijos kiekiui mišinyje. Panašus poringumo mažėjimas, didėjant smulkiosios frakcijos kiekiui pastebimas Bouri ir kt. (2020) bei Cubrinovski ir Ishihara (2002) atliktuose tyrimuose.

Mohammed ir kt. (2024) tyrimuose pastebėta kad egzistuoja lūžio taškas ties 20% dulgio frakcijos kiekio iki kurio tiek minimalus, tiek maksimalus poringumas mažėja ir nuo kurio vėliau pradeda didėti. Šiuo atveju lūžio taškas turėtų būti nuo 5% iki 15% dulgio frakcijos priemaišos.



34 pav. Maksimalaus ir minimalaus poringumo koeficiento (e) priklausomybė nuo smulkiosios frakcijos priemaišos.

IŠVADOS

1. Puriuose ($I_D=0$) ir sausuose mišiniuose pastebimas vidinės trinties kampo verčių didėjimas, didėjant ir dulquio kiekiui, vertės auga nuo 31° iki 41° . Dulquio dalelės užpildo poras tarp smėlio dalelių, tai lemia didesnę šių mišinių tankį. Tankesni mišiniai pasižymi didesniu kontaktinio paviršiaus plotu kirpimo plokštumoje ir tai galiausiai nulemia didesnes vidinės trinties kampo vertes. Gauti rezultatai iš dalies patvirtina Prasad ir Pandey (2013), Thevanayagam ir Martin (2002), Lade ir Yamamuro (1997), bei Li et al. (2021) tyrimų išvadas. Tyrimo metu taip pat buvo nustatyta, kad purūs sausi dulquio-smėlio mišiniai ($I_D=0$) tankėja. Kuo didesnis dulquio kiekis, tuo mišinys labiau tankėja. Vidutiniškai tankis padidėja 0,61 – 3,24% nuo pradinio būvio. Tankėjimas kirpimo metu turi įtakos vidinės trinties kampo vėrtėms.

2. Atlikus kerpamųjų stiprių analizę $I_D=0$, išdžiovintuose mišiniuose nustatyta, kad daugeliu atveju egzistuoja stiprus ryšys tarp kerpamojo stiprio verčių ir dulquio kiekio mišinyje. Nustatyta, kad kerpamojo stiprio vertės vidutiniškai padidėja 16,8% nuo 0% iki 30% dulquio kiekio mišinyje.

3. Optimalaus drėgno ir maksimalaus sauso tankio ($I_D=1$) mišiniuose pastebima tendencija vidinės trinties kampo vėrtėms augti nuo 0% (37°) iki 15% (42°) dulquio kiekio, o vėliau ties 30% (39°) sumažėti. Šiomis sąlygomis, vidinės trinties kampo sumažėjimą ties 30% lemia ribinis smulkiosios frakcijos kiekis mišinyje, dulquio dalelės įsiterpia tarp smėlio dalelių ir ant dalelių susidarančios vandens plėvelės mažina trintį. Šis rezultatas iš dalies atitinka Li ir kt. (2021) išvadas, kurios teigia, kad vidinės trinties kampas didėja iki 20% dulquio, bei prieštarauja Ziaie Moayed ir kt. (2016) tyrimų rezultatams, kurie rodo, kad šiomis sąlygomis vidinės trinties kampas tik mažėja nuo 0% iki 30% dulquio kiekio. Taip pat analizuojant duomenis su šia sąlyga pastebima, kad mažas dulquio kiekis (5%) turi reikšmingą įtaką vidinės trinties kampui, nuo 0% iki 5% dulquio kiekio mišinyje vidinės trinties kampas vidutiniškai padidėja 4° .

4. Kerpamųjų stiprių analizė prie $I_D=1$ ir w_{opt} parodė, kad mišiniuose su natūraliu dulkiu stipris nepriklauso nuo dulquio frakcijos kiekio. Tuo tarpu mišiniuose su dulkiu iš malto kvarco, stebimas kerpamojo stiprio didėjimas, didėjant dulquio kiekiui. Tai lemia tariamoji sankiba, susidariusi galimai dėl dalelių morfologijos, kuri darbe detaliau netyrinėta.

5. Nors tyrimas pateikia vertingų įžvalgų, jam būdingi ir trūkumai, tokie kaip: palyginti mažas bandymų kiekis, nėra vertinama mišinius sudarančių dalelių morfologija, nėra vertinama dulquio frakcijos mineraloginė sudėtis ir susidarančių kapiliarinių jėgų poveikis. Ateities tyrimai galėtų nagrinėti mišinius su mažesniais dulquio kiekio intervalais, taip nustatydami detalesnius tendencijų lūžio taškus, bei vertinti mišinius sudarančių dalelių formos ir mineraloginės sudėties įtaką rezultatams, bei remiantis Ziaie Moayed ir kt. (2016) gautomis išvadomis, atlikti bandymus su didesnėmis kirpimo talpomis taip sumažinant tariamosios sankibos poveikį.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

- Bolton M. D. (1979). *A Guide to Soil Mechanics*. London: Macmillan Press. 439 p.
- Bouckovalas, G.D., Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., 2003. *A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands*. Soil Dynam. Earthquake Eng. 23 (2), 115–125
- Bouri, D., Krim, A., Brahim, A., Arab, A. (2020). *Shear strength of compacted Chlef sand: effect of water content, fines content and others parameters*. Studia Geotechnica et Mechanica, 42(1) 18-35. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0027>
- Coulomb, C. A. (1776). *essai sur une application des regles de maximums et minimis á quelques problèmes de statique, relatifs á l'architecture*. memoires de mathematique et de physique, présentés, á l'academie royale des sciences, paris, vol. 3, 38.
- Cubrinovski, Misko & Ishihara, Kenji. (2002). *Maximum and Minimum Void Ratio Characteristics of Sands*. Soils and foundations. 42. 65-78. 10.3208/sandf.42.6_65.
- Das, B.M. (2019). *Advanced Soil Mechanics, Fifth Edition (5th ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351215183>
- Duncan, J., Wright, S. And Brandon, T. (2014) *Soil Strength and Slope Stability. 2nd Edition*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.
- Hazirbaba, K. (2005). *Pore pressure generation characteristics of sands and silty sands: a strain approach*.
- Karim, Mohammad Emdadul; Alam, Md. Jahangir (2017). *Effect of nonplastic silt content on undrained shear strength of sand–silt mixtures*. International Journal of Geo-Engineering, 8(1), 14–. Doi:10.1186/s40703-017-0051-1
- Lade, Poul & Yamamuro, Jerry. (1997). *Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands*. Canadian Geotechnical Journal - can geotech j. 34. 918-928. 10.1139/cgj-34-6-918.
- Lee, J.-S., Guimaraes, M., & Santamarina, J. C. (2007). *Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(9), 1136–1143. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:9(1136)
- Li, Jinbu & Geng, Hao & Zhang, Guorong & Jin, Guangri. (2021). *Influence of silt content on shear strength of sandy soil*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 768. 012088. 10.1088/1755-1315/768/1/012088.
- LST 1360-2:2022 Gruntai, skirti kelių statybai. Bandymo metodai. 2 dalis. Bandymo metodai laboratoriniam atskaitos tankiui ir vandens kiekiui nustatyti. Proktoro tankinimas.
- LST EN ISO 17892-10:2019 Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 10 dalis. Tiesioginio kirpimo bandymai.
- LST EN ISO 17892-12:2018 Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 12 dalis. Takumo ribos drėgnio ir plastiškumo ribos drėgnio nustatymas.
- LST EN ISO 17892-3:2016 Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 3 dalis. Dalelių tankio nustatymas.
- LST EN ISO 17892-4:2017 Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 4 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas.
- Lu, Ning; Likos, William J. (2013). [American Society of Civil Engineers Fifth Biot Conference on Poromechanics - Vienna, Austria (July 10-12, 2013)] *Poromechanics V - Origin of Cohesion and Its Dependence on Saturation for Granular Media*. 1669–1675. doi:10.1061/9780784412992.197

Mohammed, Chemmam & Benali, Nougat & Abdelkader, Brahimi & Eddine, Bouri & Abdallah, Krim & Omar, Safer & Ahmed, Arab. (2024). *Laboratory investigation of the influence of fines content on the mechanical behavior of sand*. Studies in engineering and exact sciences. 5. E6543. 10.54021/seesv5n2-084.

Mohr, o. (1900). *welche umstände bedingen die elastizitätsgrenze und den bruch eines materiales?* Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure, vol. 44, 1524–1530, 1572-1577.

Mujtaba, H., & Farooq, K. (2014). *Effect of void ratio and gradation on shear strength parameters of granular soils*. Pakistan Journal of Science, 66(3), p. 242–251.

Murthy, T. G.; Loukidis, D.; Carraro, J. A. H.; Prezzi, M.; Salgado, R. (2007). *Undrained monotonic response of clean and silty sands*. Géotechnique, 57(3), 273–288. Doi:10.1680/geot.2007.57.3.273

Ni, Q., Tan, T.S., Dasari, G.R., Hight, D.W., 2004. *Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils*. Géotechnique 54 (9), 561–569

Norsyahariati, Nik & Hui, Kam & Juliana, Abd. (2016). *The Effect of Soil Particle Arrangement on Shear Strength Behavior of Silty Sand*. MATEC Web of Conferences. 47. 03022. 10.1051/mateconf/20164703022.

Pei-yong, Li & Chao, Gao. (2016). *Shear Strength of Unsaturated Sands*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 21(10). 3857-3864c.

Phoon, Kok-Kwang; Kulhawy, Fred H (1999). *Evaluation of geotechnical property variability*. Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 625–639. doi:10.1139/t99-039

Prasad, A., Pandey, B. (2013). *Effect of Fines on the Mechanical Behavior of Sand*. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol. 2, No. 2, pp. 40-47.

Rasti, Arezou & Ranjkesh Adarmanabadi, Hamid & Pineda, Maria & Reinikainen, Jesse. (2021). *Evaluating the Effect of Soil Particle Characterization on Internal Friction Angle*. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 14. 129-138. 10.3844/ajeassp.2021.129.138.

Salgado, Rodrigo & Bandini, Paola & Karim, Ahmed. (2000). *Shear Strength and Stiffness of Silty Sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG. 126. 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(451).

Sezer, Alper; Altun, Selim; Göktepe, Burak Ahmet . (2011). *Relationships between shape characteristics and shear strength of sands*. Soils and foundations, 51(5), 857–871. Doi:10.3208/sandf.51.857

Shin, H.; Santamarina, J. C. (2013). *Role of Particle Angularity on the Mechanical Behavior of Granular Mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(2), 353–355. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000768

Sladen, J.A., D'Hollander, R.D., Krahn, J., 1985. *The liquefaction of sands, a collapse surface approach*. Can. Geotech. J. 22 (4), 564–578

Sušinskis, R. (2023). *Rupių gruntų granulometrinės sudėties įtaka vidinės trinties kampo vertėms*. Bakalauro darbas, Vilniaus universitetas.

Thevanayagam, S. & Martin, Geoffrey. (2002). *Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 22. 1035-1042. 10.1016/S0267-7261(02)00128-8.

Thevanayagam, S., Shenthana, T., Mohan, S., Liang, J., 2002. *Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 128 (10), 849–859

Torrey, V. H. (1982). *Laboratory Shear Strength of Dilative Silts, Report prepared for the Lower Mississippi Valley Division, U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*.

Wang, Shuying; Luna, Ronaldo (2012). *Monotonic Behavior of Mississippi River Valley Silt in Triaxial Compression*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(4), 516–525. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000603

Zhou, Huiwen & Zhao, Peng & Du, Xueming. (2020). *Direct shear test and model prediction analysis of unsaturated silt*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 526. 012063. 10.1088/1755-1315/526/1/012063.

Ziaie Moayed, R., Alibolandi, M., & Alizadeh, A. (2016). *Specimen size effects on direct shear test of silty sands*. International Journal of Geotechnical Engineering, 1–8. doi:10.1080/19386362.2016.1205166

SANTRAUKA

VILNIAUS UNIVERSITETAS CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS

ROKAS SUŠINSKIS

Dulkio kiekio įtaka vidinės trinties kampo vertėms smėliuose

Šio darbo metu buvo tiriama dulkio frakcijos (iki 30%) kiekio įtaka vidinės trinties kampo vertėms smėliuose.

Buvo surinkti dulkio frakcijos mėginiai iš natūralių ir dirbtinių gruntų. Naudojant kvarcinį smėlį ir šiuos dulkio mėginius buvo paruošti 0%, 5%, 15% ir 30% mišiniai. Mišiniams atlikti granulimetrinės sudėties nustatymo, piknometro, proktoro ir takumo bei plastingumo ribų nustatymo bandymai. Vidinės trinties kampo vertėms nustatyti buvo naudojamas tiesioginio kirpimo metodas. Metodas atliktas gruntus paruošus dviem skirtingomis sąlygomis:

1. Puros būsenos ($I_D = 0$), krosnyje išdžiovinti gruntai;
2. Maksimalaus sauso grunto tankio ($I_D = 1$), optimalaus drėgnio (w_{opt}) gruntai.

Atlikus bandymus ir gautų duomenų analizę nustatyta, kad 1 sąlygos gruntai pasižymi tendencija vidinės trinties kampo vertėms didėti didėjant dulkio kiekiui smėlio mišinyje. Taip pat šia sąlyga tirti mišiniai pasižymi tendencija susispausti kirpimo metu. Tiriant 2 sąlygos mišinius nustatyta tendencija vidinės trinties kampui didėti iki 15% dulkio kiekio mišinyje, o vėliau mažėti. Taip pat pastebima, kad palyginti nedidelis kiekis dulkio (5%) turi didelę įtaką vidinės trinties kampo vertėms.

SUMMARY

VILNIUS UNIVERSITY FACULTY OF CHEMISTRY AND GEOSCIENCES

ROKAS SUŠINSKIS

Effect of silt content on angle of internal friction of sand-silt mixtures

The objective of this study was to investigate the influence of silt content on the angle of internal friction of sand-silt mixtures.

Silt fraction samples were collected from both natural and artificial soils, using quartz sand as a base and previously collected silt samples, mixture containing 0%, 5%, 15%, and 30% silt were prepared. These mixtures were tested for grain size distribution, pycnometer analysis, proctor compaction and liquid and plastic limit determination. To determine the internal friction angle values, direct shear tests were conducted. This method was applied to mixtures under two conditions:

1. Loose state ($I_D = 0$), oven dried soils.
2. Maximum dry density ($I_D = 1$), optimum moisture content (w_{opt}) soils.

Based on the tests and data analysis, it was found that soils under the first condition showed a tendency for the internal friction angle values to increase with a higher silt content in the sand. Mixtures tested under this condition also tended to compress during shearing. For mixtures under second condition, the internal friction angle tended to increase up to a 15% silt content, then decrease thereafter. It was also observed that even a relatively small amount of silt (5%) had a significant effect on the internal friction angle values.

PRIEDAI