

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Стеван Ђ. Ђорлука

**РЕЗИДУАЛНА ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА
НЕПРОДУКТИВНИХ СРЕДИНА СА ПК
ДРМНО**

докторска дисертација

Београд, 2025

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Stevan Đ. Ćorluka

**RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF
OVERBURDEN SEDIMENTS FROM THE
OPEN-PIT MINE DRMNO**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

Ментор:

др Драгослав Ракић, редовни професор

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд

Чланови комисије:

др Гордана Хаци-Никовић, редовни професор

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд

др Ирена Басарић Икодиновић, доцент

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд

др Ксенија Ђоковић, научни сарадник

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство
Институт за испитивање материјала - ИМС

Датум одбране: _____

Захвалница

Овом приликом желим да изразим своју дубоку захвалност свом ментору, професору др Драгославу Ракићу, на усмеравању како стручног, тако и научног рада, на подршци драгоценим саветима приликом дефинисања теме и константној сарадњи током целокупног процеса израде докторске дисертације.

Желим се такође захвалити преминулом професору др Ласлу Чакију, чија је идеја о теми мог доктората играла кључну улогу у развоју мог истраживачког рада. Његове смернице и методолошки приступи су обликовали мој начин размишљања и подстакли ме да постављам релевантна питања и да тражим дубља решења.

Велику захвалност дугујем члановима комисије: проф. др Гордани Хаџи - Никовић, др Ирени Басарић - Икодиновић и др Ксенији Ђоковић на корисним саветима, новим идејама, издвојеном времену и доприносу приликом прегледања докторске дисертације. Пружене сугестије су ми омогућиле да додатно унапредим своје истраживање, а ваше време и труд које сте уложили у ово су ми изузетно важни.

Посебну захвалност изражавам свом великом пријатељу др Николи Живановићу, за његову несебичну помоћ, драгоцену време које ми је посветио, за дељење свог знања и искуства, као и за неизмерну мотивацију током целог процеса израде докторске дисертације.

Захваљујем се колегама из Лабораторије за путеве и геотехнику Института ИМС који су преузели на себе део посла и тиме ми створили више простора за израду дисертације.

Захваљујем се Рударском институту на обезбеђеној неопходној опреми, без које истраживање за ову дисертацију не би било могуће.

Ова дисертација посвећена је мојој породици, која је била мој ослонац током целог мог академског пута. Хвала мојој драгој вереници Магдалени, чија безусловна подршка, љубав и разумевање су ме мотивисали да превазилазим све препреке и да се упустим у дубине истраживања. Њена вера у мене у тренуцима сумње била је светионик који ми је осветљавао пут.

РЕЗИДУАЛНА ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА НЕПРОДУКТИВНИХ СРЕДИНА СА ПК ДРМНО

Апстракт:

Ова докторска дисертација истражује резидуалну чврстоћу смицања непродуктивних (јаловинских) средина са површинског копа Дрмно, са циљем побољшања разумевања стабилности косина у површинским коповима. Испитивања су фокусирана на дефинисање резидуалних параметара чврстоће смицања (кохезија и угао унутрашњег трења) различитих типова тла (песак, алеврит, сива глина и песковита прашина) коришћењем два типа апарата: апарата за директно смицање и апарата за кружно смицање.

Експериментални део дисертације обухвата резултате лабораторијских испитивања физичких и механичких својстава тла, коришћењем Bromhead-овог апарата за кружно смицање и апарата за директно смицање са константном брзином деформације. Испитивања су извршена при константној брзини смицања од 0,02 mm/min и са различитим вертикалним оптерећењем (50, 100, 200 и 400 kPa). Поређење резултата добијених из ова два апарата, показује јасне разлике у вредностима резидуалних параметара, нарочито код глиновитих типова тла. На пример, код сиве глине, резидуални угао унутрашњег трења одређен апаратом за кружно смицање био је у просеку 1,7 - 2,3° нижи него код директног смицања, што указује на већу поузданост апарата за кружно смицање у дефинисању резидуалне чврстоће у оваквим условима. Слично, код алеврита су разлике биле мање изражене (1,2 - 1,9°). За песковите прашине разлика је била од 1,6 - 2,6° између резултата добијених ова два апарата. Овакве разлике указују на утицај величине хоризонталне деформације узорка на добијене вредности резидуалних параметара и наглашавају значај избора одговарајуће методе испитивања у зависности од типа тла.

У дисертацији су спроведене детаљне корелационе анализе између резидуалних углова унутрашњег трења и садржаја глиновитих ($R^2 = 0,758-0,898$) и песковитих ($R^2 = 0,979 - 0,993$) фракција, затим индекса пластичности ($R^2 = 0,767- 0,921$), граница течења ($R^2 = 0,816 - 0,823$) и комбинованог индекса *CALIP* ($R^2 = 0,798-933$). Резултати показују постојање јаких ($R^2 > 0,7$) корелација између ових параметара, што омогућава поуздану процену резидуалне чврстоће тла на основу индетификационо класификационих испитивања и индексних вредности.

Верификација добијених резултата је изведена поређењем са подацима из литературе и анализом стабилности косина на површинском копу Дрмно користећи Бишопову методу граничне равнотеже. Резултати анализе указују на задовољавајућу сагласност између фактора сигурности добијених коришћењем резидуалних параметара из апарата за директно и кружно смицање. Резултати овог истраживања доприносе бољем разумевању понашања различитих типова тла при великим деформацијама, пружајући смернице за прецизнију процену стабилности косина у инжењерској геотехници.

Кључне речи: Резидуална чврстоћа смицања тла, апарат за кружно смицање, апарат за директно смицање, угао унутрашњег трења, анализа стабилности косина

Научна област: Геолошко инжењерство

Ужа научна област: Инжењерска геологија, геомеханика и геотехничко инжењерство

УДК: 6312.431.2(043.3)
551.1/4

RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF OVERBURDEN SEDIMENTS FROM THE OPEN-PIT MINE DRMNO

Abstract:

This doctoral dissertation investigates the residual shear strength of overburden materials from the Drmno open-pit mine to enhance the understanding of slope stability in open-pit operations. The research focuses on defining residual shear strength parameters (cohesion and angle of internal friction) of various soil types (sand, alevrite, gray clay, and sandy silt) using two distinct apparatus: direct shear and ring shear devices.

The experimental component of the dissertation encompasses laboratory testing of soil physical and mechanical properties using a Bromhead ring shear apparatus and a constant-rate-of-strain direct shear device. Testing was conducted at a constant shear rate of 0.02 mm/min and various normal stresses (50, 100, 200, and 400 kPa). Comparison of results from both apparatus reveals distinct differences in residual parameter values, particularly for clayey soils. For instance, for gray clay, the residual angle of internal friction determined using the ring shear apparatus was, on average, 1.7 - 2.3° lower than that obtained using the direct shear apparatus, suggesting higher reliability of the ring shear apparatus in defining residual strength under these conditions. Similar, albeit less pronounced, differences (1.2 - 1.9°) were observed in alevrite, while sandy silts exhibited differences ranging from 1.6 - 2.6°. These discrepancies highlight the influence of sample horizontal deformation on residual parameter values and emphasize the importance of selecting appropriate testing methods based on soil type.

The dissertation further includes detailed correlation analyses between residual angles of internal friction and the content of clay ($R^2 = 0.758 - 0.898$) and sand ($R^2 = 0.979 - 0.993$) fractions, plasticity index ($R^2 = 0.767 - 0.921$), liquid limit ($R^2 = 0.816 - 0.823$), and the combined *CALIP* index ($R^2 = 0.798 - 0.933$). Results indicate strong ($R^2 > 0.7$) correlations among these parameters, enabling reliable estimation of residual soil strength based on index properties and classification testing.

Verification of the obtained results was achieved by comparing them with literature data and performing back-analysis of slope stability at the Drmno open-pit mine using Bishop's method of limit equilibrium. The analysis results indicate satisfactory agreement between the factors of safety obtained using residual parameters from the direct and ring shear apparatus. The results of this research contribute to a better understanding of the behavior of various soil types under large deformations, providing guidance for more precise slope stability assessment in geotechnical engineering.

Key words: Residual shear strength of soil, ring shear apparatus, direct shear apparatus, angle of internal friction, slope stability analysis

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Engineering geology, geomechanics and geotechnical engineering

UDK: 6312.431.2(043.3)
551.1/4

САДРЖАЈ

СПИСАК СЛИКА

СПИСАК ТАБЕЛА

1. УВОД	1
1.1. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	1
1.2. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ	3
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ	4
2.1. ОСНОВНИ ЛИТЕРАТУРНИ ПОДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ СМИЦАЊА	4
2.2. ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА ТЛА	15
2.2.1. Опште	15
2.2.2. Критеријуми за одређивање чврстоће на смицање	17
2.2.3. Механизми резидуалног смицања	20
3. АПАРАТИ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ ТЛА	22
3.1. АПАРАТ ЗА ДИРЕКТНО СМИЦАЊЕ	23
3.1.1. Историјски осврт на развој апарата за директно смицање	23
3.1.2. Апарат за директно смицање са константном брзином деформације	24
3.2. АПАРАТ ЗА КРУЖНО СМИЦАЊЕ	27
3.2.1. Историјски осврт на развој статичког апарата за кружно смицање	27
3.2.2. Bromhead-ов апарат за кружно смицање	28
3.3. ПОМОЋНА ОПРЕМА	30
4. ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКИ ПРИКАЗ ПОВРШИНСКОГ КОПА ДРМНО	31
4.1. ШИРА ГЕОЛОШКА ГРАЂА	31
4.2. ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКА ГРАЂА ПК ДРМНО	33
5. МЕТОДЕ И ПРОГРАМ ИСПИТИВАЊА	34
5.1. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА ТЛА	34
5.1.1. Идентификационо-класификациони опити	34
5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ ТЛА	36
5.2.1. Фазе испитивања у апарату за кружно смицање	36
5.2.2. Апарат за директно смицање	38
5.2.3. Резидуално смицање	39
5.3. МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ СТАБИЛНОСТИ КОСИНА	41
5.3.1. Опште	41
5.3.2. Опште о методама граничне равнотеже	41
5.4. МЕТОДЕ СТАТИСТИЧКЕ ОБРАДЕ	43
5.4.1. Комбиновани индексни параметар <i>CALIP</i>	44
6. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА	46
6.1. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА ТЛА	46

6.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	49
6.2.1. Приказ резултата испитивања прерађених (поремећених) узорака.....	50
6.2.2. Приказ резултата испитивања непоремећених узорака	79
7. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЛАБОРАТОРИЈСКИХ ИСПИТИВАЊА	84
7.1. АНАЛИЗА РЕЗИДУАЛНИХ МЕХАНИЗАМА КЛИЗАЊА	84
7.1.1. Котрљање.....	84
7.1.2. Уређење чврстих честица дуж равни смицања	85
7.1.3. Прелазно стање између котрљања и уређења чврстих честица	86
7.2. ПОРЕЂЕЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА.....	87
7.3. ОГРАНИЧЕЊА АПАРАТА	89
8. КОРЕЛАЦИОНЕ ЗАВИСНОСТИ И ВЕРИФИКАЦИЈА	92
8.1. КОРЕЛАЦИОНЕ ЗАВИСНОСТИ ПАРАМЕТАРА.....	92
8.1.1. Корелационе зависности између резидуалних углова унутрашњег трења дефинисаних коришћењем различитих апарата (DS и KS)	92
8.1.2. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и процентуалног учешћа појединих фракција у гранулометријском саставу тла	94
8.1.3. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења и индекса пластичности.....	97
8.1.4. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и комбинованог параметра <i>CALIP</i>	98
8.2. ВЕРИФИКАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА	99
8.2.1. Верификација корелационих резултата упоредном анализом са референтним подацима из литературе	99
9. ВЕРИФИКАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА НА ПРИМЕРУ АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ КАРАКТЕРИСТИЧНИХ ПРОФИЛА НА ПК ДРМНО	107
9.1. ИЗБОР ФИЗИЧКО - МЕХАНИЧКИХ ПАРАМЕТАРА ЗА ПОТРЕБЕ АНАЛИЗЕ СТАБИЛНОСТИ.....	107
10. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	116
10.1. ЗАКЉУЧАК.....	116
10.2. ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	120
11. ЛИТЕРАТУРА.....	121
12. БИОГРАФИЈА.....	129

СПИСАК СЛИКА

- Слика 2.1 *Крива напон-деформација при константном σ' : (a) Висок садржај глиновитих фракција (> 40%), (b) Низак ниво глиновитих фракција (< 20%), (Skempton, 1985).*
- Слика 2.2. *Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и садржаја глиновитих фракција (Lurini и сар., 1981).*
- Слика 2.3. *Веза између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности (Seyscek, 1979).*
- Слика 2.4. *Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента фракција глине и ефективног нормалног напона (Stark и Eid, 1994).*
- Слика 2.5. *Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента фракција глине и ефективног нормалног напона (Stark и сар., 2005).*
- Слика 2.6. *Корелационе вредности резидуалних углова унутрашњег трења и индекса пластичности I_p (a), границе течења WL (б) и в) проценат учешћа глиновитих фракција FG (Tiwari, 2005.)*
- Слика 2.7. *Ажурирана емпиријска корелација за резидуални секантни угао трења на основу WL , FG и σ'_p за 73 узорка природног тла (Stark и Hussain, 2012).*
- Слика 2.8. *Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента учешћа фракција глине и ефективног нормалног напона који су испитивали Хи и сарадници (2017) (црвени „+“ маркери). Тла која су смицања под вишеструким брзинама смицања (Хебеи муљевита глина и Пекиншка глина) приказана су плавим маркерима „×“. Позадински подаци су од Stark и Hussain (2012).*
- Слика 2.9. *Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења (Shimobe, 2025)*
- Слика 2.10. *Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности (Shimobe, 2025)*
- Слика 2.11. *Mohr-Coulomb-ова анvelopа лоба (Terzaghi, 1996.)*
- Слика 2.12. *Идеализовани критеријуми лоба тла (Head, 1992.)*
- Слика 2.13. *Механизам клизања - котрљање*
- Слика 2.14. *Механизам клизања - уређење чврстих честица дуж равни смицања а) пре смицања б) после смицања*
- Слика 2.15. *Механизам клизања - прелазно стање између котрљања и уређења чврстих честица дуж клизне равни*
- Слика 3.1. *Приказ положаја кутије након завршеног опита директним смицањем*
- Слика 3.2. *а) Matest-ов апарат за директно смицање; б) 2Д модел апарата за директно смицање (Karimpoor, F., 2015 - модификовано)*
- Слика 3.3. *Типска поставка кутије за директно смицање*
- Слика 3.4. *Шема механизма за кружно смицање у (a) апарату са једним прстеном са клизном равни на дну узорка; (b) апарат са подељеним прстеном са клизном равни на средини узорка; (c) апарат са једним прстеном са клизном равни на врху узорка (Sadrekarimi, 2010)*
- Слика 3.5. *а) Bromhead-ов апарат за кружно смицање б) 3Д модел апарата за кружно смицање (извор: Упуство произвођача)*

- Слика 3.6. *Изглед порозног диска за трење*
- Слика 4.1. *Положај и распрострањење: а. Србије у односу на Европу, б. лежишта Дрмно у односу на Србију, с. Лежишта (Ђорлука, 2024)*
- Слика 4.2. *Синтетички стуб лежишта Дрмно, модификовано (Извор: Стевановић, Д., 2023)*
- Слика 5.1. *Изглед припремљеног апарата за испитивање (извор: Упуство произвођача)*
- Слика 5.2. *Шематски приказ сила за прорачун стабилности косине по Бишоповој упроићеној методи*
- Слика 5.3. *Однос резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за директно смицање и а) параметра CALIP, б) процентуалног учешћа фракција глине (FG) (Collota, 1989)*
- Слика 5.4. *Однос резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за кружно смицање и а) параметра CALIP, б) проценат учешћа фракција глине (FG) (Collota, 1989)*
- Слика 6.1. *Дијаграм гранулометријског састава - песак*
- Слика 6.2. *Дијаграм гранулометријског састава - алеврит*
- Слика 6.3. *Дијаграм пластичности – алеврит*
- Слика 6.4. *Дијаграм гранулометријског састава – Сива глина*
- Слика 6.5. *Дијаграм пластичности – сива глина*
- Слика 6.6. *Дијаграм гранулометријског састава – песковита прашина*
- Слика 6.7. *Дијаграм пластичности – песковита прашина*
- Слика 6.8. *Шематски приказ завршне западне косине површинског копа: 1: хумус (лес); 2: песак; 3: Шљунак; 4: Алеврит; 5: II угљени слој; 6: III угљени слој; 7: Сива глина; 8: Песковита прашина; 9: Подина*
- Слика 6.9. *Узорак У-1 у кутији за кружно смицање након опита*
- Слика 6.10. *Узорак У-1 смицан у кутији за директно смицање - после опита*
- Слика 6.11. *Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-1*
- Слика 6.12. *Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-1*
- Слика 6.13. *Узорак У-2 у кутији за кружно смицање након опита*
- Слика 6.14. *Узорак У-2 смицан у кутији за директно смицање - после опита*
- Слика 6.15. *Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-2*
- Слика 6.16. *Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-2*
- Слика 6.17. *Узорак У-3 у кутији за кружно смицање након опита*
- Слика 6.18. *Узорак У-3 смицан у кутији за директно смицање - после опита*
- Слика 6.19. *Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-3*
- Слика 6.20. *Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-3*
- Слика 6.21. *Узорак У-4 у кутији за кружно смицање након опита*
- Слика 6.22. *Узорак У-4 смицан у кутији за директно смицање - после опита*
- Слика 6.23. *Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-4*

- Слика 6.24. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-4
- Слика 6.25. Узорак У-5 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.26. Узорак У-5 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.27. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-5
- Слика 6.28. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-5
- Слика 6.29. Узорак У-6 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.30. Узорак У-6 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.31. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-6
- Слика 6.32. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-6
- Слика 6.33. Узорак У-7 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.34. Узорак У-7 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.35. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-7
- Слика 6.36. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-7
- Слика 6.37. Узорак У-8 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.38. Узорак У-8 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.39. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-8
- Слика 6.40. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-8
- Слика 6.41. Узорак У-9 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.42. Узорак У-9 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.43. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-9
- Слика 6.44. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-9
- Слика 6.45. Узорак У-10 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.46. Узорак У-10 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.47. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-10
- Слика 6.48. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-10
- Слика 6.49. Узорак У-11 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.50. Узорак У-11 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.51. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-11
- Слика 6.52. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-11
- Слика 6.53. Узорак У-12 у кутији за кружно смицање након опита
- Слика 6.54. Узорак У-12 смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.55. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-12
- Слика 6.56. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-12
- Слика 6.57. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-1 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

- Слика 6.58. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-2 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.59. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-3 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.60. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-4 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.61. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-5 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.62. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-6 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.63. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-7 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.64. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-8 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.65. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-9 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.66. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-10 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.67. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-11 добијен помоћу апарата за смицање и кружно смицање
- Слика 6.68. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-12 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.69. Узорак У-4Н смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.70. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања узорак У-4Н
- Слика 6.71. Узорак У-9Н смицан у кутији за директно смицање - после опита
- Слика 6.72. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања узорак У-9Н
- Слика 6.73. Дијаграм чврстоће смицања у функцији нормалних напона за узорак У-4Н добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 6.74. Дијаграм чврстоће смицања у функцији нормалних напона за узорак У-9Н добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање
- Слика 7.1. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-3 при вертикалном оптерећењу $\sigma'_n=100 \text{ kPa}$
- Слика 7.2. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-9 при вертикалном оптерећењу $\sigma'_n=400 \text{ kPa}$
- Слика 7.3. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-6 при вертикалном оптерећењу $\sigma'_n=200 \text{ kPa}$
- Слика 7.4. Поређење вредности резидуалног угла унутрашњег трења добијених у апарату за директно смицање и апарату за кружно смицање
- Слика 7.5. Трење дуж унутрашњег и спољашњег зида изазвано истискивањем дела узорка (извор: Мееман, 2007)
- Слика 7.6. Карактеристичан дијаграм односа напона смицања и хоризонталне деформације и однос вертикалне и хоризонталне деформације за узорак У-7

- Слика 8.1. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења добијених из апарата за кружно и директно смицање а-в) Линеарна регресија, г) Степена регресија
- Слика 8.2. Корелационе зависности секантних резидуалних углова унутрашњег трења добијених из апарата за кружно и директно смицање при нормалним ефективним напонима а) 50 kPa, б) 100 kPa, с) 200 kPa, д) 400 kPa
- Слика 8.3. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и проценат учешћа глиновитих фракција FG
- Слика 8.4. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и проценат учешћа фракција прашине FS
- Слика 8.5. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и проценат учешћа фракција песка F_p
- Слика 8.6. Однос $\tan\phi'_r$ и проценат учешћа фракција песка (Yatabe, 1996 - модификовано)
- Слика 8.7. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и границе течења LL
- Слика 8.8. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и индекса пластичности I_p
- Слика 8.9. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења добијене у КС апарату (а) и ДС апарату (б) у односу на параметар CALIP Корелационе
- Слика 8.10. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS, ϕ'_r , DS и I_p предложених у дисертацији и литературних података (Shimobe, 2025 - прилагођено)
- Слика 8.11. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS - I_p предложених у дисертацији и литературних података
- Слика 8.12. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS, ϕ'_r , DS и LL предложених у дисертацији и литературних података (Shimobe, 2025 – прилагођено)
- Слика 8.13. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS - LL предложених у дисертацији и литературних података
- Слика 8.14. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS, LL, I_p и FG предложених у дисертацији и литературних података (Tiwari, 2005-прилагођено)
- Слика 8.15. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS и CALIP предложених у дисертацији и литературних података (Collota, 1989 - прилагођено)
- Слика 8.16. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , DS и CALIP предложених у дисертацији и литературних података (Collota, 1989 - прилагођено)
- Слика 9.1. Слика 9.1. Изглед површинског копа Дрмно и положај геотехничких профила 1 и 2 (Извор: Стевановић, Д.: Студија изводљивости експлоатације угља на површинском копу „Дрмно“ – актуелизација, 2023.год.)
- Слика 9.2. Изглед завршне косине на профилу P1
- Слика 9.3. Дијаграм зависности фактора сигурности F_s од коефицијента порног притиска r_n за профил P1
- Слика 9.4. Резултати анализе стабилности косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже
- Слика 9.5. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за кружно смицање

- Слика 9.6. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за директно смицање
- Слика 9.7. Изглед завршне косине на профилу P2
- Слика 9.8. Дијаграм зависности фактора сигурности F_s од коефицијента порног притиска r_u за профил P2
- Слика 9.9. Резултати анализе стабилности косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже
- Слика 9.10. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре који су добијени апаратом за кружно смицање
- Слика 9.11. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за директно смицање

СПИСАК ТАБЕЛА

- Табела 2.1. Резидуални углови унутрашњег трења добијени у апарату за кружно смицање и повратном анализом стабилности (Tiwari, 2005)
- Табела 2.2. Однос FPG, CPG, физичких индекса и резидуалне чврстоће (Fang, 2024)
- Табела 3.1. Основне карактеристике различитих апарата за кружно смицање
- Табела 5.1. Типови конуса и њихове димензије
- Табела 5.2. Емпиријска правила за оцјену јачине везе (Вујић, Ивић 1991).
- Табела 6.1. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка песка
- Табела 6.2. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-1
- Табела 6.3. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-2
- Табела 6.4. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-3
- Табела 6.5. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка алеврита
- Табела 6.6. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-4
- Табела 6.7. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-5
- Табела 6.8. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-6
- Табела 6.9. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка сиве глине
- Табела 6.10. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-7
- Табела 6.11. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-8
- Табела 6.12. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-9
- Табела 6.13. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка песковите прашине
- Табела 6.14. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-10
- Табела 6.15. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-11
- Табела 6.16. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-12
- Табела 6.17. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за песак
- Табела 6.18. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за песак
- Табела 6.19. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за алеврит
- Табела 6.20. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за алеврит
- Табела 6.21. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за сиву глину
- Табела 6.22. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за сиву глину

- Табела 6.23. *Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за песковиту прашину*
- Табела 6.24. *Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за песковиту прашину*
- Табела 6.25. *Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка алеврита*
- Табела 6.26. *Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка сиве глине*
- Табела 6.27. *Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање*
- Табела 6.28. *Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање*
- Табела 7.1. *Збирна табела идентификационо-класификационих индекса и резидуалних углова унутрашњег трења добијених из ДС и КС апарата*
- Табела 8.1. *Једначине и коефицијенти детерминације добијени из различитих корелација између параметара ϕ' и $r_{KS} - I_p$*
- Табела 8.2. *Једначине и коефицијенти детерминације добијени из различитих корелација између параметара ϕ' и $r_{KS} - LL$*
- Табела 9.1. *Усвојене вредности параметара физичко-механичких својстава за прорачуне стабилности косина површинског копа "Дрмно"*
- Табела 9.2. *Усвојене вредности резидуалних параметара физичко-механичких својстава за прорачуне стабилности косина површинског копа "Дрмно"*
- Табела 9.3. *Резултати анализе стабилности завршне косине профила P1*
- Табела 9.4. *Резултати анализе стабилности завршне косине профила P2*
- Табела 9.5. *Резултати анализе стабилности завршне косине профила P1 и P2*

1. УВОД

1.1. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Један од предуслова за безбедно обављање експлоатације на површинским коповима, јесте стабилност завршних и радних косина копа. Да би се ово обезбедило потребно је извршити детаљна теренска и лабораторијска геомеханичка испитивања тла и на основу добијених резултата урадити прорачуне везане за анализе стабилности. Овако добијени резултати користе се за димензионисање нагиба експлоатационих косина (ископа), односно косина формираних услед одлагања јаловине. У оквиру дисертације биће дефинисани резидуални параметри чврстоће смицања, не узимајући у разматрање ефекте динамичких сила.

Нестабилности косина/клизишта могу захватити више етажа и довести до губитка ресурса, што значајно поскупљује експлоатацију јер захтева додатне радове, а врло често и измену самог процеса експлоатације. Клизишта настају када је достигнута гранична чврстоћа смицања и зато је адекватно дефинисање параметара смичуће чврстоће, један од битних предуслова за успешно решавање проблема стабилности.

Лабораторијским испитивањима је потребно одредити: кохезију – везивне силе између додирних површина честица и угао унутрашњег трења – јавља се између честица услед њиховог померања, клизања или котрљања. Резидуална чврстоћа тла је важан параметар у геотехничком инжењерству. То је чврстоћа достигнута при великим деформацијама. Даље смицање у истом правцу доводи до уређене оријентације зрна што условљава престанак смањења чврстоће смицања, и она остаје константна, па отуда нема даље промене запремине као ни промене порних надпритисака.

Разумевање резидуалне чврстоће смицања при великим деформацијама је од суштинског значаја при објашњавању механизма клизања (Skempton, 1985; Tika и Hutchinson, 1999; Wen и сар., 2007). Резидуална чврстоћа смицања, тј. њени параметри имају кључну улогу при пројектовању санационих мера код нарушене стабилности терена. Конвенционалне лабораторијске методе за дефинисање чврстоће смицања, попут опита директног смицања, омогућавају максимална померања до 10 mm за узорке димензија 60 x 60 mm (Casagli и сар., 2006; Okada и сар., 2007; Van Asch и сар., 2007). Из тих разлога је понашање тла при великим деформацијама доста отежано јер се резидуална чврстоћа смицања може дефинисати само на основу вишеструког смицања. Опит кружним смицањем, који омогућава неограничено померање узорка, много је поузданији начин одређивања резидуалне чврстоће смицања (Okada и сар., 2007; ASTM Standard D7608-10, 2010, D6467-13, 2013), што је и показано на основу неколико научних студија (Wang и сар., 2004; Fukuoka и сар., 2007; Li и сар., 2013; Ноуос и сар., 2014). На пример, Fukuoka и сар. (2007) применили су нови концепт помоћу опита кружним смицањем, како би дефинисали зоне смицања које настају при великим деформацијама. Ова студија је указала на то да је опит кружним смицањем најприкладнији за проучавање чврстоће смицања тла у клизишту, где се по правилу јављају велика померања. Kimita и сар. (2014) проучавали су ефекат брзине смицања за дефинисање резидуалне чврстоће смицања тла у клизишту, користећи опит кружним смицањем. У важећим прописима Eurocod 7: Part 2: 2007, наведен је захтев да је приликом извођења опита за одређивања параметара резидуалне чврстоће тла, неопходно обезбедити паралелност кутија током смицања, које може да се постигне само у апарату за кружно смицање. Међутим, треба напоменути да се у устаљеној геотехничкој пракси за дефинисање резидуалних параметара чврстоће смицања, најчешће користе резултати реверсних опита класичног директног

смицања. Зато је један од циљева овог рада да укаже на односе резидуалних параметара чврстоће смицања добијених класичним реверсним опитом директног смицања и опитом кружног смицања, уз напомену да је овај апарат конструкционо сложен, па врло често припада категорији истраживачке опреме.

Мноштво је фактора од којих зависи резидуална чврстоћа смицања, а уопштено се могу класификовати као фактори природног стања који зависе од физичких својстава тла (минералног и хемијског састава, гранулометријског састава и облика честица, пластичних карактеристика, као и хигроскопних својстава и садржаја чврсто везане воде у тлу) и спољни фактори (промена ефективних нормалних напона током узорковања, промена порних притисака, температуре, услова дренарања па и брзине клизања). У односу на величину и облик честица, јављају се три вида резидуалног смицања материјала: котрљање, уређење чврстих честица дуж равни смицања и прелазно стање између котрљања и уређења честица дуж клизне равни.

Котрљање је резидуално смицање при константној запремини, где дуж клизне равни долази до ротације и транслације чврстих честица. Јавља се код песковитих, прашинасто-песковитих и прашинастих врста тла. Код тла која су изграђена од глиновитих честица плочастог облика, при великим деформацијама честице се оријентишу у правцу смицања дуж клизне површине. Као резултат овог преусмеравања плочастих честица, трење је сведено на минимум, тако да при великим деформацијама преовладава трење које се остварује између честица обавијених танким слојем воде који је везан за површину чврсте честице (адсорбована вода), што у суштини зависи од минералног састава. Прелазно резидуално смицање се јавља када нема доминантног облика честица тако да оно укључује комбинацију котрљања и уређења честица. По клизној равни честице се и ротирају и оријентишу у правцу смицања. Са повећањем процента садржаја глиновитих фракција уређенији механизам смицања постаје доминантнији и обрнуто.

У Србији до сада није детаљно истраживана резидуална чврстоћа смицања коришћењем апарата за кружно смицање. Предмет научног истраживања ове дисертације обухвата:

- дефинисање релевантних физичко-механичких параметара глиновитих, прашинастих и песковитих материјала, тзв. непродуктивних средина са површинског копа Дрмно, на којима ће се вршити опити за дефинисање резидуалне чврстоће смицања;
- предности апарата за кружно смицање за одређивање параметара резидуалне чврстоће тла (детаљан опис апарата за кружно смицање конструкцијског типа *Wromhead*);
- дефинисање резидуалних параметара чврстоће смицања помоћу апарата за кружно смицање и помоћу реверсног опита у апарату за директно смицање за различите типове тла: песак, алеврит, сива глина и песковита прашина (ова испитивања обављена су у складу са важећим националним стандардима, односно релевантним стандардима и препорукама других земаља);
- корелационе анализе између резидуалних углова унутрашњег трења и гранулометријског састава тла, индекса пластичности, граница течења и комбинованог индекса *CALIP*;
- детаљне анализе добијених резултата и њихова верификација на конкретним примерима из праксе - клизање косина на површинском копу Дрмно;
- анализе стабилности са резидуалним параметрима чврстоће смицања добијеним из различитих апарата.

1.2. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

У анализи стабилности клизишта код којих је дошло до великих смичућих померања, меродавна је резидуална смичућа чврстоћа. Она се најчешће дефинише на основу лабораторијских испитивања коришћењем апарата за директно смицање извођењем реверсног опита, или апарата који омогућује кружно смицање. У геотехничкој пракси у Србији, али и у свету, примена апарата за кружно смицање није честа с обзиром да спада у истраживачку опрему, а не стандардну лабораторијску. Да би се што приближније дефинисала резидуална чврстоћа смицања, потребна су значајна померања, која се само апроксимативно могу обезбедити у опитима директним и кружним смицањем.

Постављене хипотезе истраживања:

- напонско-деформацијско понашање материјала зависи од врсте материјала тј. облика и величине доминантних честица (ситнозрно или крупнозрно тло);
- резидуална чврстоћа представља минималну чврстоћу смицања којом се дефинише стање када нема промене запремине при даљим деформацијама, па према томе ни промене смичућих напона;
- резидуална чврстоћа тла може се дефинисати на непоремећеним и на поремећеним узорцима тла, али и на засићеним узорцима у консолидованим дренажним условима,
- чврстоћа смицања директно зависи од водно-физичких карактеристика (пластичности) ситнозрних материјала, тако да стање конзистенције значајно утиче и на вредности резидуалних параметара чврстоће смицања;
- за дефинисање резидуалних параметара чврстоће смицања тла могу се користити различити лабораторијски опити (опит кружним смицањем, реверсни опит у апарату за директно смицање), корелационе зависности на основу бројних литературних података. Постоје и бројне корелационе зависности представљене у облику дијаграма који повезују, у првом реду, пластичне карактеристике и резидуални угао унутрашњег трења;
- резидуални параметри чврстоће смицања добијени реверсним опитом директног смицања се разликују од параметара добијених извођењем опита кружним смицањем.
- лабораторијски опит кружног смицања даје најприближнију вредност природној, реалној резидуалној чврстоћи тла.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

2.1. ОСНОВНИ ЛИТЕРАТУРНИ ПОДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ СМИЦАЊА

Овај преглед литературе обухвата историјски приказ и развој истраживања о резидуалној чврстоћи и сродним темама до данашњих дана. Развој теорије резидуалне чврстоће тла углавном се везује за разумевањем основних механизма понашања клизишта и других проблема кретања тла (померања тла) у геотехничком инжењерству. Свеобухватни прегледи различитих аспеката претходних радова појавили су се у различитим периодима. Они се могу поделити на период пре II светског рата, период након II светског рата до краја XX века и најновији период који обухвата истраживања у 21. веку до данашњих дана.

Период пре II светског рата

Са радовима Hvorsleva (1936, 1937, 1939), Haefelija (1938) и Tiedemanna (1937) концепт резидуалне чврстоће почео је да се појављује у литератури, пратећи развој апарата за смицање прилагођеног за мерење чврстоће при великим деформацијама. Свеобухватан преглед првог апарата за мерење чврстоће тла дао је Hvorslev (1939). То је такође био један од првих покушаја описивања циљева коришћења различитих апарата за смицање. У првом делу рада Hvorslev (1939) описује главне циљеве испитивања смицања који се односе на одређивање:

1. максималног отпора смицања;
2. напонско-деформацијских веза између честица и брзине пластичног течења пре лома;
3. привременог или трајног смањења отпора смицања након лома;
4. односа напон-деформације и карактеристика промене запремине услед смичућих напона.

Као појашњење за тачку 3. Hvorslev наводи: "Чињеница да су често потребна врло велика померања да би се ангажовала ова минимална вредност отпора смицања, што озбиљно утиче на прикладност различитих врста апарата за смицање. Подаци о резидуалној чврстоћи смицања након лома су потребни за одређивање фактора сигурности земљаних конструкција у којима се дешавају локални ломови тла који се не могу спречити". (Тиме признајући важност прогресивног лома).

Коментаришући триаксијални опит смицања, Hvorslev наводи: "У садашњој фази развоја апарата за испитивање чврстоће смицања тла, триаксијално испитивање се чини као најбоља метода за одређивање вршне чврстоће смицања, као и односа напон-деформација и промена запремине пре лома", и додаје: "Триаксијални опит је такође погодан за испитивање спорог пластичног течења пре лома, али не и за одређивање чврстоће смицања након лома". Најважније од свега, Hvorslev је препознао важност ротационог опита смицања на прстенастим узорцима (опит кружним смицањем) као "најбољи тип опита, досад осмишљен, за одређивање резидуалне чврстоће смицања".

Према Hvorslev-у (1939), апарат за кружно смицање је независно развијен 1934. године од стране Grunera и Haefeli-ja (1934), Coolinga и Smith-a (1935, 1936) и Hvorsleva (1936, 1937). Hvorslev (1936, 1937) је писао о опитима изведеним на прерађеној глини из Литл белта (енг. Little Belt) и Бечким глинама (нем. Wiener Tegel) користећи апарат за кружно смицање са контролисаним прираштајем силе. У вези са тим он даје примере степена неуједначене

расподеле деформација кроз узорак користећи три различита типа кутија за смицање: фиксирани, слободни и ограничени прстенови.

Haefeli (1938) пише о резултатима испитивања који су добијени на узорцима прерађене глине помоћу апарата за кружно смицање са контролисаним прираштајем силе са подељеном кутијом за смицање. Међутим, деформације после вршне чврстоће су биле веома брзе (око 10 mm/min) и хоризонтална померања после максималног напона смицања су била сувише ограничена да би се успоставили резидуални услови (један опит је изведен до помака од приближно 27 mm). Термин који Haefeli користи: „restscherspannung” (преостала смичућа чврстоћа) односи се на последњу тачку криве напона-хоризонтално померања, а не на резидуалну чврстоћу како је тренутно схваћена.

Tiedemann (1937) је 1933. године конструисао ротациони смичући апарат за испитивање узорака у облику диска, ротираних прстенастом плочом. Овај апарат је имао низ недостатака, па га је Tiedemann 1937. године заменио апаратом за кружно смицање са контролисаним прираштајем силе. На овом побољшаном апарату извршио је испитивања на прерађеној и непоремећеној глини, постижући помаке веће од 100 mm (што представља, колико је познато, прва документована испитивања овог типа на непоремећеним узорцима). Утврдио је да чврстоћа, након вршне, опада до константне вредности која је адекватно названа „Gleitwiderstand” (отпорност на клизање). Tiedemann је такође приметио да је резидуална чврстоћа за Весер елб канал (енг. Elbe - Weser Canal) глину испитивана у прерађеном стању, била слична оној испитаној на истој глини у непоремећеном стању.

Период након II светског рата до краја XX века

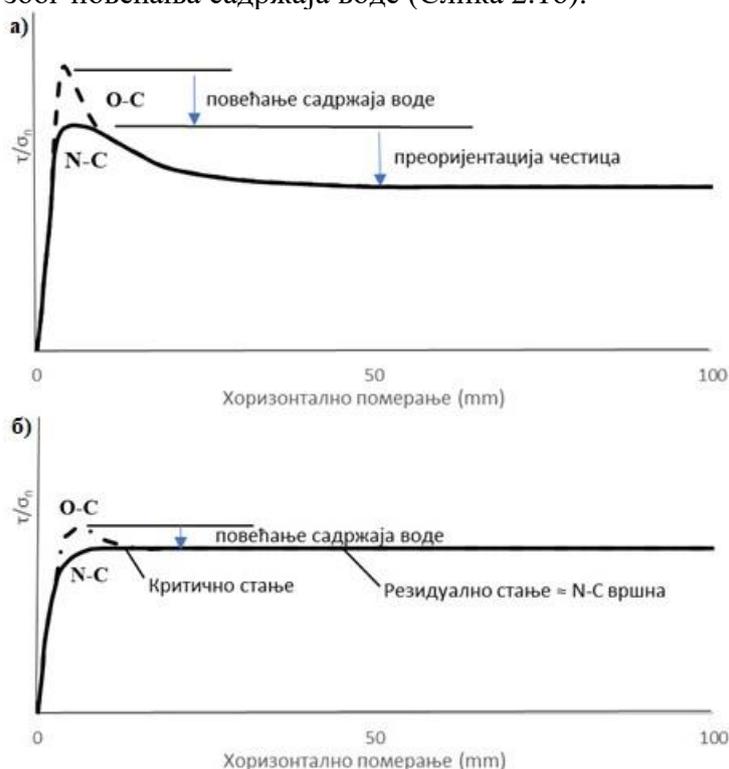
Binger и Thompson (1949) су представили рад у којем су проучавали димензионисање засечених косина на Панамском каналу. Њихов рад је веома битан јер је то вероватно први покушај да се косине пројектују користећи параметре резидуалне чврстоће смицања. Термин „резидуална чврстоћа” није специфично коришћен од стране аутора, али се то закључује из описа димензионисања косина у формацији Кукарача (енг. Cucaracha): „Пошто чврстоћа Кукарача формација није могла бити поуздано одређена лабораторијским испитивањима, стандарди димензионисања косина за Кукарача формације заснивали су се на чврстоћи материјала изведеног из аналитичких студија стабилног ископа, комбинованих са резултатима једноставног лабораторијског опита за мерење трења које би се могло очекивати дуж клизних равни у материјалу. Испитивања за одређивање трења су изведена у стандардном апарату за директно смицање на узорцима исеченим из чврстих језгара глинених шкриљаца, полираних да симулирају раван клизања...”

Hvorslev и Kaufman (1952) објављују резултате испитивања апаратом за кружно смицање са контролисаним брзином деформације на Атлантски Мак (енг. Atlantic Muck) глинама (такође у Експерименталној станици водених путева (енг. Waterways Experiment Station), 1951.) и глинама из језера Провиденс (енг. Lake Providence). Апарат је конструисан 1947. године и био је инспирисан Hvorslev-овим дизајном из 1936, 1937, 1939, али са опцијама извођења опита под контролисаним прираштајем силе и брзине деформације (или комбинације оба). Стога је, вероватно, био први апарат за кружно смицање који је могао да ради са контролисаним условима брзине деформације. Брзине смицања које су коришћене биле су прилично велике (0,6 mm/min или више). Hvorslev и Kaufman (1952) су утврдили да клизне површи подсећају на клизне равни које се налазе у глинама у природном стању, и да се углачаност клизне равни смањује са смањењем нормалног напона (утврдили су да је клизна раван била храпава за нормалне ефективне напоне мање од 50 kN/m²).

Током 1950-их није много радова објављено о резидуалној чврстоћи тла. Hvorslev (1960) је поново представио резултате добијене претходних година за глине из Литл Белта и за Бечке глине и поново навео практичну важност облика криве напон-хоризонтална деформација након достизања максимума за процену ефеката прогресивног лома на стабилност и проблем носивости.

Један од закључака који произлази из Skempton-овог предавања (1964) је да је резидуална чврстоћа глине јединствена за одређени нормалан ефективни ниво напона и да не зависи од претходне историје консолидације (тј. нормално - NC или преконсолидоване - OC). Овај закључак је потврђен испитивањима на Валтон Вуд (енг. Valton Vood) глинама где су добијене сличне вредности резидуалног угла унутрашњег трења када су испитивања вршена на различитим припремљеним узорцима: нормално консолидованима прерађеним, непоремећеним и на узорцима са природном клизном површином.

Haefeli (1951) и Skempton (1964) су објавили да се величина пада чврстоће од вршне до резидуалне вредности у глинама повећава са повећањем границе течења. Lupini (1981) и Skempton (1985) су показали да ће преоријентација честица бити значајна само у глинама које садрже плочасте минерале глине и имају удео глине (тежински проценат честица мањих од 0,002mm) који је већи од 40% (Слика 2.1а). Прашине и песковите глине са нижим процентом учешћа фракција глине показују скоро класични тип понашања у критичном стању у којем је, чак и при великим померањима, чврстоћа једва мања од нормално консолидоване вршне вредности, а опадање чврстоће после вршне код ове врсте преконсолидованог материјала је скоро у потпуности због повећања садржаја воде (Слика 2.1б).

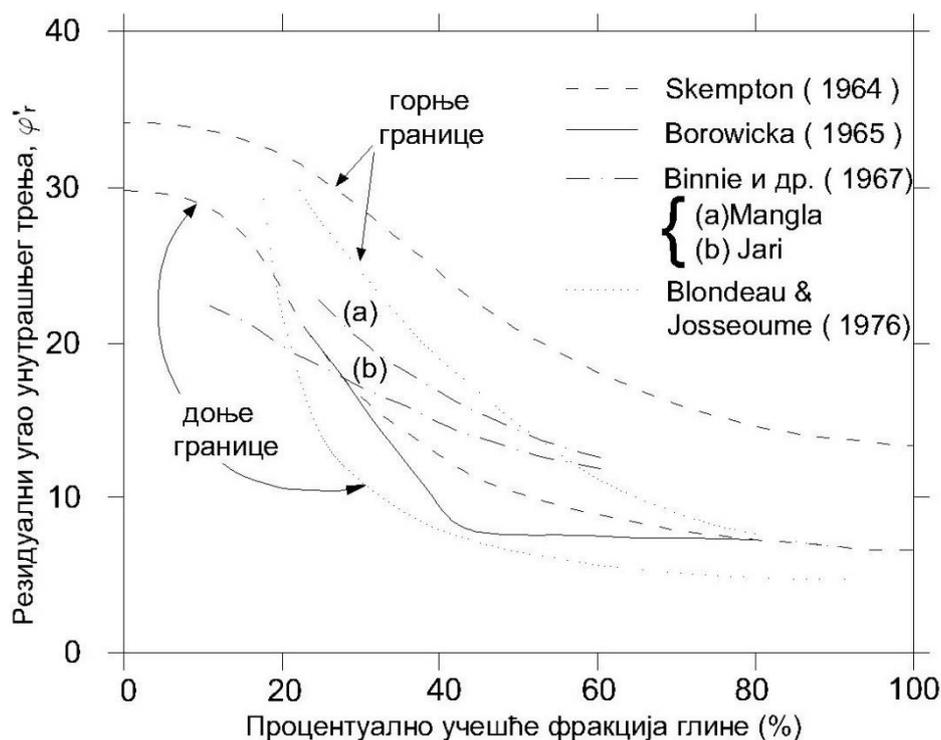


Слика 2.1. Крива напон-деформација при константном σ'_v : (а) Висок садржај глиновитих фракција (> 40%), (б) Низак ниво глиновитих фракција (< 20%), (Skempton, 1985).

Ракић (1996), указује да се вршни тј. максимални отпор смицању у преконсолидованим – OC глинама, активира након минималног померања, док је за омекшале нормално консолидоване NC глине потребно знатно веће померање. Након достизања максималне смичуће отпорности

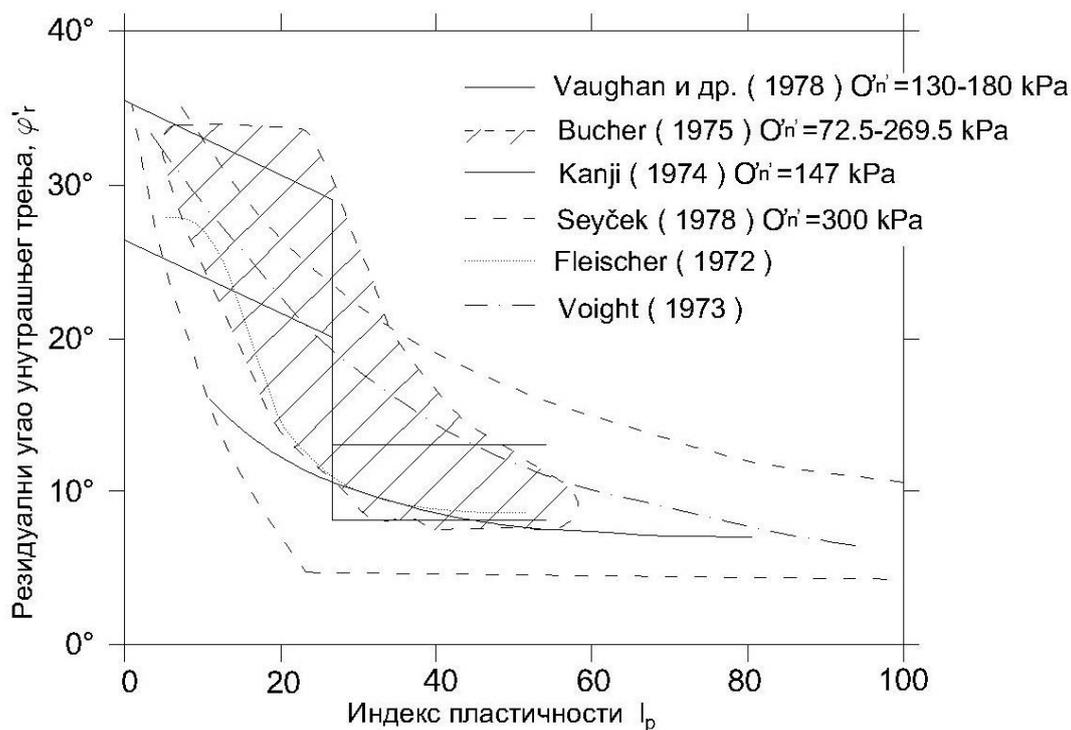
код ОС глина отпорност опада услед дилатанце и повећања садржаја воде и то до карактеристичне критичне вредности, изједначавајући се са максималном чврстоћом NC глине.

На основу резултата оваквих испитивања, различити аутори су предлагали различите корелације између резидуалне чврстоће смицања и садржаја фракција глине или индекса пластичности. Skempton (1964) је објавио експерименталне податке о резидуалној чврстоћи смицања на основу испитивања у апарату за директно смицање и поставио је прву општу корелацију између резидуалне чврстоће смицања и садржаја фракција глине. Слика 2.2. приказује корелацију коју је предложио Skempton, укључујући корелације које су касније допуњене од стране других аутора (Lurini, 1981.).



Слика 2.2. Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и садржаја глиновитих фракција (Lurini и сар., 1981).

Неки аутори тврде да је најбоља корелација између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности у односу на друге параметре. На Слици 2.3. приказане су збирне корелације овог типа које су објавили различити аутори (Seusek, 1979).

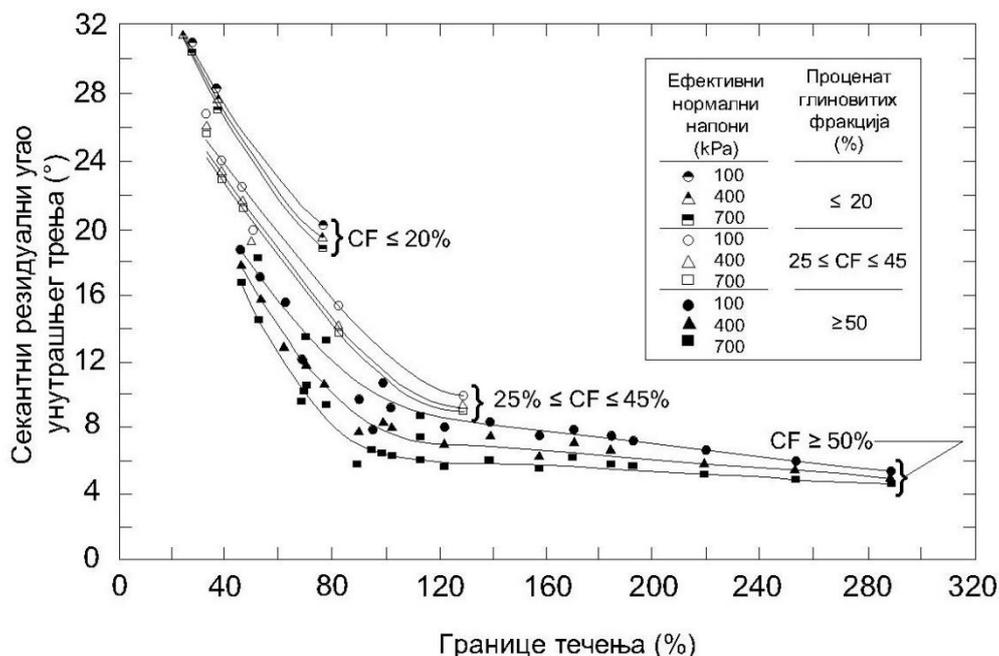


Слика 2.3. Веза између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности (Seycek, 1979).

Упркос доброј корелацији коју су утврдили различити истраживачи између резидуалног угла унутрашњег трења и неких својстава тла као што су садржај фракције глине или индекса пластичности за нека тла, Lunini и сарадници (1981) истичу да се ове корелације не могу генерализовати. Он је навео да друга својства као што су облик честица, минералошки састав, степен засићења, итд. значајно утичу на резидуалну чврстоћу тла.

Skempton (1985) је навео да је смањење чврстоће преконсолидованих - ОС глина последица повећања садржаја воде услед деформације и паралелне оријентације честица глине са смером смицања. С друге стране, нормално консолидоване - NC глине генерално имају нижу вршну чврстоћу од преконсолидоване глине и показују мањи пад од вршне до резидуалне чврстоће. Ово смањење чврстоће је праћено смањењем пора и у потпуности је последица оријентације честица паралелно са смером смицања (Слика 2.1.).

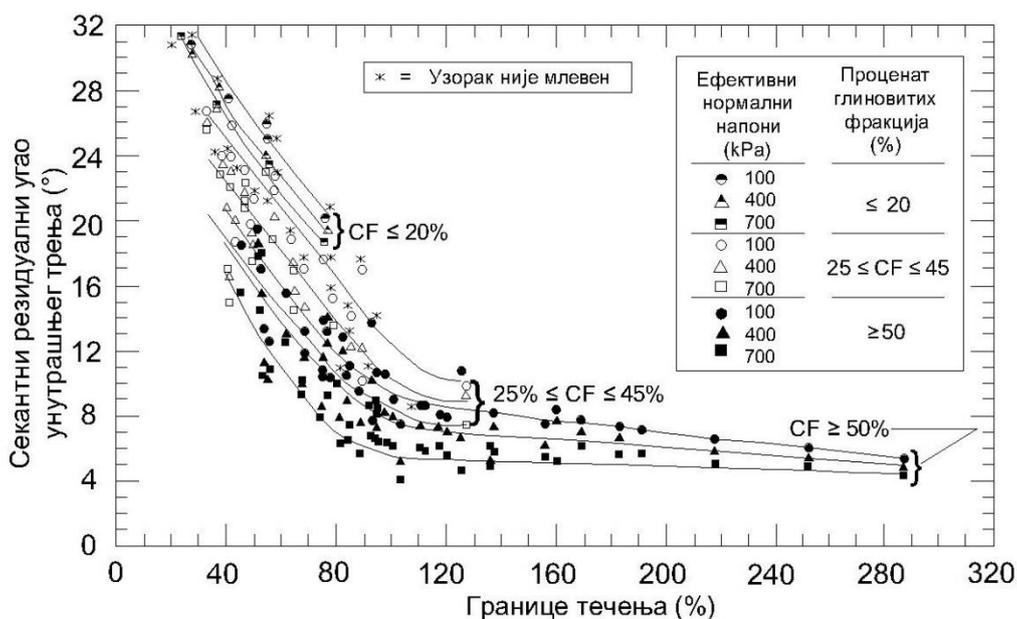
Stark и Eid (1994) су показали да корелације засноване само на процентуалном учешћу фракција глине или параметрима пластичности имају тенденцију да прецене дренирани резидуални угао унутрашњег трења. Као последица тога, аутори су предложили корелацију дрениране резидуалне чврстоће која је функција границе течења, процента глиновитих фракција и ефективног нормалног напона (Слика 2.4). Функције су дате за три групе тла према уделу глине ($CF < 20\%$, $25\% < CF < 45\%$, $CF > 50\%$) и за различите ефективне нормалне напоне.



Слика 2.4. Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента учешћа фракција глине и ефективног нормалног напона (Stark и Eid, 1994).

Истраживања у XXI веку

Stark и сарадници (2005) су на основу нових експерименталних података ревидирали корелацију приказану на слици 2.4. и представили нову емпиријску корелацију која се односи на ефективни нормални напон од 100-700 kPa (слика 2.5.). Нова корелација показује благо померање нагоре (мање од 1°), што је довело до повећања зависности секантног резидуалног угла унутрашњег трења од ефективног нормалног напона код тла са уделом фракција глине мањим или једнаким 20%. За ефективне нормалне напоне од 400 и 700 kPa, нови однос није доживео промене у односу на Stark и Eid-a (1994).



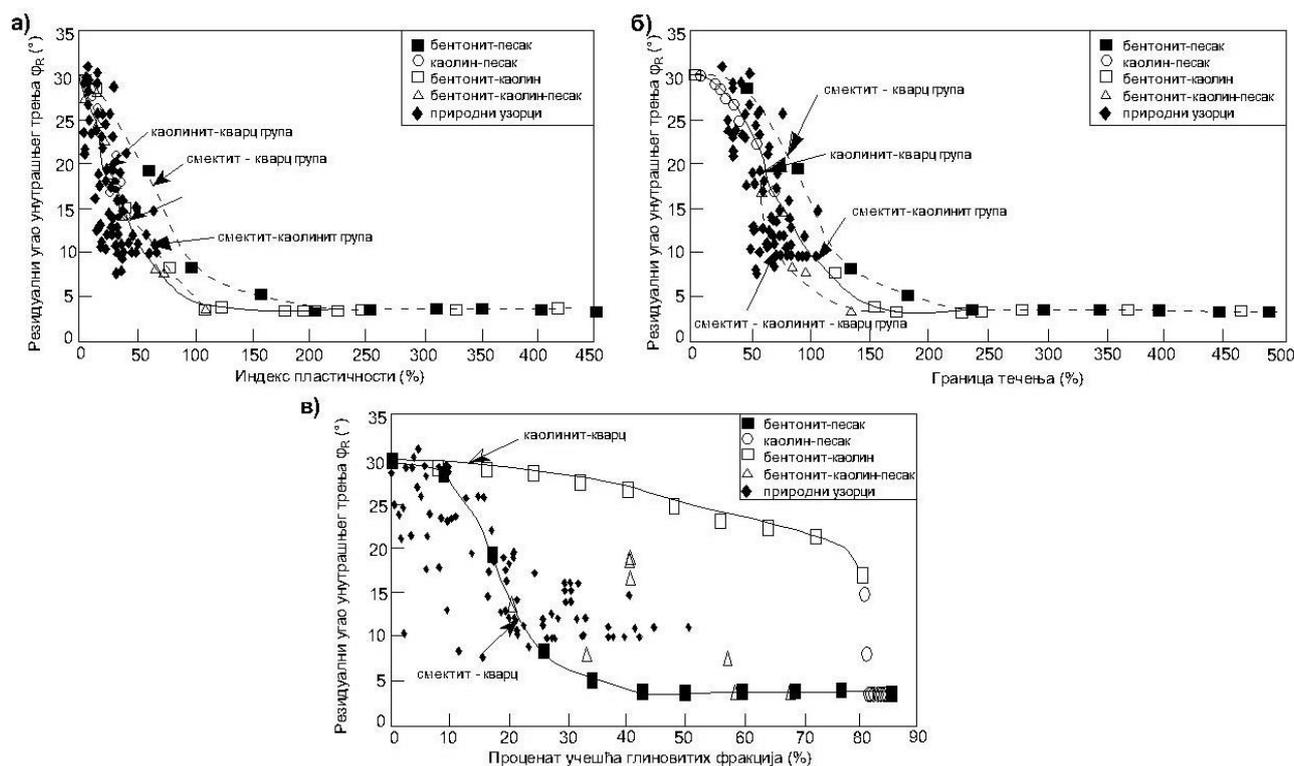
Слика 2.5. Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента учешћа фракција глине и ефективног нормалног напона (Stark и сар., 2005).

Tiwari и сарадници (2005) су испитивали резидуалну чврстоћу смицања на узорцима муљева из 6 клизишта са локације Ниагата у Јапану користећи непоремећене и прерађене узорке и извршили поређење са параметрима чврстоће добијеним повратном анализом стабилности (користећи Спенсер-ову методу). Генерално, резултати испитивања су показали добру зависност између резидуалних углова унутрашњег трења добијених из непоремећених, прерађених узорака и параметара добијених повратном анализом стабилности (Табела 2.1).

Табела 2.1. Резидуални углови унутрашњег трења добијени у апарату за кружно смицање и повратном анализом стабилности (Tiwari, 2005)

Узорак	Клизиште Okimi	Клизиште Yosio	Клизиште Mukohidehara	Клизиште Engyoji	Клизиште Iwagami	Клизиште Tsuboyama
Непоремећен	11,7	12,5	20,6	7,4	12,2	10,2
Прерађен (узет из дубине)	11,6	12,2	18,7	8,0	11,9	9,8
Прерађен (узет површински)	11,6	/	18,7	7,9	11,7	9,8
Повратна анализа	12,7	14,3	19,7	16,2	15,1	11,0

Tiwari и сарадници (2005) су представили проширену корелацију за 82 испитана узорка између резидуалних параметара чврстоће, индекса пластичности (Слика 2.6а), границе течења (Слика 2.6б) и процента учешћа глиновитих фракција (Слика 2.6в).



Слика 2.6. Корелационе вредности резидуалних углова унутрашњег трења и индекса пластичности I_p (а), границе течења W_L (б) и в) процента учешћа глиновитих фракција FG (Tiwari, 2005.)

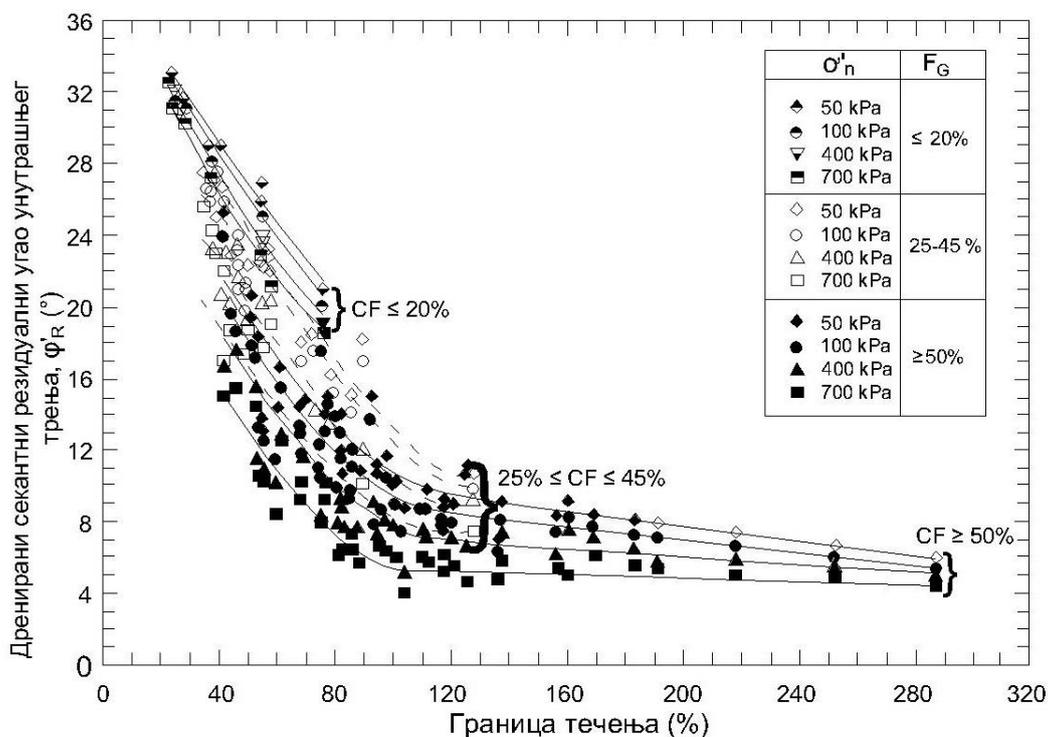
Wen и сарадници (2007) су испитивали резидуалну чврстоћу тла из зона клизања великих клизишта у подручју Три клисуре (енг. Three Gorges) у Кини. Њихова истраживања су показала да су лабораторијски одређени резидуални углови унутрашњег трења за фракције тла

без шљунка добро корелисани са садржајем глине, границом течења и индексом пластичности. Међутим, резидуални углови унутрашњег трења одређени „ин-ситу методама“, узимајући у обзир и фракције шљунка, показали су слабе корелације са садржајем глине и Атерберговим границама конзистенције, али веома добре корелације са односом шљунка и ситнозрног материјала. Студија је указала на то да је расподела величине честица, а посебно однос шљунка и ситнозрног материјала, битан фактор за процену резидуалне чврстоће у тлу са већим садржајем шљунка. Такође, утицај минералног састава глине на резидуалну чврстоћу је сложен и не зависи искључиво од процента учешћа фракција глине.

Ракић и сарадници (2011) су истраживали резидуалну чврстоћу високопластичних глина и алеврита са површинског копа „Тамнава - Западно поље“, користећи апарат за кружно смицање (Rowe-ов дизајн) и апарат за директно смицање. Резултати кружним смицањем су показали да се резидуални угао унутрашњег трења (ϕ'_r) за алеврите креће од $8,0^\circ$ до $8,7^\circ$, а за угљевите глине од $7,6^\circ$ до $9,0^\circ$. Реверсни опит апаратом за директно смицање је, међутим, дао веће вредности ϕ'_r : за око $4-4,6^\circ$ веће вредности у односу на вредности добијене кружним смицањем.

Vithana и сарадници (2012) су у свом раду објавили да су резултати резидуалног угла унутрашњег трења ϕ'_r добијени директним смицањем скоро 2 пута већи од оних добијених кружним смицањем на узорцима бентонитских и муљевитих глина а око 1,02 до 1,3 на узорцима леса, алеврита и алувијалног леса. Chen и Liu (2013), с друге стране, добили су сличне вредности резидуалног угла унутрашњег трења ϕ'_r користећи оба апарата.

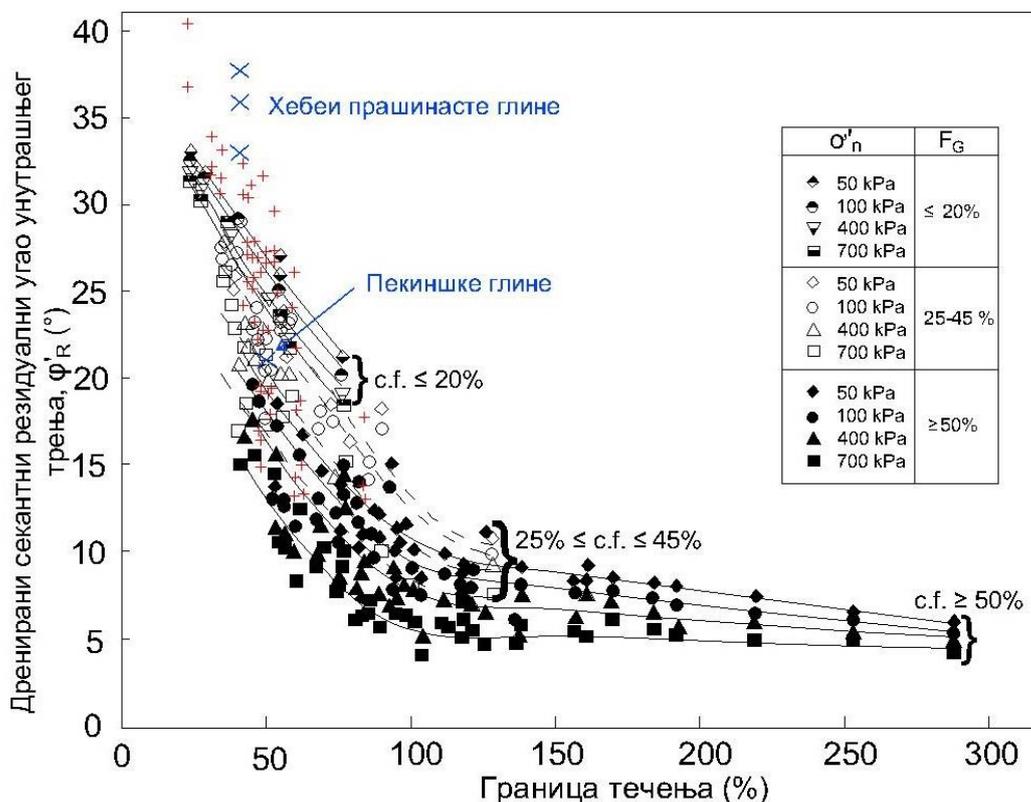
Stark и Hussain (2012) су проширили Stark-ову (2005) корелацију са 6 нових узорака, укупно 73, и укључили вредности секантног резидуалног угла трења за ефективни нормални напон од 50 kPa (Слика 2.7.).



Слика 2.7. Ажурирана емпиријска корелација за резидуални секантни угао трења на основу W_L , F_G и σ'_n за 73 узорка природног тла (Stark и Hussain, 2012).

У раду Ху и сарадници (2017) приказани су неки важни аспекти понашања чврстоће на смицање глинених материјала. Аутори су истраживали зависност резидуалне чврстоће смицања различитих типова тла и њиховог индекса пластичности (I_P) или границе течења LL користећи комерцијални апарат за кружно смицање типа IC-NGI (Bishop и сар., 1971).

Експериментална испитивања Ху (2017) потврђују познату корелацију (Слика 2.8.) између резидуалног угла унутрашњег трења (ϕ'_r) глиновитих тла и индекса пластичности I_P или границе течења LL (нпр. Kenney, 1967; Stark и Hussain, 2012).



Слика 2.8. Однос између секантног резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења, процента фракција глине и ефективног нормалног напона који су испитивали Ху и сарадници (2017) (црвени „+“ маркер). Тла која су смицана под вишеструким брзинама смицања (Хебеи муљевита глина и Пекиншка глина) приказана су плавим маркерима „×“. Позадински подаци су од Stark и Hussain (2012).

Heidemman (2020) у свом раду анализира резидуалну чврстоћу смицања прашинастог тла следећих карактеристика: садржај глиновитих фракција $F_G=15,46\%$, $LL=47\%$, $I_P=16,0$ које је било део великог клизишта у Бразилу. Резидуална чврстоћа је испитивана због великог кретања тла након лома. Експериментални програм је садржао физичку и минералошку карактеризацију и одређивање резидуалне чврстоће смицања. Испитивања апаратом за директно смицање показала су прогресиван лом тла. Резултати испитивања су показали кртост тла под већим нормалним напонима. Резидуални угао унутрашњег трења добијен у апарату за директно смицање је био $\phi'_r = 12,0^\circ$, који је дупло мањи од вршне вредности која је износила $\phi'_r = 25,0^\circ$. У апарату за кружно смицање, добијен је резидуални угао $\phi'_r = 7,7^\circ$.

Fang (2024) је у свом раду објавио резултате лабораторијске студије осмишљене да испита утицај ситнозрних честица FGP (енг. fined grained particles) (величина честица $d \leq 0,075$ mm) на резидуалну смичућу чврстоћу тла вишестепеним опитом смицања Bromhead-овим апаратом

за кружно смицање и дефинише физичке индексе који предвиђају резидуалну чврстоћу гранитних резидуалних тла користећи вештачки направљене узорке тла са петнаест различитих садржаја ситнозрних фракција *FGP*-а користећи тло из насипа резервоара бране Хоџо, Матсујама (енг. Нојо, Matsuuyama) у Јапану. Резултати су показали да се резидуална чврстоћа смицања смањује са повећањем *FGP*-ова и да угао резидуалног унутрашњег трења није зависио од процента *FGP*-а када је тај проценат био преко 90% (Табела 2.2).

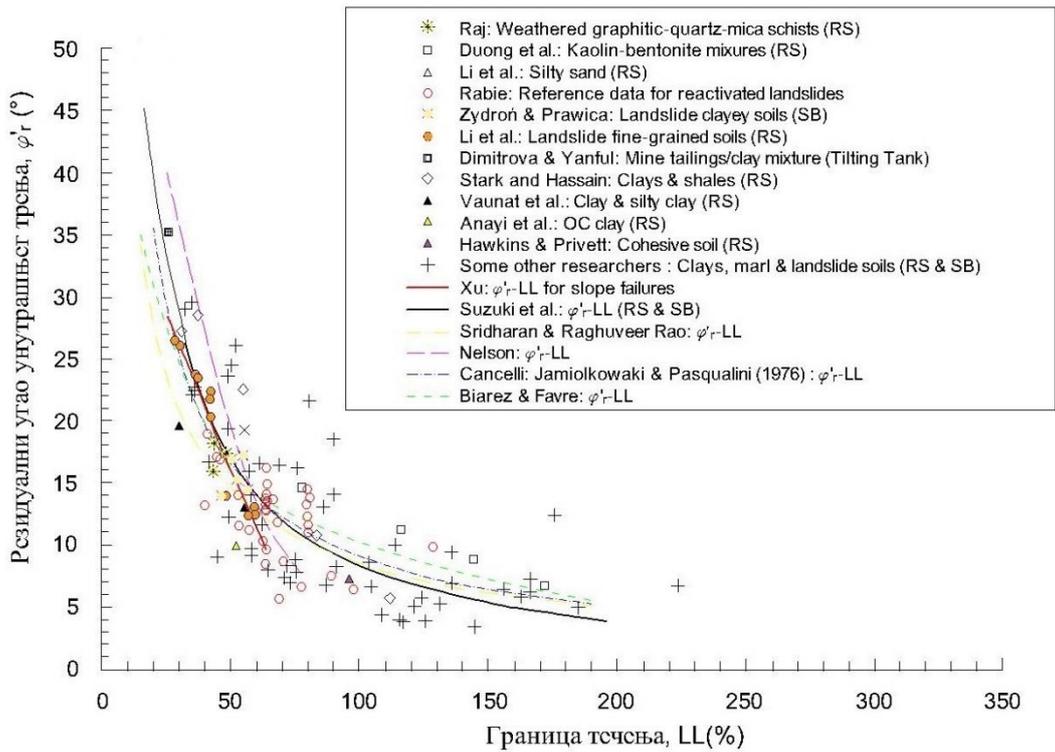
Табела 2.2. Однос *FPG*, *CPG*, физичких индекса и резидуалне чврстоће (Fang, 2024)

Ознака узорка	<i>FPG</i>	<i>CPG</i> *	<i>LL</i>	<i>PL</i>	<i>I_p</i>	ϕ'_r
	(0-0,075mm) %	(0,075-0,425mm) %	%	%	-	°
HM1	0,00	100,00	/	/	/	32,94
HM2	29,41	70,59	24,65	/	/	30,85
HM3	39,99	60,01	25,10	14,68	10,42	27,81
HM4	48,38	51,62	28,43	15,08	13,35	25,75
HM5	55,54	44,46	30,87	15,58	15,29	23,69
HM6	61,62	38,38	31,50	16,00	15,50	21,66
HM7	67,58	32,42	32,74	16,96	15,78	21,47
HM8	71,42	28,58	33,82	18,36	15,46	20,41
HM9	75,41	24,59	34,45	18,97	15,48	19,90
HM10	78,60	21,40	36,64	19,49	17,15	18,01
HM11	84,91	15,09	40,16	19,96	20,20	15,98
HM12	89,74	10,26	42,01	20,42	21,59	14,15
HM13	93,75	6,25	45,19	20,81	24,38	13,90
HM14	97,12	2,88	46,27	21,18	25,09	13,87
HM15	100,00	0,00	47,03	21,69	25,34	13,97

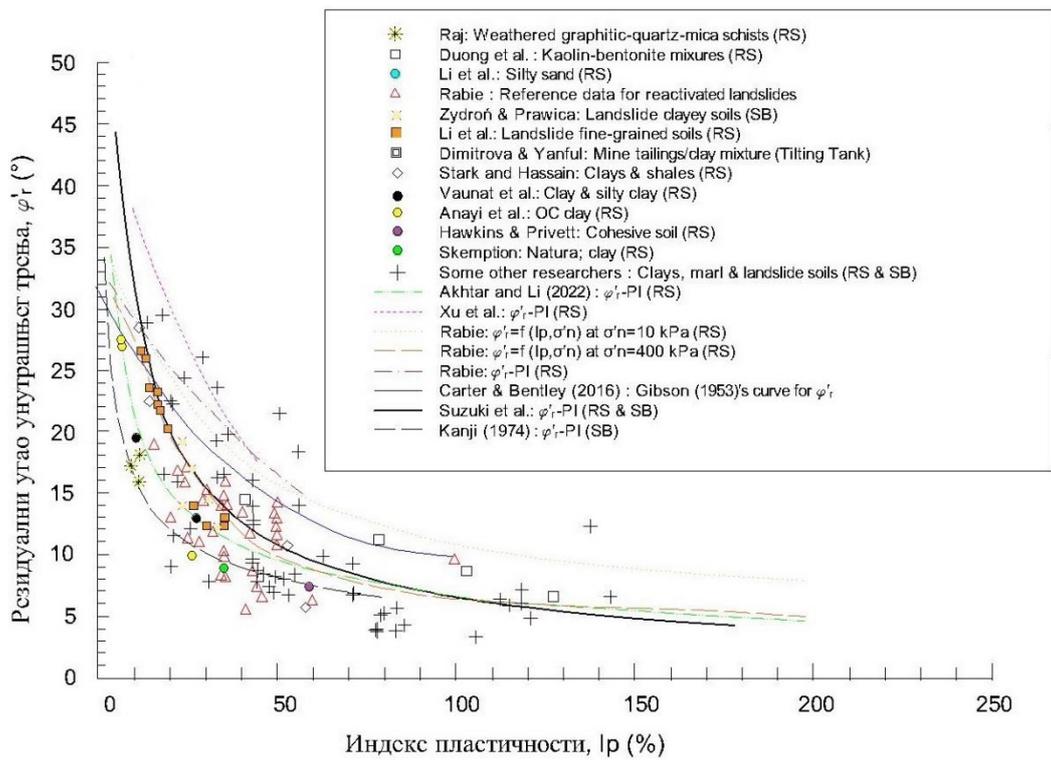
* *CPG* - *krupnozrne frakcije* (енг. *coarse grained particles*)

Shimobe и сарадници (2025) анализирајући постојеће базе података, истражили су корелације између резидуалног угла унутрашњег трења глина и границе течења и индекс пластичности. Развили су емпиријске односе између резидуалног угла унутрашњег трења и ових параметара (Слике 2.9-2.10). Истраживање показује да су везе између ових параметара значајне, али нису линеарне, при чему се уочава тенденција експоненцијалног опадања резидуалног угла трења са повећањем *LL* и *I_p*.

Аутори наглашавају ограничења једноставних емпиријских модела због природне варијабилности геотехничких карактеристика различитих глиновитих тла. Стога, добијене корелације треба сматрати апроксимацијама које су применљиве уз опрез, узимајући у обзир специфичне геолошке и геотехничке контексте. Резултати овог истраживања пружају корисне смернице за процену резидуалне чврстоће, али указују на потребу за даљим истраживањима ради развоја поузданијих и тачнијих модела за процену.



Слика 2.9. Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и границе течња (Shimobe, 2025)



Слика 2.10. Однос између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности (Shimobe, 2025)

2.2. ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА ТЛА

2.2.1. Опште

2.2.1.1. Значење термина „чврстоћа смицања тла“

Чврстоћа смицања тла представља највећи отпор које је тло пружио нанетој сили у тренутку лома. Гранични отпор смицања тла (највећи напон смицања у тренутку лома), који се у литератури најчешће назива „лом тла“, може бити дефинисан на неколико различитих начина, који су поменути у делу 2.2.2. Критеријуми лома који се често користе у пракси не морају бити исти као критеријуми који су релевантни основним особинама тла уопштено.

Чврстоћа смицања тла је варијабилна особина која зависи од више фактора. У лабораторијским условима, она се одређује излагањем узорка у специфично дефинисаним условима и одређеним типовима испитивања. Лом може настати у целокупном узорку или дуж уских зона познатих као клизне равни. Према Head-у (1992), фактори који утичу на лабораторијски добијену чврстоћу смицања тла укључују минерални састав, облик, гранулометријски састав и распоред честица, однос пара и садржаја воде, као и историју напона и тренутне напоне на терену. Поред тога, промене напона приликом узимања узорка и почетно стање узорка, као што су запремина и природна влажност, такође играју значајну улогу. На поједине факторе може се утицати квалитетом узорковања и пажљивом припремом и руковањем узорцима. Методе испитивања, укључујући оптерећење пре испитивања, брзину примене оптерећења и услови дренажа током испитивања, значајно варирају и могу утицати на резултатујући порни притисак. Избор критеријума за дефинисање чврстоће смицања објашњен је у делу 2.2.2. У пракси се најчешће користи вршна чврстоћа смицања тла која одговара максималним смичућим напонима у тренутку лома.

2.2.1.2. Параметри чврстоће смицања

Чврстоћа смицања тла је резултат комбинације нанетог нормалног напона, угла унутрашњег трења и кохезије. Coulomb је 1776. године први употребио ове параметре у линеарној зависности (јед. 2.1.). Према овом обрасцу за дато тло кохезија је константна и независна од нормалног напона, док је отпор трења директно пропорционалан нормалном напону ($\sigma_n \tan \varphi$). Чврстоћа смицања тла једнака је највећем напону смицања у тренутку лома, и изражава се једначином:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.1)$$

Где је:

τ_f - напон смицања тла

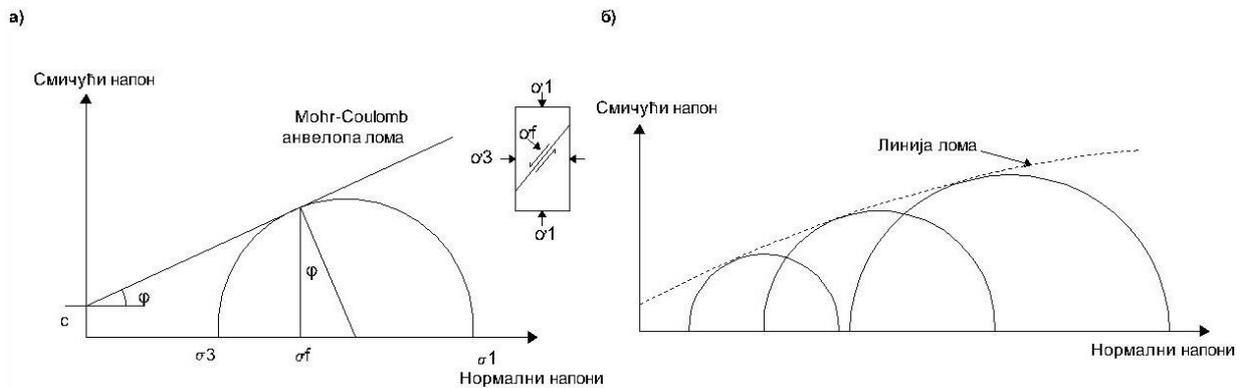
c - кохезија,

σ_n – укупни нормални напон

φ - угао унутрашњег трења.

Culmann (1866) је илустровао стање напона графичком методом, која је даље развијена од стране Mohr-а (1882). Овом методом, стања напона у различитим равнима лома у тлу могу

бити приказани помоћу кругова. Слика 2.11а приказује Mohr-Coulomb-ов критеријум лома у облику дијаграма смичућег напона (τ) у функцији нормалног напона (σ). Сваки полукруг представља напонско стање у тачки унутар тла под одређеним условима оптерећења. Слика 2.11б приказује Mohr-ове кругове напона и линију лома у координатном систему нормални напон - смичући напон (σ - τ). Различити кругови представљају различита напонска стања, а њихова величина и положај указују на интензитет и смер напона. Линија лома представља Mohr - Coulomb-ову анвелопу, која дефинише гранично стање тла и одређује критеријум отпора на лом.



Слика 2.11. Mohr-Coulomb-ова анвелопа лома (Terzaghi, 1996.)

У случајевима засићеног тла, ефективни напон мора бити узет у обзир, па је из тог разлога Terzaghi извршио модификацију основне једначине. Ефективни напон представља део укупног напона који се преноси кроз контактне површине чврстих честица у тлу и представља разлику између укупног напона и порног притиска у тлу. Стога, за ове услове једначина 2.1 је модификована на следећи начин:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (2.2)$$

нпр.

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (2.3)$$

Где је:

τ_f - напон смицања тла

c' - ефективна кохезија,

σ'_n - ефективни нормални напон

u - порни притисак

ϕ' - угао унутрашњег трења за ефективне напоне.

2.2.1.3. Дренирани и недренирани услови

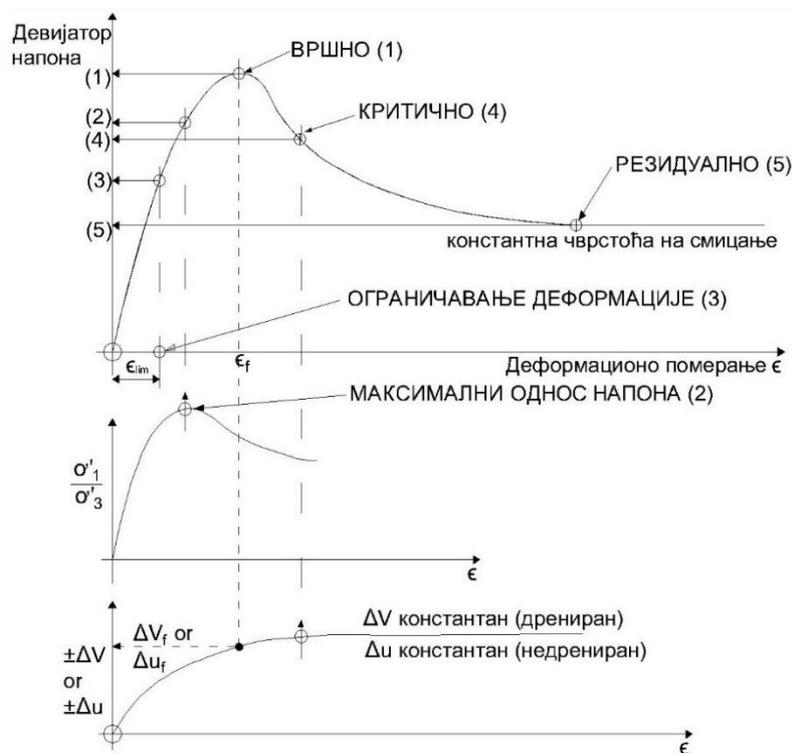
У погледу ефективног напона, понашање при смицању је суштински слично за све врсте тла. Песак се састоји од крупнијих честица, што му омогућава високу водопропусност и добру

дренажу. Са друге стране, глина има ситније честице које задржавају воду и имају ниску водопропусност, што доводи до већег порног притиска у засићеном стању. Ове разлике у физичким својствима, као што су водопропусност и порозност, директно утичу на понашање тла под оптерећењем, у смислу чврстоће смицања и деформабилних карактеристика. Промене запремине услед промене напона подразумевају и кретање воде (дренирање) у оквиру порног простора између честица тла. Временски период који је потребан за такво кретање може варирати, у зависности од водопропустљивости тла. У поређењу с тим, временски период током којег оптерећење узрокује смицање ин-ситу може варирати од неколико секунди за пролазне потресе (земљотреси) до неколико деценија или чак векова (нпр. испод великих темеља на слоју глине велике дебљине).

У лабораторијским испитивањима глиновитих узорка тла опити се могу вршити под дренираним или недренираним условима, у зависности од времена трајања опита и начина уградње узорка. Дренирани услови се обично примењују при испитивању песка (песковити узорци), такође, код песка могуће је применити и испитивање у недренираним условима што се постиже веома брзим смицањем

2.2.2. Критеријуми за одређивање чврстоће на смицање

Параметри чврстоће смицања се бирају у односу на напонско стање и због тога се користе различити критеријуми лома. У овом делу биће представљена четири различита критеријума „лома“, који се користе за одређивање чврстоће тла при смицању. Ови критеријуми су илустровани на Слици 2.12, која представља композитни дијаграм и није везана за одређени тип тла. Сваки од ових критеријума игра кључну улогу у разумевању понашања тла под оптерећењем и омогућава инжењерима да предвиђају могуће механичко понашање тла у различитим условима. Кроз ову анализу, биће обухваћене основне карактеристике и примене сваког од критеријума.



Слика 2.12. Идеализовани критеријуми лома тла (Head, 1992.)

2.2.2.1. Максимални девијатор напона (вршина чврстоћа)

Критеријум максималног девијатора напона или вршина чврстоћа је критеријум који се у пракси повезује са појавом лома током испитивања узорака тла. Овај критеријум се базира на разлици максималних главних напона (Слика 2.12. (1)). Уколико су вертикални и хоризонтални укупни главни напони означени са σ_1 и σ_3 , девијатор напона у тренутку лома је $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, док је одговарајућа деформација означена са ξ_f . У недренираним условима, порни притисак при тој деформацији је означен са u_f , што омогућава прорачунавање максималних главних ефективних напона. Насупрот томе, у дренираним условима, порни притисак остаје непромењен током наношења девијатора напона, тако да су укупни напони једнаки ефективним.

2.2.2.2. Максимални однос главних ефективних напона σ_1' / σ_3'

Ако се главни ефективни напони σ_1' и σ_3' израчунају за сваку серију читавања током недренираног опита, вредности односа главног напона σ_1' / σ_3' могу се представити графички у односу на деформацију као што је приказано на Слици 2.12. (2). На почетку испитивања, однос је једнак јединици, јер је у тој тачки $\sigma_1' = \sigma_3'$. Максимална вредност односа главних ефективних напона се не јавља нужно при истом напону као у случају вршног девијатора напона.

Критеријум максималног односа напона (2) је на неки начин пожељнији од критеријума максималног девијатора напона јер може да обезбеди бољу корелацију чврстоће смицања са другим параметрима, или између различитих типова испитивања. Посебно је користан за глиновита тла у којима девијатор напона наставља да расте при великим деформацијама. Такође се може користити као критеријум у недренираним триаксијалним испитивањима са више фаза.

Однос напона се не користи за дрениране опите, јер су ефективни напони једнаки укупним напонима, а крива односа напона је истог облика као и дијаграм девијаторног напона.

2.2.2.3. Граничне деформације

За тла у којима је потребна веома велика деформација да би се мобилисала максимална чврстоћа на смицање, услов граничних деформација може бити прикладнији од максималног смичућег напона. Лом је тада дефинисан напоном који одговара ограниченој деформацији ξ_{lim} на слици 2.12. (3), а одговарајући Моѓг-ови кругови могу се нацртати за добијање анvelope.

Овај критеријум може бити користан у дренираним триаксијалним испитивањима са више фаза.

2.2.2.4. Критично стање

Критично стање тла (Слика 2.12. (4)) представља стање савршене пластичности, при коме се пластичне деформације смицања одвијају без промене запремине и при константном порном притиску. За тла, уопштено, критично стање је стање у којем тло наставља да се деформише при константној запремини, односно порним притисцима.

2.2.2.5. Резидуално стање (резидуална чврстоћа смицања)

Тла подвргнута смицању у дренираним условима обично показују пораст чврстоће на смицање са повећањем хоризонталних померања све док се не постигне максимални напон (вршна чврстоћа смицања). Ако се померање настави, чврстоћа тла на смицање ће се смањити до минималне чврстоће и остаће константна све док се процес преоријентације честица не заврши. Минимални отпор, резидуална чврстоћа на смицање, је најмањи отпор смицању који тло може да покаже у дренираним условима, односно, константна вредност чврстоће смицања при великим деформацијама.

Резидуална чврстоћа тла је описана у смислу резидуалног угла унутрашњег трења, φ'_r , и резидуалне кохезије, c'_r , на следећи начин:

$$\tau_r = c'_r + (\sigma - u_w)\tan\varphi'_r \quad (2.4)$$

Где је τ_r резидуални напон смицања, c'_r је резидуална кохезија за ефективно напонско стање, σ је нормални укупни напон, u_w порни притисак и φ'_r је резидуални угао унутрашњег трења за ефективне напоне.

По дефиницији, услов резидуалне чврстоће је резултат преоријентације плочастих честица глине паралелно са смером смицања, што резултира повећаном интеракцијом честица лицем у лице (Skempton, 1985). Добијена чврстоћа на смицање је ниска јер је честицама оријентисаним „лицем у лице“ тешко да успоставе контакт или међусобну везу. Као последица тога, контакт честица и везивање који доводе до вредности кохезије веће од нуле су смањени или елиминисани смичућим померањем потребним за постизање резидуалног стања. Ово резултира само отпором на трење који је представљен резидуалним углом унутрашњег трења при ефективном нормалном напону који делује на површину смицања на следећи начин:

$$\tau_r = (\sigma - u_w)\tan\varphi'_r \quad (2.5)$$

Где је τ_r резидуални напон смицања, σ је нормални укупни напон, u_w порни притисак и φ'_r је резидуални угао унутрашњег трења за ефективне напоне.

Међутим, опште је прихваћено да се за пројектовање претпоставља да је вредност кохезије нула у резидуалном стању.

Концепт резидуалне чврстоће на смицање је у великој мери допринео разумевању понашања тла подвргнутих великим померањима у дренираним условима. Ово је генерално повезано са дуготрајном стабилношћу косина у преконсолидованим глинама, и игра важну улогу у процени инжењерских својстава депонованог тла и процени ризика од прогресивног лома у проблемима стабилности.

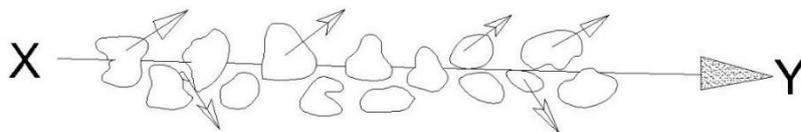
Штавише, неке студије су сугерисале да резидуална чврстоћа на смицање такође може да утиче на адхезију по омотачу шипова у нормално и преконсолидованој глини (Randolph и Wroth, 1981), као и на стабилност цевовода у приобалним срединама (Najjar и сарадници, 2007).

Skempton (1964) је утврдио да је резидуална чврстоћа глина јединствена за одређени ниво ефективног нормалног напона и не зависи од претходне историје консолидације (тј. нормално - NC или преконсолидовано - OC). Ова тврдња је подржана испитивањима на глини из Волтон Вуда (енг. Walton's Wood) који су дали сличне вредности за прерађене, непоремећене узорке и опите на природној површини смицања. Као што је Skempton истакао у свом раду, Tiedmann (1937) је приметио да за глиновити материјал из долине река Весер и Елба ово приближно важи. Међутим, вероватно је Skempton био први који је схватио општи значај ове чињенице.

2.2.3. Механизми резидуалног смицања

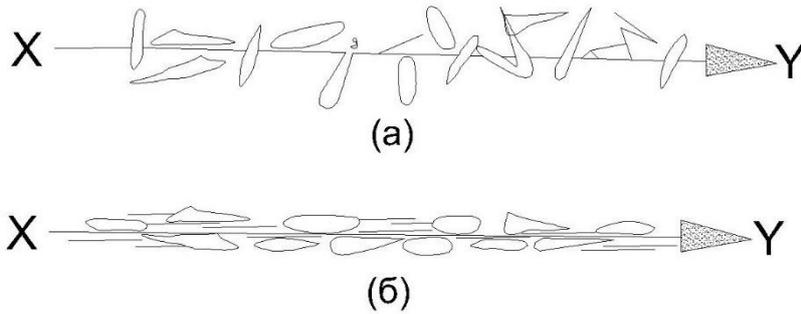
Lupini (1981) је дефинисао два основна механизма понашања тла при резидуалном смицању као и један прелазни, у зависности од величине и облика честица присутних у тлу и трења између плочастих честица. Механизми резидуалног смицања су следећи:

Котрљање: Овај вид понашања се јавља када доминирају масивне и крупне, заобљене или полузаобљене честице. Ове честице имају релативно високе углове унутрашњег трења и минималну склоност да се усмере током смицања. Резидуална чврстоћа је висока, не долази до жељене оријентације честица а смицање се дешава кроз целокупну масу тла, а не само у оквиру одређене равни смицања. Резидуални угао унутрашњег трења при овом начину понашања честица зависи првенствено од облика и уклапања округлих честица (Слика 2.13). Површина смицања, када се једном формира, је само зона различите збијености и знатно је модификована каснијом историјом напона. Овај механизам се често може уочити у песковитом добро гранулисаном тлу и делимично у прашинастом тлу са ниским садржајем глине.



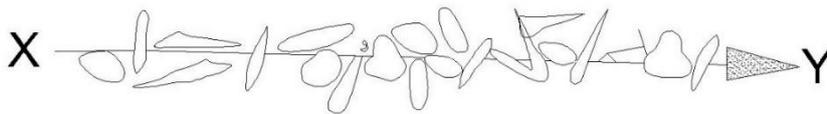
Слика 2.13. Механизам клизања - котрљање

Уређење чврстих честица дуж равни смицања: Овај вид понашања се јавља када дуж клизне равни доминирају плочасте честице са малим трењем (Слика 2.14а.). Ове честице имају изражену склоност да се оријентишу паралелно са смичућом површином током деформације (Слика 2.14б.). Смицање је изражено дуж специфичне, добро дефинисане смичуће површине. Ова површина је обично глатка и полирана због клизања честица глине. Смичући напон је значајно нижи од вршног напона. Резидуални угао унутрашњег трења зависи првенствено од доминантног глиненог минерала, хемијских веза између слободног порног простора и воде и од трења између појединачних честица у тлу. На једном формирану раван смицања, не утиче значајно историјат промене напонског стања. Појава кртог лома током првог циклуса смицања је првенствено због преоријентације честица. Овај механизам се често може уочити у глинама које имају високу пластичност и значајан удео плочастих минерала глине.



Слика 2.14. Механизам клизања - уређење чврстих честица дуж равни смицања а) пре смицања б) после смицања

Прелазно стање између котрљања и уређења чврстих честица дуж клизне равни: Овај вид понашања се јавља када нема доминантног облика честица и укључује котрљање и уређено понашање у различитим деловима зоне смицања (Слика 2.15.). Особине тла при резидуалном смицању се прогресивно мењају у прелазном опсегу од оних код котрљања до оних типичних за уређено смицање. При овом типу понашања, резидуални угао унутрашњег трења је осетљив на мале промене фазног састава тла. Овај механизам се може уочити у многим типовима природног тла са средњим садржајем глиновитих фракција и мешовитом величином честица, као што су прашинасте глине и глиновите прашине.



Слика 2.15. Механизам клизања - прелазно стање између котрљања и уређења чврстих честица дуж клизне равни

3. АПАРАТИ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ ТЛА

Лабораторијска опрема која се користи за одређивање параметара чврстоће тла на смицање, користи се и за одређивање резидуалне чврстоће тла смицања, и то: триаксијални апарат и апарат за директно смицање. Међутим, посебан апарат који се користи само за одређивање резидуалне чврстоће смицања јесте апарат за кружно смицање (узорак у облику диска и прстена). Иако постоји опште правило о ограничењима триаксијалне апаратуре при мерењу резидуалне чврстоће кохезивног тла, неки истраживачи заговарају његову употребу за испитивање чврстоће дуж дисконтинуитета. На пример, Petley (1966) је приметио подударње између триаксијалних испитивања спроведених на претходно припремљеним (предиспонираним равнима смицања) узорцима и стварних површина смицања. Skempton и Petley (1967) су утврдили добро слагање између триаксијалних испитивања на узорцима са дисконтинуитетима и резидуалне чврстоће одређене путем апарата за директно смицање на непоремећеном глиновитом тлу и дисконтинуитетима.

Иако се опит кружним смицањем, у начелу, признаје као најприкладнија метода за одређивање резидуалне чврстоће, неки истраживачи су довели у питање његову практичну примену ван истраживачких сврха. Као алтернативу, неки истраживачи су преферирали једноставност и широку доступност реверсног опита директним смицањем (Herrmann и Wolfskill, 1966; Blondeau и Josseaume, 1976). Употреба апарата за директно смицање у сврху прецизног одређивања резидуалне чврстоће била је предмет испитивања у неколико студија (Hvorslev, 1939; La Gatta, 1970; Garga, 1970; Bishop и сар., 1971, итд.). Међутим, неки истраживачи су описали поклапање између резултата мерења резидуалне чврстоће добијених помоћу апарата за кружно смицање и класичног кутијастог апарата за директно смицање (Townsend и Gilbert, 1973, 1974, 1976; Bucher, 1975; Blondeau и Josseaume, 1976). С друге стране, одређени аутори су приметили разлике у резултатима између ове две методе испитивања, при чему испитивање апаратом за кружно смицање даје ниже вредности угла унутрашњег трења резидуалне чврстоће (Bishop и сар., 1971; Hutchinson, Bromhead и Lupini, 1980). Bishop и сар. (1971) су истакли да су само у случају Cusaracha шкриљаца, глиновитог-шкриљаца, тврде конзистенције, утврдили подударност добијених резидуалних углова унутрашњег трења између ове две различите методе испитивања. У случају лондонских глина, разлика у вредностима резидуалног угла унутрашњег трења φ'_r је износила отприлике 3° , док су Hutchinson и сар. (1980) писали о разлици добијених φ'_r до 7° за Голт (енг. Gault) глину. Криве напон-деформација добијене из опита реверсног директног смицања могу бити сложене за тумачење због поновних „пикова“ (врхова) током промене смера смицања и облика криве (Petley, 1966; Bucher, 1975; Blondeau и Josseaume, 1976; Kenney, 1967; Skempton и Petley, 1967; Bishop и сар., 1971). Blondeau и Josseaume (1976) су сугерисали да се, када су из реверсног опита директним смицањем на непоремећеним узорцима добијене криве напон смицања - хоризонтална деформација сложене за тумачење, може применити алтернативна метода која подразумева предиспонирано дефинисање клизне равни узорка, будући да обично производи уједначеније криве напон смицања – хоризонтална деформација.

Још једна техника коју неки истраживачи користе за одређивање резидуалне чврстоће смицања укључује апарате код којих се смицање обавља на контакту тла и тврде – полиране површине (Kanji, 1974a, 1974b; Kanji и Wolle, 1977; Littleton, 1976; Bromhead 1979, Stark, 2005; Tiwari, 2005; Heidemann, 2022; Fang, 2024). Ова техника узрокује да се честице оријентишу при малим помацама смицања због немогућности да честице тла пређу полирану површину тј. раван смицања, па је на тај начин онемогућено и њихово међусобно преплитање.

Присутност тврде и глатке површине пружа фиксну равнину која усмерава оријентацију честица током смицања.

Уопштено говорећи, апарат за кружно смицање се сматра идеалним апаратом за мерење резидуалне чврстоће смицања због тога што обезбеђује неограничена померања без промене смера смицања. Међу опитима за кружно смицање, опит прстенастим апаратом је пожељнији у односу на апарат за кружно смицање узорка у облику диска (La Gatta, 1970).

Дебљина узорака и поједина ограничења су значајни параметри који класификују опите у две широке категорије: опит размазивања и опит у којем се формира клизна равна по средини узорка. Опити које су спровели Kenney (1967, 1977), La Gatta (1970), Kanji (1974a, 1974b) и Kanji и Wolle (1977), Stark (1994, 2005), Tiwari (2005), Heidemann (2022), Fang (2024), спадају у категорију опита размазивањем. Испитивање апаратом за кружно смицање код којег је клизна површина контакт тло-тврда полирана површина може имати ограничену примену ако тло садржи значајан удео масивних минерала. Townsend и Gilbert (1976), на пример, у свом истраживању су користили и апарате за смицање са размазивањем и са формирањем клизне равни по средини узорка.

Sadreckarimi и Olson (2010) су поделили апарате за кружно смицање према положају равни смицања узорка тла на три типа: Sadreckarimi тип, равна смицања на дну; Bishop тип, са равни смицања у средини; и Bromhead тип, где је равна смицања на врху

3.1. АПАРАТ ЗА ДИРЕКТНО СМИЦАЊЕ

3.1.1. Историјски осврт на развој апарата за директно смицање

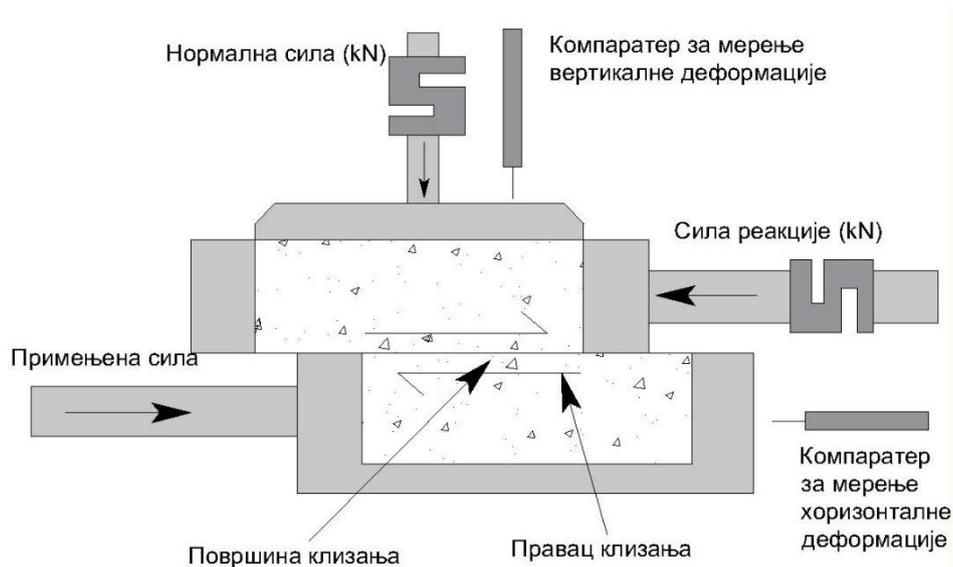
Опит директним смицањем је најстарији и најједноставнији тип лабораторијског испитивања чврстоће смицања. Апарат за директно смицање је концептуално једноставан опит који је коришћен за испитивање тла још 1776. од стране Kulona (Lambe и Whitman, 1969), а посебно га је користио француски инжењер Alexandre Collin 1846. (Skempton, 1956). У Британији, Bell (1915) је забележио прва мерења и конструисао уређај који је требало да буде прототип за каснији развој апарата за директно смицање. Bell је први спровео и објавио резултате испитивања чврстоће на смицање за различите типове тла (Skempton, 1958). Садашњи изглед апарата за директно смицање дизајнирао је Casagrande на Харварду (САД) 1932. године. Апарат са константном брзином деформације који примењује принцип „контролисана деформације“ користећи мотор са фиксном брзином, развијен је 1946. године (Matthews, 2000). Vickers (1984) је развио још један апарат за смицање који омогућује извођење и дренираног и недренираног опита.

Деведесетих година XX века дошло је до напредовања у аутоматизацији апарата за директно смицање. Многе лабораторије су почеле да уводе рачунарске системе који су омогућили бољу аквизицију података и аутоматску контролу брзине смицања. Материјали за конструкцију кутије за смицање су такође побољшани, прелазећи на издржљивије материјале који су смањили спољне утицаје на резултате испитивања. До раних 2000-их, дигитални компаратери и ћелије за мерење силе постали су стандардни у апаратима за директно смицање, побољшавајући тачност мерења и омогућавајући анализу података у реалном времену. Данашњи апарати за директно смицање могу бити веома софистицирани, укључујући карактеристике попут високодефиницијских камера за посматрање померања и обухватнијег софтвера за анализу резултата испитивања. Савремене конструкције често укључују кутије за

смицање које могу да се мењају, што омогућава испитивање различитих врста тла и на узорцима различитих размера, као и прилагођавање за специфичне истраживачке потребе.

Неки од апарата могу да испитују квадратне (Zhang и сар., 2001; Lai, 2004) и/или кружне (Alikonis и сар. 1999; Lai 2004; Kang и сар. 2013; Yuan и сар. 2013; Amšiejus и сар. 2014;) узорке тла, а у оба случаја постоји могућност извођења опита на пробним телима различитих димензија (Liu и сар. 2009; Ohja и Trivedi 2013; Radu и сар. 2014;).

Данас постоји много уређаја различитих произвођача који се користе за извођење опита директним смицањем, који се суштински много не разликују по механизму испитивања. У основи код свих апарата, узорак тла се ставља у калуп за смицање који се састоји од две паралелне кутије. Горњи део кутије је фиксиран док се доња помера паралелно са њом у хоризонталном правцу. Тло се смиче дуж равни за коју се претпоставља да је хоризонтална (Guyer, 2010). Као што је приказано на слици 3.1., хоризонтално померање доње кутије доводи до смањења површине попречног пресека узорка.

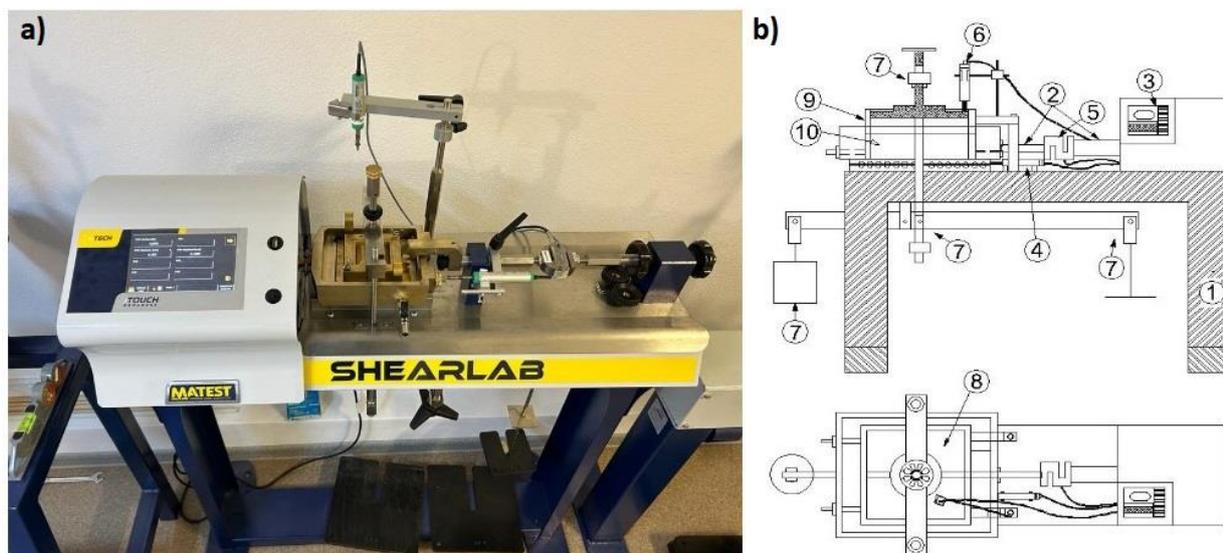


Слика 3.1. Приказ положаја кутије након завршеног опита директним смицањем

Предност опита директним смицањем у односу на друге опите се види у једноставности уградње узорка и опреме која се користи, као и у могућности испитивања под различитим условима засићења, дренарања и консолидације. Мане апарата су неуједначена расподела напона и деформација узорка током смицања. Примењено вертикално оптерећење није у потпуности пренето на читаву површину узорка. Стварна расподела нормалног оптерећења на раван лома у току опита је непозната и не може се извести под условима константне запремине (Amšiejus, 2014).

3.1.2. Апарат за директно смицање са константном брзином деформације

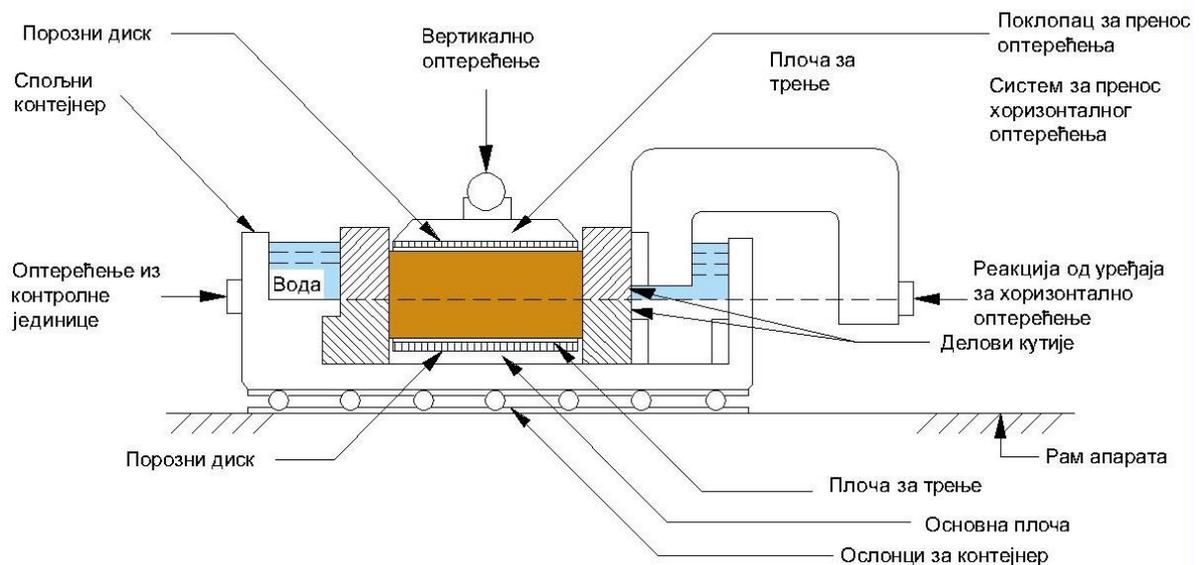
За спровођење лабораторијског испитивања за одређивање параметара резидуалне чврстоће опитом директног смицања у кутији (Слика 3.2.) коришћен је апарат произведен у Италији у фабрици Matest, а састављен је од следећих компонентни:



Слика 3.2. а) Matest-ов апарат за директно смицање; б) 2Д модел апарата за директно смицање (Karimprour, F., 2015 - модификовано)

Легенда: 1 – рам апарата, 2- систем за пренос хоризонталног оптерећења, 3-дигитална контролна јединица, 4- уређај за мерење хоризонталних померања, 5- уређај за мерење хоризонталног оптерећења, 6- уређај за мерење вертикалних померања, 7- систем за пренос вертикалног оптерећења, 8- плочица за пренос равномерног вертикалног оптерећења, 9,10 – кутија за смицање

- **Рам, спољашњи контејнер, кутија за смицање и унутрашње компоненте** израђују се од материјала отпорних на корозију са довољном крутошћу да се одупру дисторзији и деформацији током испитивања. Спољни контејнер треба да омогућава испитивање узорка и порозних дискова (плоче које изазивају трење) који су потопљени под водом. Оквир треба да је наслоњен на контејнер помоћу лежаја ниског трења који омогућава кретање само доње кутије у хоризонталном правцу.
- **Кутија за смицање** (Слика 3.3.) је квадратног облика и подељена је хоризонтално у две круте половине. Конструкција кутије за смицање омогућава: да се две половине кутије за смицање фиксирају заједно и формирају квадратну призму са глатком унутрашњом површином. Горња половина подиже се у односу на доњу половину пре смицања малим, контролисаним вертикалним помаком без нагиба тако да јој се омогући глатко и паралелно кретање са другом половином. Квадратна кутија за смицање ширине је 60 mm и висине 21 mm.
- **Порозни дискови или плоче за трење** постављају се на горњој и доњој површини узорка и омогућавају слободно дренарање воде, истовремено спречавајући продирање честица тла у њихове поре. Горња и доња површина порозних дискова требају да буду равне, чисте и неоштећене. Направљени су од материјала отпорних на корозију и занемарљиве компресибилности под максималним притисцима који се могу применити током испитивања. Порозни дискови су довољно јаки да спрече лом под оптерећењем, и довољно храпави да обезбеде пријањање са узорком, али без изазивања локализованих концентрација напона. Димензије дискова су мање од унутаршњих димензија кутије за смицање да би се спречило везивање за зидове, али довољно велике да спрече истискивање узорка.
- **Поклопац за пренос оптерећења** треба да буде крут и довољно велик да би се вертикално оптерећење једнако расподелило на узорак, а мањи од унутрашњих димензија кутије за смицање тако да може да се нагиње без заглављивања. Поклопац за пренос оптерећења мора имати отворе како би се омогућило слободно одвођење воде из порозних дискова.



Слика 3.3. Типска поставка кутије за директно смицање

• Опрема за оптерећење

- **Вертикално оптерећење** - Систем за вертикално оптерећења омогућује његово одржавање константно током консолидације и смицања. Састоји се од сета тегова и система полууга. Вертикално оптерећење се наноси комбинацијом тегова (масае: 1, 2, 5 и 10 kg) до тачности најмање 1% од предвиђеног напона или 1,0 kPa, у зависности од тог шта је веће, притом водећи рачуна о дозвољеној маси и односу полууга.
- **Хоризонтално оптерећење** - уређај за хоризонтално оптерећење омогућава минимални хоризонтални помак од 15% дужине узорка. Уређај омогућава да се брзина померања одржава у оквиру 10% од предвиђене брзине и да је довољно спора да омогући расипање притиска воде у порама током смицања Опсег брзина померања може да варира од око 0,005 mm/min до 15,0 mm/min.

• Мерни уређаји

- **Уређаји за мерење оптерећења**
 - **Уређај за мерење вертикалног оптерећења** је тачности од 1% од стварне вредности, или унутар 5 N, зависно од тога која је већа вредност.
 - **Уређај за мерење хоризонталног оптерећења** има тачност од 1% од силе смицања при лому или унутар 2,5 N, у зависности од тога која је вредност већа.
- **Уређаји за мерење померања**
 - **Уређај за мерење вертикалних померања** - опсег уређаја је погодан за мерење и приказивање померања до 20% почетне висине узорка, има резолуцију од најмање 0,02% од почетне висине узорка и тачност од најмање 0,2% од почетне висине узорка или 0,02 mm, која год је већа вредност.
 - **Уређај за мерење хоризонталних померања** - хоризонтална померања се мере са тачношћу од 0,1% дужине узорка у смеру смицања или 0,02 mm, која год је већа вредност.

3.2. АПАРАТ ЗА КРУЖНО СМИЦАЊЕ

Основна подела апарата за кружно смицање тла је на статичке и динамичке. Статички апарат за кружно смицање служи за одређивање резидуалне чврстоће тла у условима статичког оптерећења. Овај апарат користи контролисано оптерећење и пружа прецизне резултате о механичким својствима тла, али апарат не подржава динамичке ефекте који могу настати у реалним условима. Динамички апарат за кружно смицање тла симулира примену динамичких сила за процену међусобног деловања честица тла под променљивим оптерећењем. Ова метода је посебно ефикасна за анализу тла у условима који укључују циклусе оптерећења, као што су земљотреси или динамички удари.

3.2.1. Историјски осврт на развој статичког апарата за кружно смицање

Први општи концепт конструкције апарата за кружно смицање предложио је Hvorslev (1936. и 1939.год). Након тога, на бази тог концепта више аутора развило је различите облике апарата La Gata (1970), Bishop и сар. (1971), Bromhead (1979), Savage и Sayed (1984), Hungr и Morgenstern (1984), Tika (1989), Garga и Sendano (2002) (Табела 3.1).

Међутим, апарат за кружно смицање који је конструисао Bromhead (1979) постаје све више коришћен због своје цене и лакоће рада. Bromhead и Curtis (1983) су показали да овај апарат даје резултате који су у складу са онима добијеним коришћењем софистициранијих апарата који су развијени у норвешком геотехничком институту и на Империјал колеџу (Bishop и сар. 1971).

Табела 3.1. Основне карактеристике различитих апарата за кружно смицање

Аутор	Карактеристике				
	Унутрашњи пречник (mm)	Спољашњи пречник (mm)	Висина узорка (mm)	Макс. нормални напон (kPa)	Макс. брзина смицања (cm/s) *(cm/min) ** °/min
La Gata (1970)	50,8	71,1	10,0-25,0	200	0,56*
Bishop (1971)	101,6	152,4	19,0	980	-
Bromhead (1979)	70,0	100,0	5,0	1200	1000**
Hungr i Morgenstern (1984)	220,0	300,0	20,0	200	100*
Tika (1989)	101,6	152,4	19,0	980	9,33
Garga i Sendano (2002)	92,0	133,0	20,0	660	-

Приликом испитивања резидуалне чврстоће на смицање кружним апаратом, прстенести узорак је ограничен између спољашњег и унутрашњег прстена а клизна равна може да се формира са доње и горње стране или по средини узорка, у зависности од конструкције и фиксираности прстенова, као што је илустровано на слици 3.4. Апарати са подељеним прстеном и апарати код којих је прстен јединствен а клизна равна је на врху узорка имају широку примену.



Слика 3.4. Шема механизма за кружно смицање у (а) апарату са једним прстеном са клизном равни на дну узорка; (b) апарат са подељеним прстеном са клизном равни на средини узорка; (c) апарат са једним прстеном са клизном равни на врху узорка (Sadrekarimi, 2010)

3.2.1.1. Развој динамичког апарата за кружно смицање

Sassa и сар. (2004) са Disaster Prevention Research Institute - DPRI (Кјото Универзитет) су од 1984. године развили 7 различитих дизајна апарата за кружно смицање. Први апарат за кружно смицање велике брзине (DPRI-1), користио је конвенционални мотор за контролу брзине смицања којим је било могуће изазвати циклично оптерећење. Први динамички апарат за кружно смицање (DPRI-3) конструисали су 1996. год, који омогућава да се помоћу система контроле, лабораторијски симулирају сеизмички утицаји и мере порни притисци при недренираном опиту. Апарат је касније неколико пута модификован, тако да новији DPRI апарати (до DPRI-7) омогућавају праћење читавог процеса лома узорка почев од познавања иницијалног статичког и динамичког оптерећења, преко лома изазваног смицањем, велика померања и промену порног притиска.

Даљим развојем, апарат за кружно смицање унапређен је од 2010. године, посебно део везан за систем вертикалног оптерећења. Претходна верзија апарата за кружно смицање серије DPRI има дугачки оквир за оптерећење који се састоји од стубова и греде за пренос вертикалног оптерећења. У најновијој верзији апарата за кружно смицање примењено је једноосно вертикално оптерећење кроз једну централну осу. У склопу пројекта SATREPS развијене су две верзије овог новог апарата, под називом ICL-1 и ICL-2. Што се тиче практичне сврхе, обе верзије недренираног динамичког апарата за кружно смицање су значајно мањих димензија (у поређењу са DPRI серијом) али са високим перформансама.

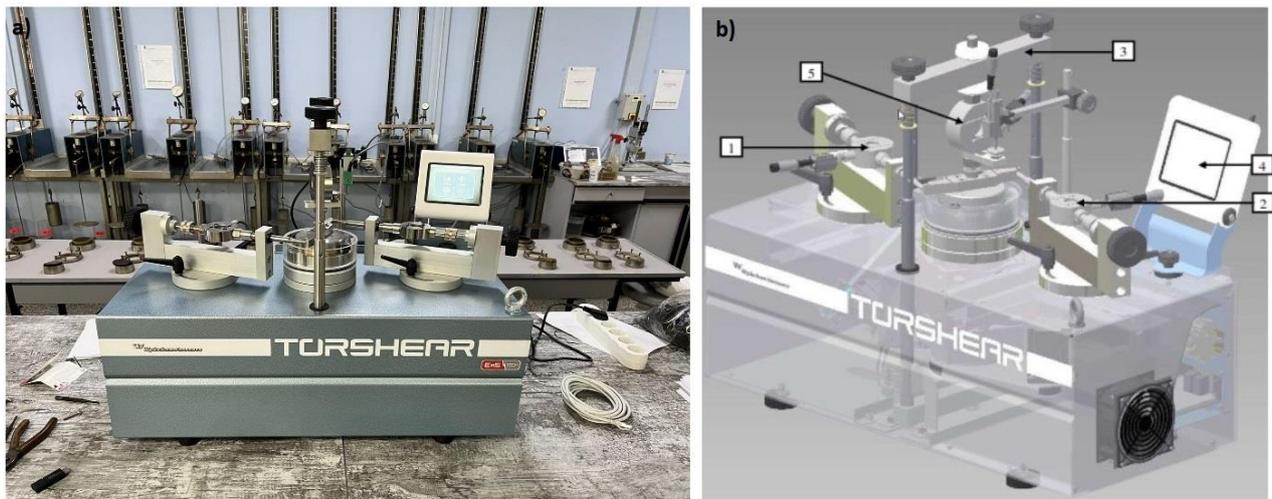
3.2.2. Bromhead-ов апарат за кружно смицање

Апарат за кружно смицање који је коришћен за потребе ове дисертације заснован је на оригиналном дизајну који је развио Bromhead (1979). Произведен је од стране Wykeham-Farrance Engineering Limited и приказан је на Слици 3.5. Узорак је у облику прстена са унутрашњим пречником 70 mm и спољашњим пречником 100 mm. Дренирање узорка је омогућено помоћу два бронзана порозна диска причвршћена на дно доњег дела и на горњи део кутије за смицање.

Узорак се уграђује у кружну ћелију за узорак до површине доњег дела кутије за смицање, која је дубока 5,0 mm. Горњи део кутије се наслања директно на узорак. Као резултат трења горњег порозног диска и узорка јавља се клизна раван на или близу контакта узорак/врх порозног диска. Ово доводи до тога да се раван лома јавља на или близу храпаве површине горњег порозног диска. Овај тип лома се често назива стањем „размазивања“ (Bromhead, 1986), што одговара типу *c*) на Слици 3.4.

Дебљина узорка омогућава испитивање тла које садржи зрна песка са максималним односом 1 : 5 према најмањој димензији узорка, у овом случају висине, која износи 1,0 mm због висине узорка од 5,0 mm.

Bromhead-ов апарат за кружно смицање (Слика 3.5.) састоји се из следећих компоненти:



Слика 3.5. а) Bromhead-ов апарат за кружно смицање б) 3Д модел апарата за кружно смицање (извор: Wykeham Farrance, 2019)

Легенда: 1,2 – ћелија за мерење хоризонталне силе, 3-рам за пренос вертикалног оптерећења, 4- дисплеј осетљив на додир, 5-ћелија за мерење вертикалне силе

- **Рам, посуда за воду, кутија за смицање и унутрашње компоненте** направљени су од материјала отпорних на корозију и довољне чврстоће да би се одупрли дисторзији током испитивања. Посуда за воду у коју се поставља кутија за смицање треба да омогући да се узорак и порозни дискови или плоче за трење неометано смичу у току испитивања.
- **Кутија за смицање** је кружног облика, хоризонтално подељена на доњи део који је фиксиран за рам апарата и горњег дела који се наслања директно на узорак. Конструкција доњег дела кутије за смицање омогућава формирање прстенастог узорка димензија: спољњи пречник 100 mm, унутрашњи пречник 70 mm и висине 5 mm. Горња половина се поставља директно на узорак недодирјући доњи део кутије тако да омогућује глатко и паралелно кретање доње половине кутије
- **Порозни дискови за трење** покривају горњу и доњу површину узорка и омогућавају слободно дренаже воде истовремено спречавајући продирање честица тла у њихове поре. Направљени су од материјала отпорних на корозију и занемарљиве компресибилности под максималним притисцима који се могу применити током испитивања и довољно јаки да спрече лом под оптерећењем. Трење се постиже мрежом дијагоналних уреза (Слика 3.6.);



Слика 3.6. Изглед порозног диска за трење

- **Вертикално оптерећење** Систем вертикалног оптерећења одржава потребно вертикално оптерећења константно током консолидације и смицања. Састоји се од електро-механичког уређаја који постиже максимално консолидационо вертикално оптерећење од 1200 kPa. Максимално вертикално оптерећење у току смицања износи 1000 kPa;
- **Хоризонтално оптерећење** апарат за кружно смицање и уређај за оптерећење омогућавају неограничено хоризонтално кретање ротацијом. Уређај омогућава константну брзину померања која може да буде и довољно спора да омогући расипање порног притиска током смицања. Опсег брзина ротације креће се од 0,00001 °/min до 1000 °/min;
- **Мерни уређаји**
 - *Уређај за мерење вертикалног оптерећења* има тачност од 0,1 N;
 - *Уређаји за мерење хоризонталног оптерећења* имају тачност од 0,1 N;
 - *Уређај за мерење хоризонталних померања*, у апарату за кружно смицање мери се угаоно померање са тачношћу од 0,001 mm и 0,01 °;
 - *Уређај за мерење вертикалних померања* има тачност од 0,001 mm.

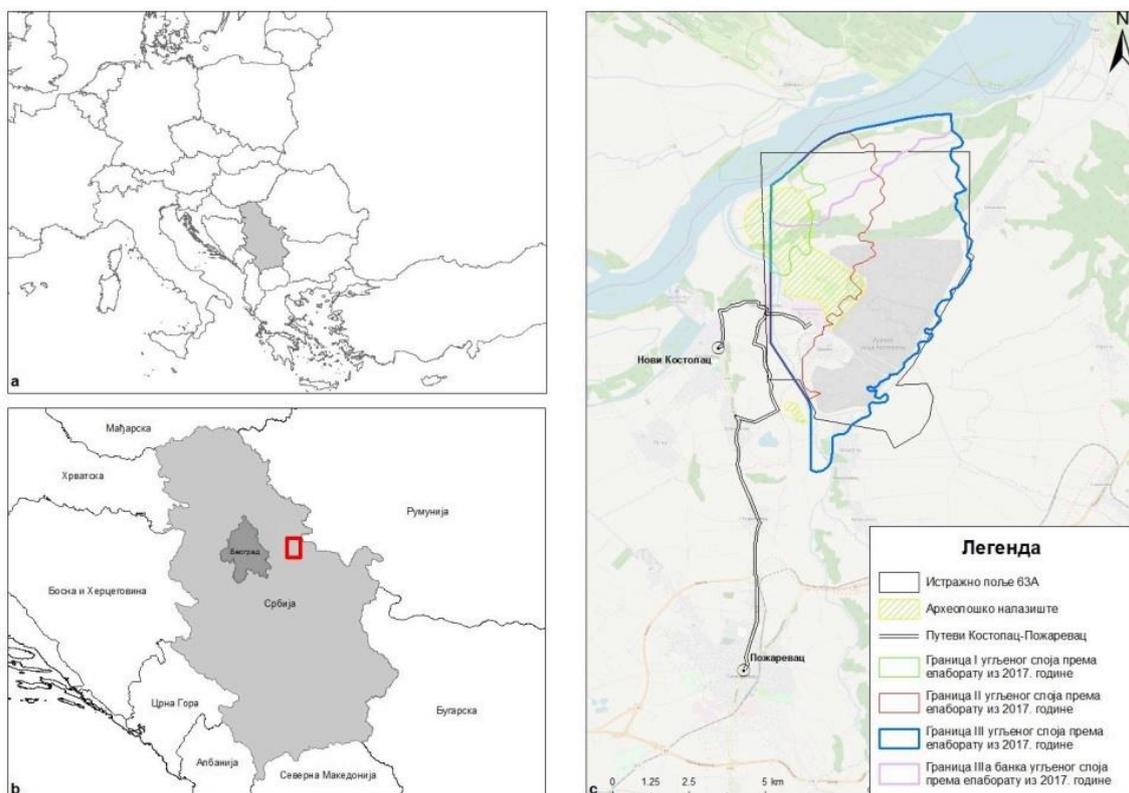
3.3. ПОМОЋНА ОПРЕМА

За извођење лабораторијских испитивања неопходна је прецизна опрема, укључујући вагу са тачношћу од 0,01 g или 0,1 % измерене масе (зависно од веће вредности), секундомер са резолуцијом од 1s и термометар са тачношћу од 1°C. Припрема узорка захтева адекватне алате за резање и обликовање (као што су оштар нож и спатула), квадратни калуп или шаблон (укључујући могућност коришћења дељивог калупа) за обезбеђивање равности узорка унутар 0,5% сваке димензије, као и прецизно помично мерило (аналогно или дигитално) са читљивошћу од 0,1 mm или 0,1 % мерене дужине (зависно од веће вредности). На крају, неопходни су и алати за мешање и збијање, или претходну консолидацију узорка, како би се обезбедили услови за поуздана испитивања.

4. ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКИ ПРИКАЗ ПОВРШИНСКОГ КОПА ДРМНО

4.1. ШИРА ГЕОЛОШКА ГРАЂА

Угљоносно подручје „Дрмно“ упознато је у општим цртама још пре II светског рата. За време окупације вршена су основна геолошка истраживања дубинским бушењем. Лежиште „Дрмно“ је део Костолачко угљеног басена и налази се на десној обали Дунава на око 90km низводно од Београда. Обухвата терен источно од реке Млаве, а границе му чине: Река Дунав на северу, Божевачка Грета на истоку, линија Брадарац – Сировачка долина на југу и река Млава на западу.



Слика 4.1. Положај и распрострањење: а. Србије у односу на Европу, б. лежишта Дрмно у односу на Србију, с. Лежишта (Ђорлука, 2024)

Геолошка грађа лежишта Дрмно (лист Бела Црква, Ракић, 1978) обухвата источни део Костолачког угљоносног басена.

У геолошкој грађи терена (Слика 4.2.) учествују седименти:

- терцијарне (неогене) и
- квартарне старости.

Угљоносна серија је старости горњег понта и лежи конкордантно преко доњопонтских и панонских седимената. Преко угљоносне - продуктивне серије леже седименти плеистоцена и холоцена.

Неогени седименти (Ng)

Седименти неогена констатовани су на дубини преко 1100 m. Најчешће леже трансгресивно преко старије подлоге, палеозојске (девонске) старости. Њих чине:

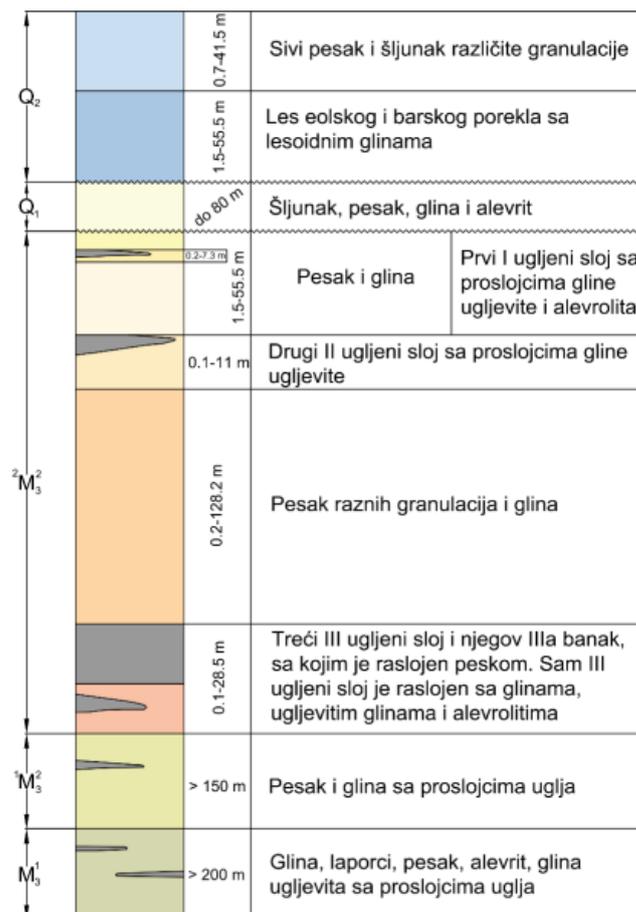
- Пескови, глине, алеврити – панон (M_3^1) – по старој подели M_3^2
- Пескови, угљевита глина и глина – доњи понт ($^1M_3^2$)
- Глиновито-песковита серија – горњи понт ($^2M_3^2$)
- Шљунак, песак, алеврит и глина - плиоцен (P1)

Квартар (Q)

Најмлађи члан је развијен на целом простору површинског копа „Дрмно“ и представљен је плеистоценским и холоценским седиментима. Дебљина квартара процењује се на око 150-190 m.

Плеистоценске седименте (Q_1) чине шљункови, пескови, алеврити и бигар - Кличевачка серија (dpr), барске творевине (b), еолски лесоидни пескови и пескови (lp), еолски лес (l), алувијална тераса: шљункови, пескови и алеврити (at) и барске творевине (b).

Холоцену (Q_2) припадају наслагe еолског песка (на прелазу плеистоцен – холоцен), затим делувијални, пролувијални и алувијални седименти.



Слика 4.2. Синтетички стуб лежишта Дрмно, модификовано (Извор: Стевановић, Д., 2023)

4.2. ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКА ГРАЂА ПК ДРМНО

Лежиште Дрмно изграђују три угљена слоја означена као III, II и I (идући од најстаријег ка најмлађем). Трећи III угљени слој је најдубљи и најстарији. Други II угљени слој се јавља изнад III угљеног слоја, а простире се северозападно од ПК „Дрмно”, односно у близини ТЕ Костолац Б. У крајњем северозападном делу лежишта простире се I угљени слој, који обухвата малу површину (Слика 4.1.).

Трећи угљени слој наталожен је преко глиновито-песковитих седимената доњег понта. У подручју лежишта Дрмно, јединствен је на скоро целом пространству, местимично са прослојцима угљевите глине, прашине и песка. Просечна дебљина угљеног слоја износи 15,80 m. Локално су дебљине угљеног слоја мање од просечне или веће, све до 34,9 m.

Дебљина и број непродуктивних прослојака варирају. Највећи број непродуктивних прослојака јавља се у западном делу лежишта. Прослојци јаловине издвојени у III угљеном слоју су већим делом изграђени од алеврита. Ређе се јављају песковити седименти и то у северном делу лежишта. Глина, као јаловина, у III угљеном слоју јавља се у јужном и централном делу лежишта. У најнижим деловима III слоја јављају се прослојци изграђени од алеврита и угљевите глине.

Други угљени слој простире се у северозападном делу терена и паралелан је трећем угљеном слоју, али неправилно развијен и делимично еродован и уступа место серијама глина горњег понта.

Први угљени слој је дефинисан у крајњем северозападном делу лежишта, и паралелан је са II и III угљеним слојем.

Непродуктивне наслаге се могу поделити на директну откривку, међуслојну јаловину и подину.

Директна откривка - Квартарне творевине представљене су шљунком, песком, местимично глином и лесом. Дебљина ових наслага се креће од 0,75 m до 55,59 m, просечно 18,65 m.

Међуслојна јаловина - Кровину III угљеног слоја изграђује песак са прослојцима угљевите, песковите и лапоровите глине, алеврита и угља. Дебљина овог пакета креће се од 0,12 m до 111,10 m, са средњом вредношћу од 51,26 m. Танки прослојци угља констативани су у нижим деловима овог пакета, односно ближе кровини III угљеног слоја и имају локално распрострањење.

Подину II угљеног слоја карактерише смењивање песка, глине угљевите, глине алевритске и алеврита. Кровину II угљеног слоја, на простору где је развијен, изграђује песак, песак глиновит, глина угљевита, глина лапоровита, алеврит и ретки прослојци угља. Најмлађе горњопонтске седименте изграђују сивоплава глина, песак и глиновити песак са прослојцима угљевите глине и угља.

Подина - У непосредној подини III угљеног слоја су наслаге песка и глине сиве и црне боје (када садрже органску материју), а у оквиру ових слојева појављују се појединачна сочива и прослојци угља.

5. МЕТОДЕ И ПРОГРАМ ИСПИТИВАЊА

5.1. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА ТЛА

Први корак у испитивању резидуалне чврстоће тла је одређивање идентификационо-класификационих карактеристика узорка.

Методe којима се одређују идентификационо-класификационе карактеристике тла су:

- Одређивање влажности тла
- Одређивање запреминске масе тла
- Одређивање граница пластичности
- Одређивање гранулометријског састава

5.1.1. Идентификационо-класификациони опити

5.1.1.1. Одређивање влажности тла

Влажност тла дефинисана је односом масе воде садржане у узорку и масе сувог узорка. Одређивање влажности тла вршено је сушењем на 105°C до постизања сталне масе према стандарду SRPS EN ISO 17892-1:2015.

Влажност узорка тла израчунава се по следећем обрасцу:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \quad (5.1)$$

Где је:

W – влажност, %

m – маса посуде, g;

m_1 – маса посуде са поклопцем и влажним узорком, g;

m_2 – маса посуде са поклопцем и сувим узорком, g;

5.1.1.2. Одређивање запреминске масе тла

Запреминска маса тла представља однос масе и запремине узорка. Одређивање запреминске масе тла вршено је применом методе линеарног мерења према стандарду SRPS EN ISO 17892-2:2015. Одређивање природне запреминске масе вршено је на узорку који се истискује механичким путем из цилиндра за узорковање. Димензије узорка облика правоугаоне призме мере се у најмање три позиције. Код узорак облика цилиндра пречник се мери у два управна правца (на сваком крају и у средини), а дужина се утврђује на три стуба распоређена на око 120° око обима. Прецизност мерења димензија узорака вршена је са тачношћу од 0,1 mm или 0,1% од димензија које се мери, усвајајући већу вредност. Маса узорка мерена је са тачношћу 0,01 g или 0,1 % од укупне масе узорка, већа вредност усвајана је као тачна.

Запреминска маса тла израчунава се по следећем обрасцу:

$$\rho = \frac{m}{V} \times 10^{-6} \quad (5.2)$$

где је:

ρ – природна запреминска маса, Mg/m³;

m – маса узорка, g;

V – запремина узорка, m³.

Сува запреминска маса срачуната је из односа масе узорка након сушења и запремине узорка.

Запреминска тежина тла одређена је рачунским путем множењем запреминске масе тла и гравитационог убрзања $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

5.1.1.3. Одређивање граница пластичности

Одређивање границе течења (*LL*) и границе пластичности (*PL*) вршено је према стандарду Геотехничка истраживања и испитивања – лабораторијско испитивање тла SRPS EN ISO 17892-12. Граница течења одређена је методом конуса. За одређивање границе течења коришћено је око 200 g природног тла ситнијег од 0,4 mm (или 0,425 mm). Опсег пенетрације конуса као и дозвољена максимална разлика између два узаступна мерења у зависности од типа конуса приказана ја у табели 5.1.

Табела 5.1. Типови конуса и њихове димензије

Тип конуса	60g/ 60 °	80g/ 30 °
Дозвољени опсег пенетрације конуса	7 mm до 15 mm	15 mm до 25 mm
Граница течења (<i>LL</i>) одређена на дубини пенетрације	10 mm	20 mm
Максимална разлика између два узаступна читавања	0,4 mm	0,5 mm

Одређивање границе течења извршено је конусом од 80g са углом од 30°.

Граница пластичности одређена је методом ваљања. Количина узорка коришћена за овај опит износила је око 15 g до 20 g. Поступак ваљања вршен је до постизања критеријума да је пречник формираног ваљка 3 mm а тачна крајња тачка испитивања је када ваљци почну да се распадају односно да се на њима јављају пукотине. Код оба опита садржај воде репрезентативног дела узорка утврђен је у складу са SRPS EN ISO 17892-1:2015.

Израчунавања карактеристичних индекса тла вршено је према следећим обрасцима:

- Индекс пластичности $I_p = LL - PL \quad (5.3)$

- Индекс конзистенције $I_c = \frac{LL-w}{I_p} \quad (5.4)$

- Индекс течења
$$I_L = \frac{w - LP}{I_L} \quad (5.5)$$

5.1.1.4. Одређивање гранулометријског састава

Одређивање гранулометријског састава тла вршено је према стандарду SRPS EN ISO 17892-4. Методе испитивања утврђене су на основу критеријума:

- Ако узорак има мање од око 10% честица мањих од 0,063 mm, обично се не захтева испитивање хидрометрисањем;
- Ако узорак у целости пролази кроз сито од 2 mm и има мање од око 10% честица већих од 0,063 mm, испитивање просејавањем се не врши;
- За све остале узорке треба извршити комбинацију испитивања просејавањем и хидрометрисањем како би се утврдио гранулометријски састав.

Метода просејавања вршена је лабораторијским ситима за просејавање према стандарду ISO 3310-1 и ISO 3310-2 заједно са одговарајућим дном, пратећи препоруке стандарда ISO 14688-1 који прописује граничне величине за крупнозрне материјале. Метода хидрометрисања вршена је са хидрометром опсега мерења између 0,995 g/ml и 1,030 g/ml са линијама за читавање у интервалима од 0,0005 g/ml.

5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА РЕЗИДУАЛНЕ ЧВРСТОЋЕ ТЛА

У оквиру истраживаног подручја, издвојене су четири карактеристичне геотехничке средине кровинских седимената: песак, алеврит, сива глина, песковита прашина. Испитивања су спроведена на по три прерађена узорка за сваку средину. Уз то, у апарату за директно смицање испитан је по један непоремећен узорак из слоја алеврита и сиве глине, како би се упоредили подаци добијени смицањем поремећених (прерађених) и непоремећених узорака.

Пре почетка испитивања, за све узорке је одређена влажност и природног и вештачки припремљеног материјала како би се осигурала конзистентност услова испитивања.

5.2.1. Фазе испитивања у апарату за кружно смицање

Припрема узорка и консолидација

Прерађени узорци за испитивање припремљени су прво сушењем на ваздуху, а затим уситњавањем тла у авану. Узорци кохерентног тла су затим просејани кроз сито отвора 1,0 mm, помешани са дестилованом водом до жељене влажности и остављени да се хидрирају најмање 24h. Узорци некохерентног тла (песак) су одмах након мешања са дестилованом водом уграђивани у апарат за директно смицање.

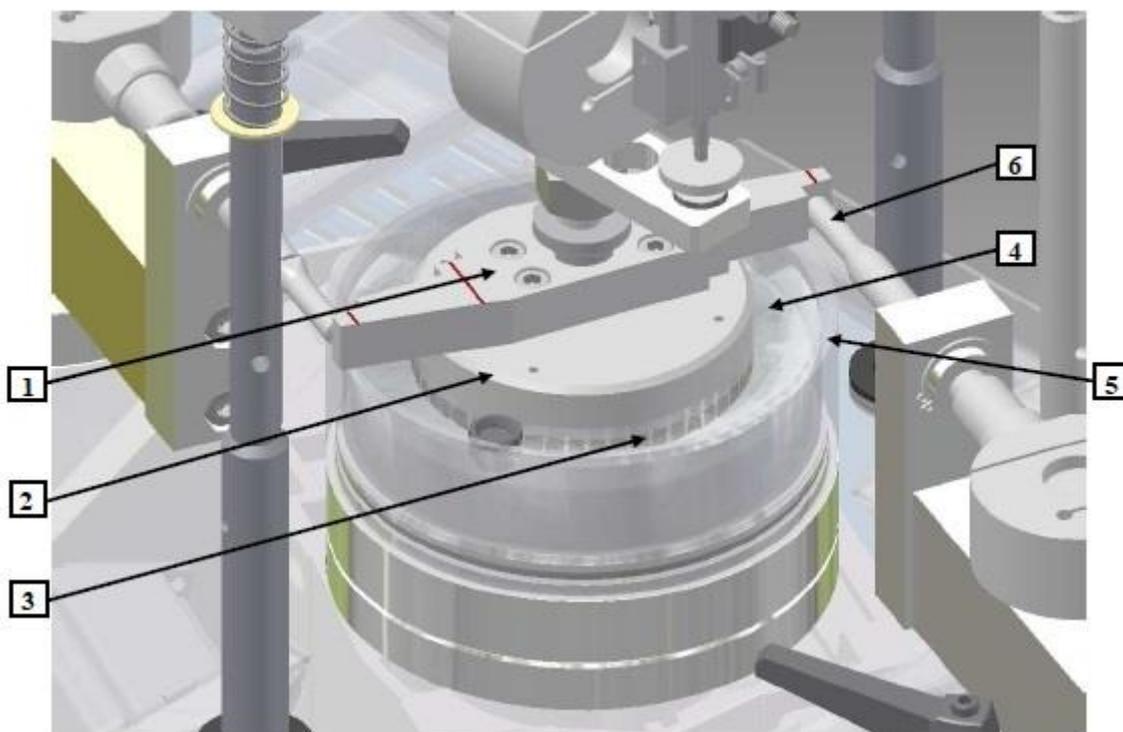
Stark (1992) је предложио модификацију која подразумева ограничавање утискивања горњег порозног камена, услед консолидације или истискивања тла, на 0,75 mm. Ово минимализује трење између зидова (главни фактор који утиче на измерену резидуалну чврстоћу) које се развија дуж унутрашњег и спољашњег зида кутије и горњег порозног камена. Овај критеријум је усвојен и у овој дисертацији. Да би се избегла већа иницијална консолидација (узорак се уграђује на граници пластичности), пре саме уградње у апарат за кружно смицање узорак се консолидовао у едометарском апарату пречника 100,0 mm и висине 40,0 mm. Материјал је

пажљиво и равномерно распоређен по целој површини едометарског калупа. Уграђена су 4 пробна тела и свако је вертикално оптерећено са различитим вертикалним оптерећењем. Прво пробно тело је оптерећено са 50 kPa, друго са 100 kPa, треће са 200 kPa а последње са 400 kPa. Пробна тела се оптерећују у периоду од 24h. Опит консолидације је извршен у складу са стандардом SRPS EN ISO 17892-5:2015.

Након 24h изграђена су пробна тела из едометарског апарата. Прстеном спољног пречника 70,0 mm исечен је унутрашњи део пробног тела и уграђен у апарат за кружно смицање.

Доњи део кутије апарата је постављен на подесан сто. Припремљени узорак је уграђен између спољњег и унутрашњег прстена и поравнат ножем за равнање. После тога доњи део кутије апарата постављен је у одговарајући положај на апарату, причвршћен је са шрафовима и постављена је пластична посуда за воду.

Узорак је прекривен горњим делом кутије (главом апарата). Када је постављена глава апарата, на њу се монтира греда за пренос вертикалног оптерећења. На крају је фиксиран компаратер за мерење вертикалних деформација као и уређај за мерење хоризонталног оптерећења и тиме је припрема за испитивање готова (Слика 5.1.).



Слика 5.1. Изглед припремљеног апарата за испитивање (извор: Wykeham Farrance, 2019)
Легенда: 1-торзиона греда, 2-горњи део кутије (глава апарата), 3-порозни диск, 4-контејнер за узорак, 5-водено купатило, 6-ослонац за читање обртне силе

По завршеној припреми, пластична посуда за воду се напуни водом.

Пробно тело се консолидује под истим оптерећењем као у едометарском апарату у трајању од 4 сата или док се не обави примарна консолидација, тј. не достигне константна вредност слегања за одређени временски период.

Смицање

Приликом дефинисања брзине смицања за ситнозрне материјале анализирани су резултати доступни у литератури. Ramiah и сар. (1970) су објавили да на измерену резидуалну чврстоћу на смицање није утицало повећање брзине померања са 0,02 на 60 mm/min. Skempton (1985) је закључио да постоји мање од 5% варијације у вредности угла унутрашњег трења за брзине смицања у распону од 0,05 до 0,35 mm/min. Stark и Eid (1994) су користили брзину смицања од 0,018 mm/min за резидуално смицање Bromhead-овим апаратом за кружно смицање. Јапанско геотехничко друштво (2010) предлаже брзину смицања од 0,02 mm/min за испитивање директног смицања. У лабораторијским испитивањима, према утицају брзине смицања на смичућу чврстоћу, брзина смицања мања од 1 mm/min се сматра спором, брзина између 1 и 100 mm/min средњом, а брзина већа од 100 mm/min брзом (Li, 2016). При одабиру брзине смицања постављен је критеријум да брзина треба да буде довољно спора да омогући расипање вишка порног притиска на раван лома током времена смицања. Да би се дошло до прихватљиве брзине смицања, у оквиру ове дисертације, прерађени узорци су испитивани при брзини смицања од 0,02 mm/min.

За опит кружним смицањем, Bromhead (1992) је закључио да ако је обртни момент смицања константан више од 1h, онда је у питању резидуална чврстоћа на смицање. У овом раду, узорци за испитивање су смицани до померања од око 360° или док утискивање горњег порозног камена у кутију узорка није прешло границу од 0,75 mm.

Након завршетка опита одређена је влажност из репрезентативног дела узорка, у складу са SRPS EN ISO 17892-1:2015.

5.2.2. Апарат за директно смицање

Припрема узорка и консолидација

Прерађени (поремећени) узорци за испитивање припремљени су прво сушењем на ваздуху, а затим уситњавањем тла у авану. Узорци кохерентног тла су затим просејани кроз сито отвора 1,0 mm, помешани са дестилованом водом до жељене влажности и остављени да се хидрирају најмање 24h. Узорци некохерентног тла (песак) су одмах након мешања са дестилованом водом уграђивани у апарат за директно смицање.

Непоремећена пробна тела су припремљена исецањем узорка из блока помоћу калупа водећи рачуна да не дође до деформисања узорка током сечења и скраћивања. Калуп и резач су квадратног облика. Након уклањања резача, крајеви су обрађени ножем и проверени да буду равни и поравнати са сваким крајем калупа.

Кутија апарата је склопљена и постављена на радни сто а пробно тело истиснуто из калупа у кутију узорка. Преко узорка се постављају плоча за трење, порозни диск и капица за пренос вертикалног оптерећења. Након тога кутију апарата сам поставио на одговарајући положај на апарату и причврсти са шрафовима.

Преко постављене капице је монтиран рам за пренос вертикалног оптерећења. Фиксирани су компаратери за мерење вертикалних и хоризонталних деформација и уређај за мерење хоризонталног оптерећења и тиме је припрема за испитивање готова.

По завршеној припреми, контејнер са кутијом за узорак је напуњен водом.

За сваки узорак су уграђена по 4 пробна тела од којих је сваки консолидован са различитим вертикалним оптерећењем (50, 100, 200 и 400kPa).

Смицање

Приликом одабира брзине смицања, усвојена је иста брзина која је примењена код испитивања узорка на апарату за кружно смицање (0,02 mm/min). Након достизања максималног смичућег напона наставља се смицање док се не достигне пуни ход кутије за смицање. Кутије су враћене у почетни положај обрнутим правцем кретања. Брзина обрнутог помака није била већа од брзине помака до вршне силе смицања. Током смицања узорак је константно држан под претходно задатим вертикалним оптерећењем.

Опит је изведен у складу са стандардом SRPS EN ISO 17892-10:2019, тј. док се не постигне константна вредност силе смицања у два узастопна опита, што се обично дешава после 4-6 циклуса смицања.

Након завршетка опита одређена је влажност из репрезентативног дела узорка, у складу са SRPS EN ISO 17892-1:2015.

5.2.3. Резидуално смицање

Резидуална чврстоћа смицања (τ_r) може се одредити апаратима за директно и кружно смицање на следећи начин:

5.2.3.1. Апарат за кружно смицање

Резидуална чврстоћа смицања се постиже континуалним кружним смицањем у једном правцу при константној брзини померања све док се не достигне поновљива вредност силе смицања.

Код апарат за кружно смицање за време испитивања површина пресека узорка остаје константна, те се напони смицања изазивају обртним моментом.

Формула којом се рачуна резидуална чврстоћа смицања:

$$\tau_r = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (5.6)$$

где је:

τ_r – резидуална чврстоћа смицања, kPa;

F_1, F_2 – очитана сила на крајевима греде за пренос обртног момента, N;

R_1, R_2 – унутрашњи и спољашњи пречник узорка, mm;

L – дужина греде за обртни моменат, mm.

5.2.3.2. Апарат за директно смицање

Резидуална чврстоћа може се одредити смицањем у кутији помоћу вишеструког смицања све до постизања константне вредности током два узастопна опита и та вредност се усваја као резидуална сила смицања.

Формула којом се рачуна резидуална чврстоћа смицања:

$$\tau_r = \frac{P}{A} \quad (5.7)$$

где су:

τ_r - резидуална чврстоћа смицања, kPa;

P - хоризонтална смичућа сила, N;

A - површина попречног пресека узорка, mm.

5.2.3.3. Секантни резидуални угао унутрашњег трења

Hawkins i Privett (1985) су утврдили да тла богата глиновитим честицама показују закривљене анвелопе лома, при чему је максимална закривљеност испод 200 kPa ефективног нормалног напона. Неколико других студија је потврдило ово запажање закривљених анвелопа, укључујући Garga (1970), Skempton и Petley (1967), Hutchinson (1969), Chandler (1969), Bishop (1971) и Kenny (1967). Townsend и Gilbert (1973) су у свом раду интерпретирали резултате праволинијским анвелопама лома за америчке глиновите шкриљце, док су Lupini и cap. (1981) изабрали да изразе анвелопу лома "линеарно, са добром апроксимацијом". Bromhead и Curtis (1983) су такође приказали варијације, приметивши праволинијску анвелопу за браон лондонску глину и закривљену за сиве узорке. Аутори предлажу дефинисање анвелопе лома тла користећи осе τ_r/σ_n и σ_n (где је τ_r/σ_n коефицијент резидуалног трења, Lupini и cap, 1981). Испитивање треба почети при ниским ефективним нормалним напонима и наставити док се не дефинише анвелопа лома. Аутори истичу да треба узети у обзир цео дијаграм смицања при дефинисању резидуалне чврстоће тла, извлачећи вредности секантног резидуалног угла унутрашњег трења $\varphi_{r,sec}$ (5.8) из одговарајућег ефективног нормалног напона за сваки специфичан проблем стабилности косине.

Овај приступ претпоставља да не постоји резидуална кохезија, што доводи до следеће формуле за израчунавање секантног резидуалног угла трења:

$$\varphi_{r,sec} = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_r}{\sigma_n} \right) \quad (5.8)$$

Где су:

τ_r - смичући напон, kPa

σ_n - нормални напон, kPa

5.3. МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ СТАБИЛНОСТИ КОСИНА

5.3.1. Опште

Анализа стабилности косина неизоставна је приликом пројектовања и димензионисања радних и завршних косина на површинским коповима као и приликом димензионисања косина насипа и ископа при осталим геотехничким радовима. Њен циљ је проценити стабилност и сигурност косина као и услове који могу довести до њиховог клизања. На основу анализе стабилности косина могуће је дефинисати отпор неке косине клизању односно лому косине.

Данас постоји много метода за проверу анализе стабилности косина. Уопштено, као главна подела могу се навести (Eberhardt, 2003):

- Методе граничне равнотеже,
- Нумеричко моделовање (методе континуума и дисконтинуума)

Да би се поједине методе могле користити потребно је добро познавати њихове могућности и ограничења. На пример, методе граничне равнотеже најчешће се користе за једноставније проблеме, док код комплексних механизма лома (појава консолидације, пузања, ликвефакције и сл.) ове методе нису адекватне.

5.3.2. Опште о методама граничне равнотеже

У данашњој пракси најчешће се примењује 2D анализа стабилности косина која подразумева равно стање деформација (методе граничне равнотеже) због своје једноставности и општег разумевања. Прорачун подразумева одређивање фактора сигурности користећи једначине статичке равнотеже (Reyes и Parra, 2014). Фактор сигурности вредности један ($F_s=1$, 0) се притом дефинише као минимална вредност да би косина била стабилна, што подразумева да је на граници клизања. За сваку методу се фактор сигурности дефинише овим односом (UNIRI, 2018):

$$F_s = \frac{\text{Силе које се одупиру кретању}}{\text{Силе које изазивају кретање}} \quad (5.9)$$

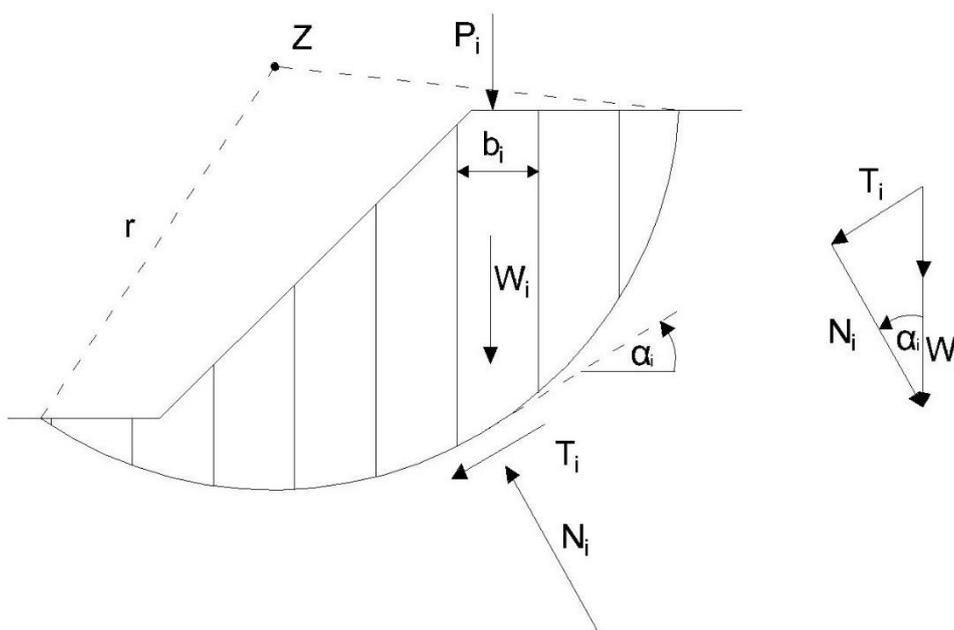
Методе граничне равнотеже, а међу њима најчешће примењивана „метода ламела“, се темеље на статички одређеном систему вертикалних ламела код којих се занемарује њихова крутост (Јуричић, 2017). Претпоставља се да је клизно тело крути блок на којем се расположива смичућа чвстоћа активира у истој вредности дуж читаве клизне равни уз константни фактор сигурности (Leninger, 2016).

Методе које се најчешће користе за прорачун стабилности нехомогених косина у тлу су:

- Метода Феленијуса
- Метода Бишопа
- Метода Јанбуа
- Метода Моргенстерн-Прајса
- Метода Спенсера

5.3.2.1. Упростиена Бишопова метода

Бишопова метода је прорачунска метода заснована на принципу граничне равнотеже. Клизно тело се сматра крутим телом које ротира око центра круга, а сила клизања и сила против клизања израчунавају се у свакој ламели водећи рачуна о параметрима смичуће отпорности (слика 5.2). Фактор сигурности косине добија се итеративним прорачуном (низом узастопних проба). Претпоставља се да на вертикалним странама ламела делују само хоризонталне силе које су нормалне на вертикалну раван ламеле а да се вертикалне смичуће силе дуж ових равни занемарују односно једнаке су нули. Бишопова метода (Bishop, 1955) се и даље сматра једном од „једноставнијих“ метода ламела. Међутим, упростиена Бишопова метода увек даје факторе сигурности кружних клизних површина у доброј сагласности са онима датим другим „сложенијим“ методама ламела као што су Моргенстерн-Прајса метода (Morgenstern i Price, 1965) и Јанбуова упростиена метода (Janbu, 1954).



Слика 5.2. Шематски приказ сила за прорачун стабилности косине по Бишоповој упростиеној методи

Разлика између међуламеларних сила је према Бишопу занемарљива јер не утиче значајно на резултат. Према томе фактор сигурности F_s је:

$$F_s = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i \frac{c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_i}{F_s}} \quad (5.10)$$

Где је:

F_s – фактор сигурности

b_i – ширина ламеле

W_i - тежина ламеле

c' – ефективна кохезија

u_i - порни притисак

α_i - угао клизне површине

φ' – ефективни угао унутрашњег трења

У једначини 5.10 фактор сигурности се налази са обе стране и стога се он, најчешће решава сукцесивним апроксимацијама.

Прорачуни су спроведени помоћу рачунарског програма „Slide 2D” верзија 9,023 фирме Rocscience Inc. Коришћена је Бишопова упрошћена метода која након графичког уноса кружне клизне равни проналази оптимизовано решење.

5.4. МЕТОДЕ СТАТИСТИЧКЕ ОБРАДЕ

Поред дескриптивне статистике, у дисертацији су испитиване статистичке зависности између параметара резидуалне чврстоће смицања, садржаја глиновитих, прашинастих и песковитих фракција, индекса пластичности и границе течења. Спроведена је регресиона анализа ради утврђивања односа између резидуалних параметара чврстоће смицања добијених у апарату за директно смицање и апарату за кружно смицање, као и између резидуалних параметара чврстоће смицања и садржаја глиновитих, прашинастих и песковитих фракција, индекса пластичности, границе течења и комбинованог индексног параметра *CALIP*.

Дескриптивна статистика и регресиона анализа спроведене су у програму Microsoft Office Excel 2013 (произвођач: Microsoft Corporation).

Функционалне везе између анализираних параметара утврђене су применом следећих корака:

- Дефинисање линеарног регресионог модела;
- Одређивање статистички значајне повезаности између променљивих на основу коефицијента корелације (R^2) (Табела 5.2);
- Уколико је R^2 већи од 0,5, примењена је нелинеарна регресиона анализа и одабран модел на основу критеријума најбољег уклапања и поређења са релевантним литературним моделима и који најбоље описује зависност између варијабли. Везе са R^2 мањим од 0,5 сматране су статистички незнатним, те стога нису даље анализирани;
- Јачина статистичке зависности оцењивана је према емпиријским правилима наведеним у Табели 5.2.

Табела 5.2. Емпиријска правила за оцену јачине везе (Вујић, Ивић 1991).

Коефицијент корелације (R^2)	Оцена везе
До 0,5	Незнатна корелациона веза између променљивих, несигурност је значајна
0,5-0,7	Показује значајну корелациону везу, несигурност је мања
0,7-0,8	Показује јачу корелациону везу, може имати практичну важност
0,8-0,9	Показује јаку корелациону везу, има практичну важност
0,9-1,0	Показује врло јаку корелациону везу, има високу практичну важност

По извршеном одабиру модела, уследило је детаљно поређење између модела добијеног у овој дисертацији и релевантних литературних модела, при чему су коришћене вредности параметара добијене са ПК Дрмно. Ово поређење омогућује идентификацију предности и недостатака модела развијеног у овој дисертацији у односу на постојеће моделе.

5.4.1. Комбиновани индексни параметар *CALIP*

Закључивши да сва три параметра (садржај глиновитих фракција F_G , индекс пластичности I_p , и граница течења LL) имају утицај на резидуалну чврстоћу тла, Collota је 1989. год предложио корелацију која комбинује F_G , LL и I_p на следећи начин:

$$\varphi'_r = f(CALIP) \quad (5.11)$$

Где је:

$$\varphi'_r = (F_G)^2 \cdot LL \cdot I_p \cdot 10^{-5} \quad (5.12)$$

Где су:

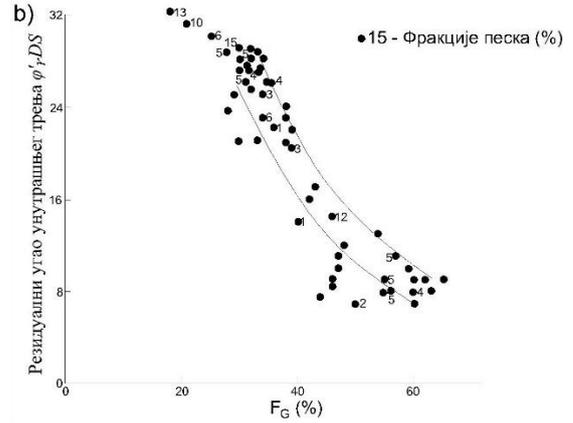
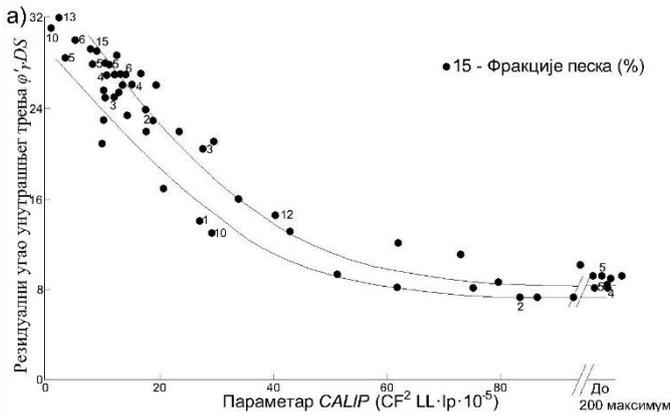
F_G – проценат учешћа глиновитих фракција, %

LL – граница течења, %

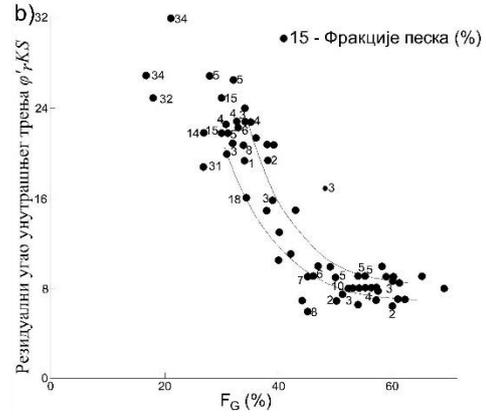
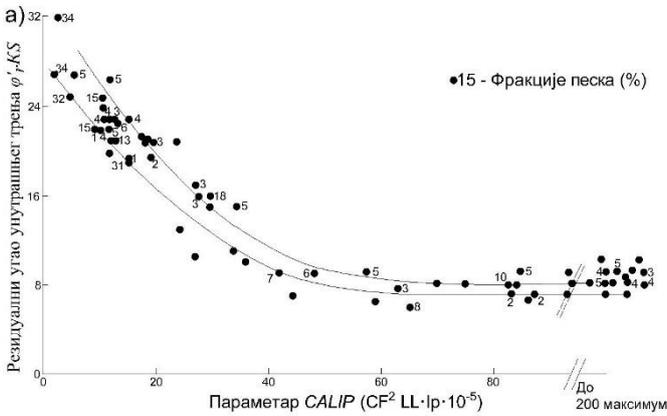
I_p – индекс пластичности, %

Ова корелација, развијена коришћењем података са преко 150 узорака са 20 локација у Италији, посебно је корисна за брзе процене када опсежна лабораторијска испитивања нису изводљива. Collota истиче да су претходне корелације између φ'_r и фактора као што су садржај фракција глине, индекс пластичности и граница течења, приликом утврђивања трендова показивали значајно расипање података, ограничавајући њихову практичну примену (Слике 5.3а – 5.4b).

Предложена корелација, како је Collota истакао, показује блажи нагиб и мање расипање података у односу на претходне корелације (Слике 5.3а и 5.4а). Ова побољшана корелација је, међутим, применљива само на тлу са гранулометријским саставом где преко 80% честица пролази кроз сито N40 ASTM (0,420 mm).



Слика 5.3. Однос резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за директно смицање и а) параметра CALIP, б) проценат учешћа фракција глине (F_G) (Collota, 1989)



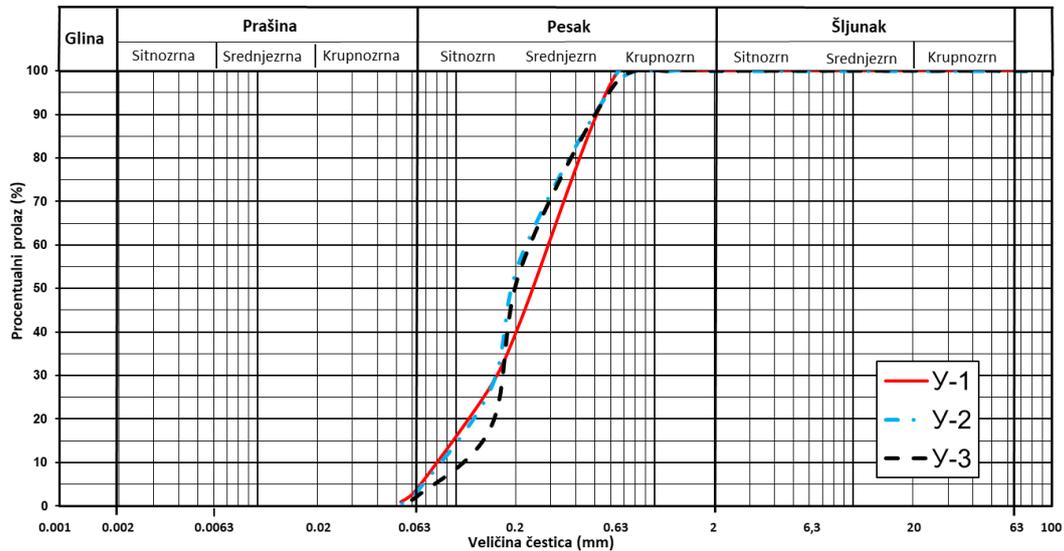
Слика 5.4. Однос резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за кружно смицање и а) параметра CALIP, б) проценат учешћа фракција глине (F_G) (Collota, 1989)

6. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

6.1. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА ТЛА

6.1.1. Пескови

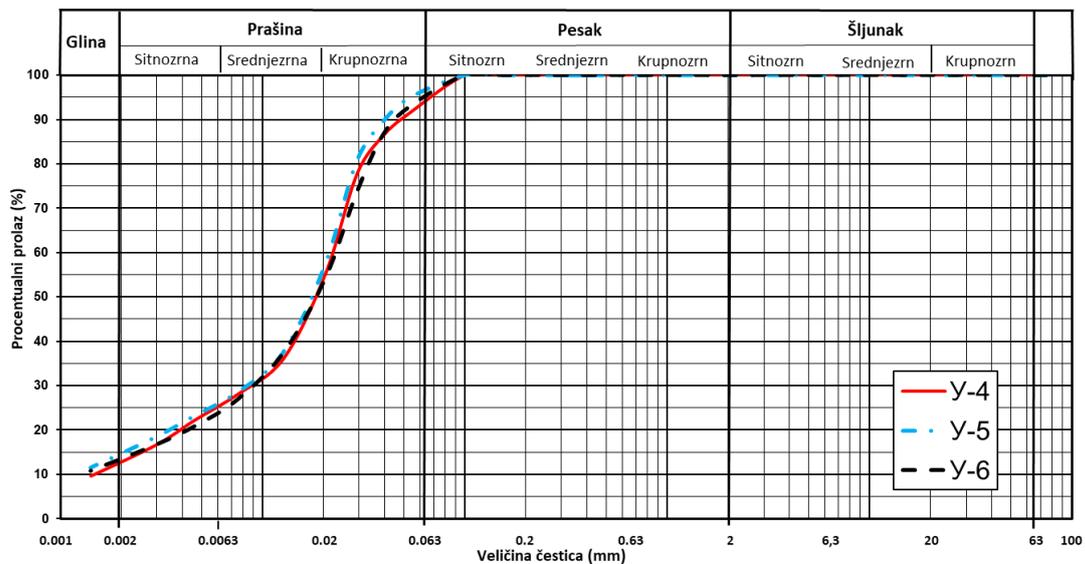
Спроведена анализа гранулометријског састава показује да узорци песка садрже 2-3% фракција прашине и 97-98% песковитих фракција (Слика 6.1.).



Слика 6.1. Дијаграм гранулометријског састава - песок

6.1.2. Алеврити

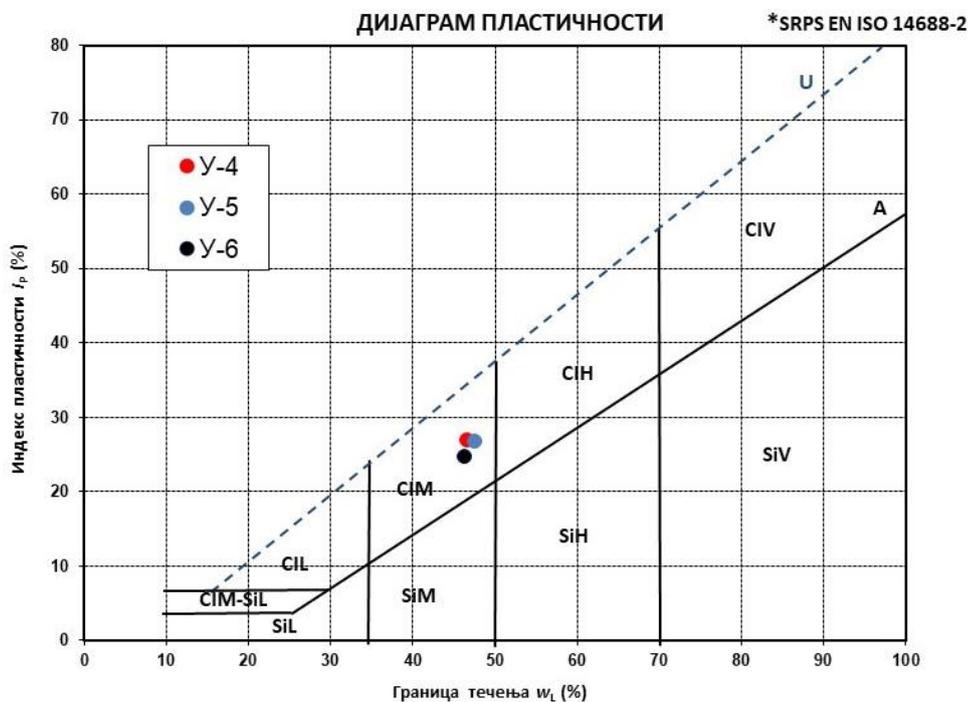
Спроведена анализа гранулометријског састава показује да узорци алеврита садрже 13-15% фракција глине, 81% фракција прашине и 4-6% песковитих фракција (Слика 6.2.).



Слика 6.2. Дијаграм гранулометријског састава - алеврит

Поред тога, одређиване су и пластичне карактеристике узорака. Вредности индекса пластичности се крећу у распону $I_p=24,7 - 26,9\%$ а индекса конзистенције $I_c=0,843 - 0,942$. На основу вредности индекса конзистенције, могло би се закључити по Terzaghi-ју да је материјал у тврдо пластичном стању конзистенције.

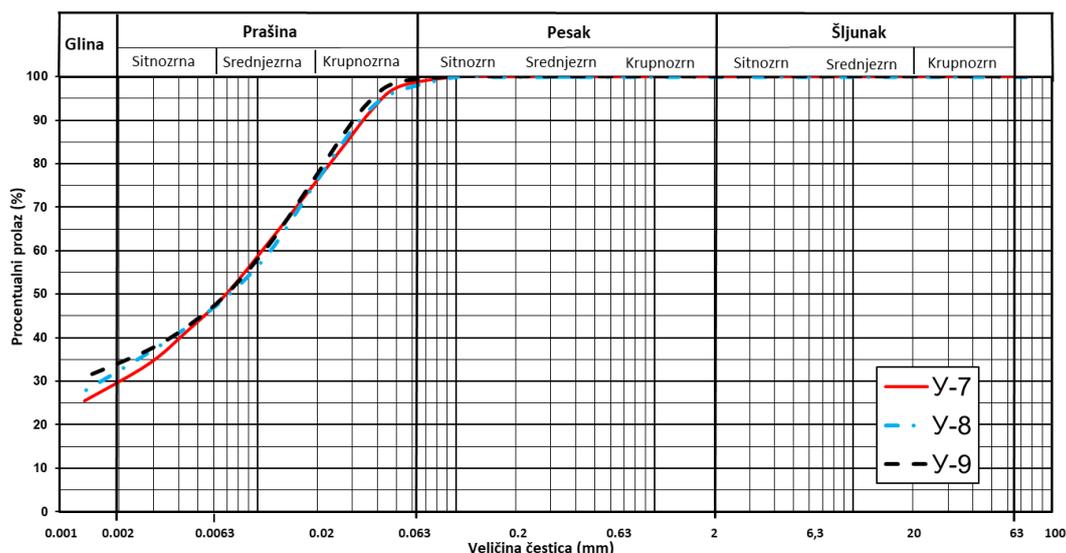
Резултати ових испитивања приказани су на слици 6.3.



Слика 6.3. Дијаграм пластичности – алеврит

6.1.3. Сива глина

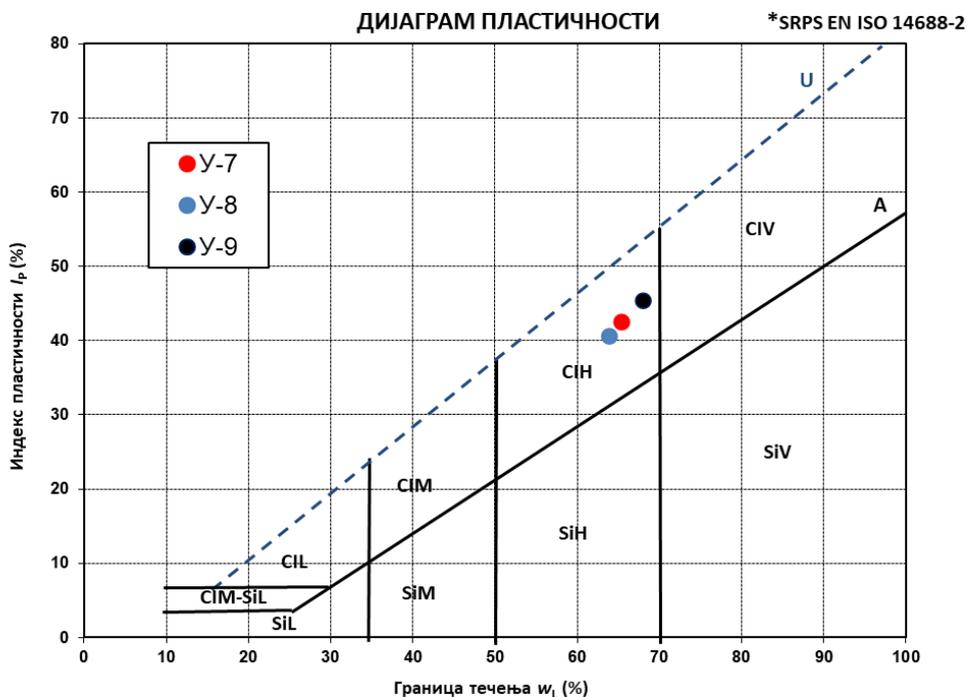
Спроведена анализа гранулометријског састава показује да узорци сиве глине садрже 30 - 34% фракција глине, 65 - 69% фракција прашине и 1 - 2% песковитих фракција (Слика 6.4.).



Слика 6.4. Дијаграм гранулометријског састава – сива глина

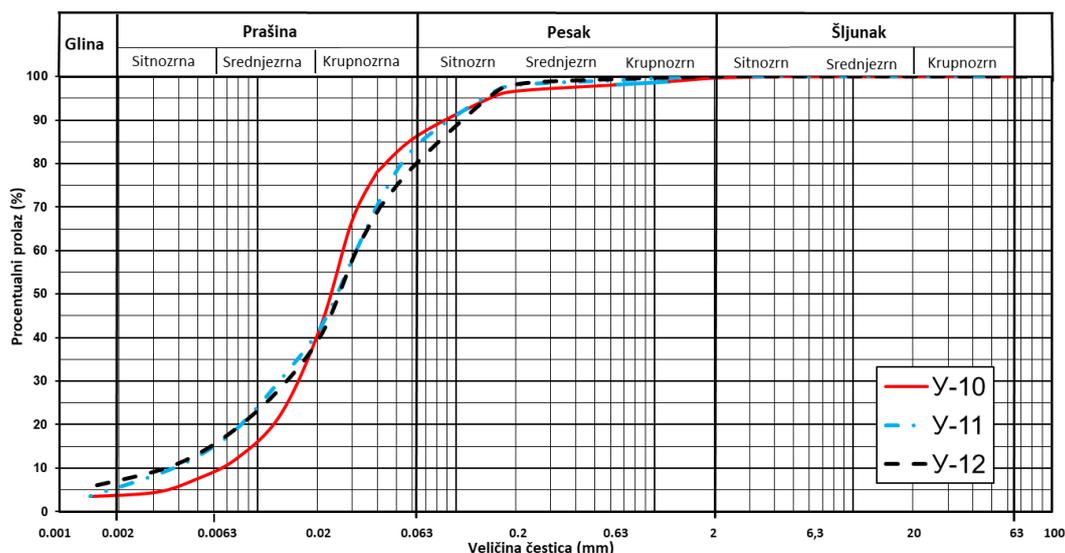
Поред тога, одређиване су и пластичне карактеристике узорака. Вредности индекса пластичности се крећу у распону $I_p=40,6 - 45,5\%$ а индекса конзистенције $I_c=0,913 - 0,966$. На основу вредности индекса конзистенције, могло би се закључити по Terzaghi-ју да је материјал у тврдо пластичном стању конзистенције.

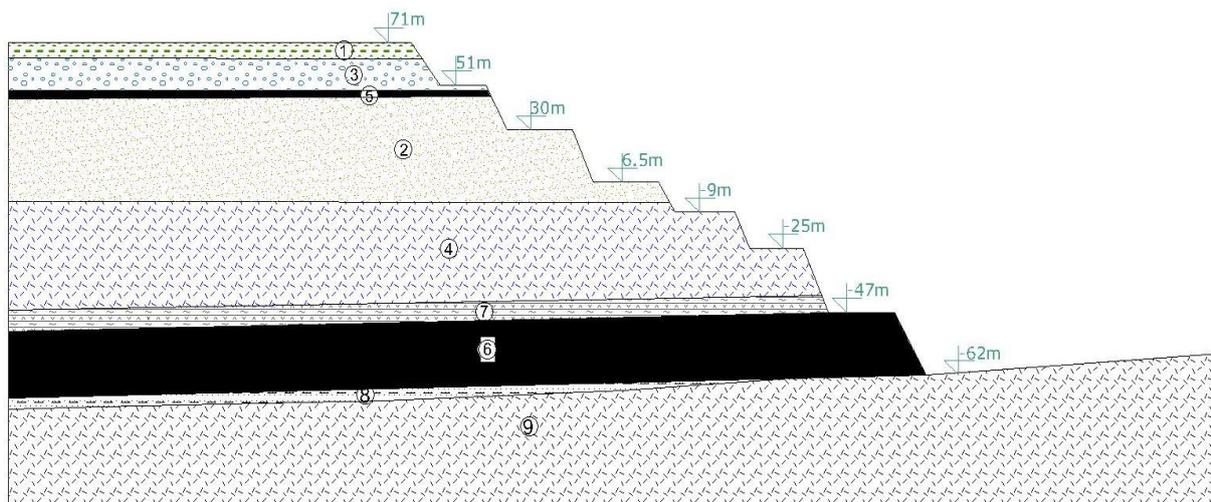
Резултати ових испитивања приказани су на слици 6.5.



6.1.4. Песковита прашина

Спроведена анализа гранулометријског састава показује да узорци песковите прашине садрже 4 - 7% фракција глине, 73 - 82 % фракција прашине и 16 - 20% песковитих фракција (Слика 6.6.).





Слика 6.8. Шематски приказ завршне западне косине површинског копа: 1: хумус (лес); 2: песак; 3: шљунак; 4: алеврит; 5: II угљени слој; 6: III угљени слој; 7: сива глина; 8: песковита прашина; 9: подина

Резултати испитивања су приказани на три начина:

1. Дијаграм смицања;
2. Чврстоћа смицања у функцији нормалних напона;
3. Секантни угао унутрашњег трења.

Сви узорци су испитивана под четири различита нормална (вертикална) напона од 50 кРа, 100 кРа, 200 кРа и 400 кРа.

Сва испитивања су изведена при брзини смицања од 0,02 mm/min. Ова вредност је у сагласности са типичним брзинама смицања које се користе у литератури (Поглавље 5.2.1.) за испитивање резидуалног смицања у дренараним условима.

Поред испитивања у прерађеном (поремећеном) стању, испитивања су извршена и на непоремећеним узорцима при природној влажности у апарату за директно смицање и то: узорак У-4 (алеврит) и узорак У-9 (сива глина).

6.2.1. Приказ резултата испитивања прерађених (поремећених) узорка

Песак

Основне идентификационо-класификационе карактеристике узорка песка, који су коришћени за извођење резидуалног опита директног и кружног смицања, приказане су у Табели 6.1, а резултати извршених испитивања на овим узорцима дати су на сликама 6.9 до 6.20.

Табела 6.1. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорака песка

Песак	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,002 \text{ m}$	$d = 0,002 - 0,063 \text{ mm}$	$d = 0,063 - 2,0 \text{ mm}$	Влажност пре опита	Запреминска тежина пре опита		I_p (%)	I_c
	w (%)	ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)					
У-1	0	3	97	17,3	1,90-1,94	1,62-1,65	-	-
У-2	0	2	98	17,1	1,92-1,96	1,64-1,67	-	-
У-3	0	3	97	17,2	1,91-1,97	1,63-1,68	-	-

На сликама 6.9. и 6.10 је приказана клизна равна узорка након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

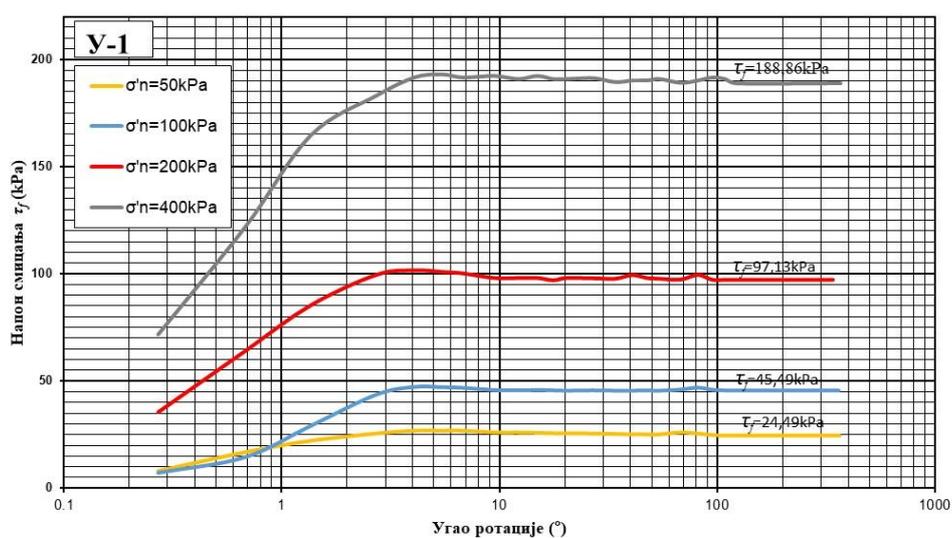


Слика 6.9. Узорак У-1 у кутији за кружно смицање након опита

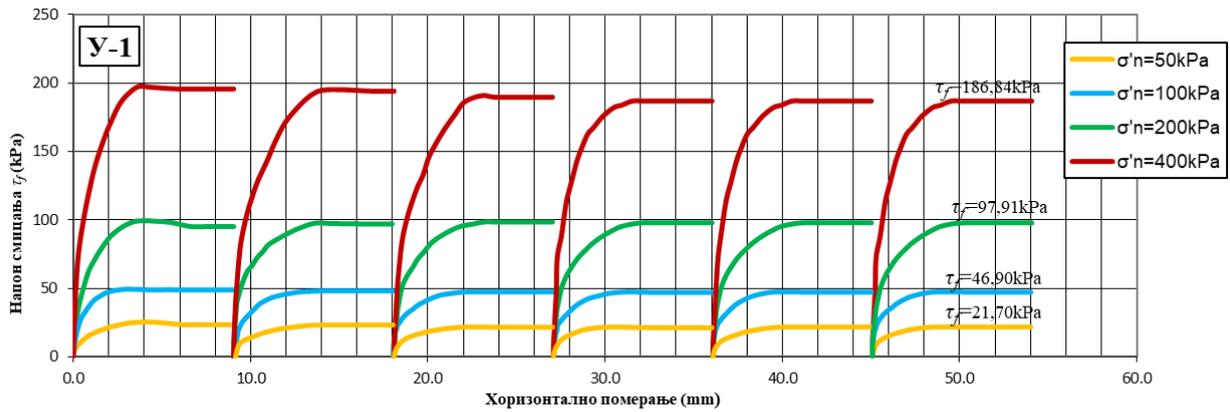


Слика 6.10. Узорак У-1 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-1 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.11 и 6.12.



Слика 6.11. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-1



Слика 6.12. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-1

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.2.

Табела 6.2. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-1

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-1	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,35	54,02	1,54
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	360 (267,1)	0,55	54,00	1,62
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	372 (275,9)	0,68	54,07	1,28
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	367 (272,3)	0,57	54,09	2,27

На сликама 6.13. и 6.14. је приказана клизна равна узорка У-2 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

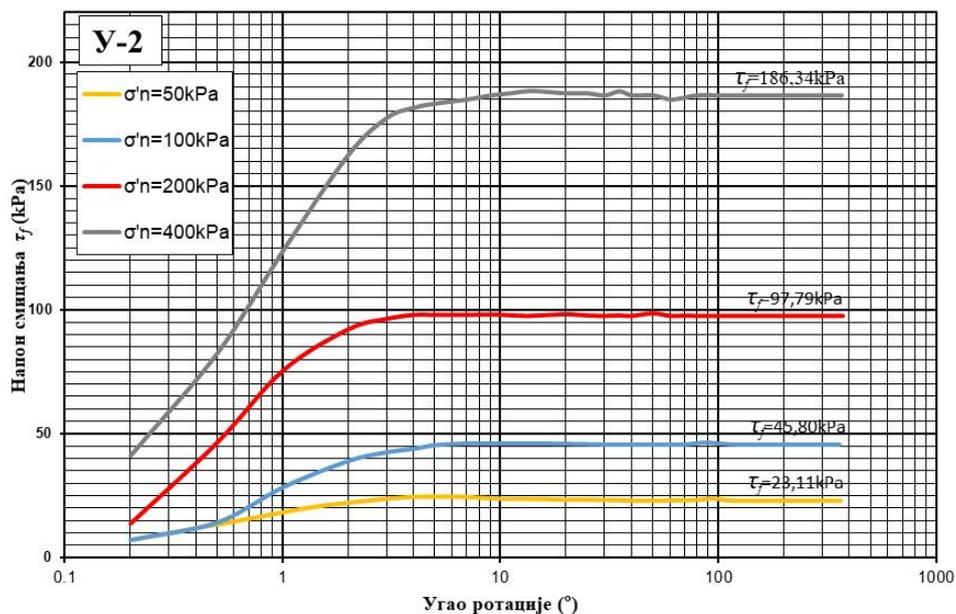


Слика 6.13. Узорак У-2 у кутији за кружно смицање након опита

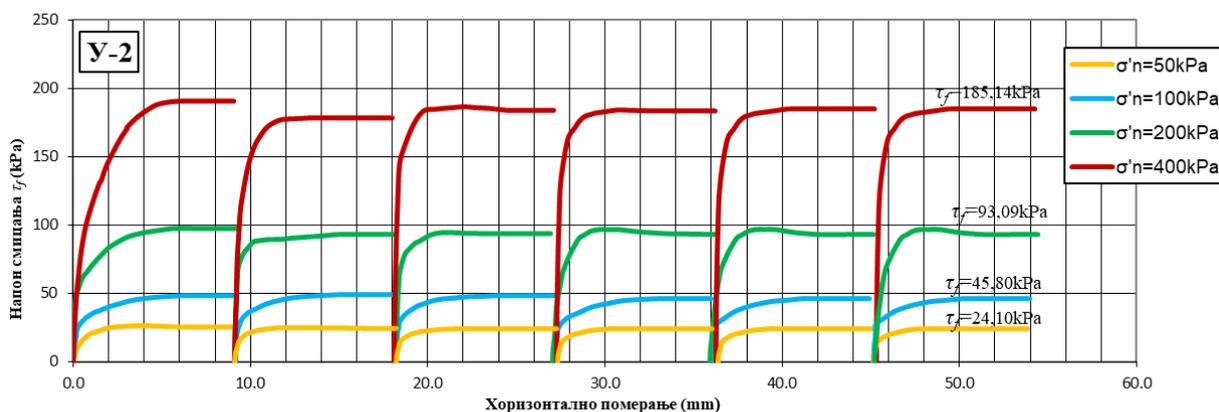


Слика 6.14. Узорак У-2 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-2 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.15 и 6.16.



Слика 6.15. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-2



Слика 6.16. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-2

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.3.

Табела 6.3. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-2

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-2	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	362 (268,5)	0,37	54,34	1,59
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	362 (368,6)	0,52	54,11	1,64
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	369 (273,7)	0,67	54,05	1,48
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	374 (277,4)	0,58	54,18	2,15

На сликама 6.17. и 6.18. је приказана клизна раван узорка У-3 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

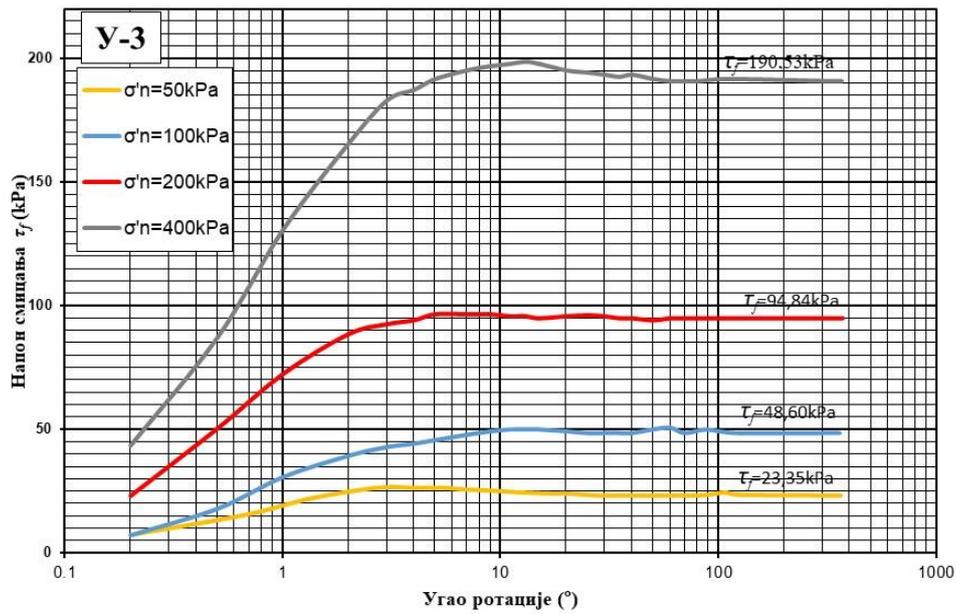


Слика 6.17. Узорак У-3 у кутији за кружно смицање након опита

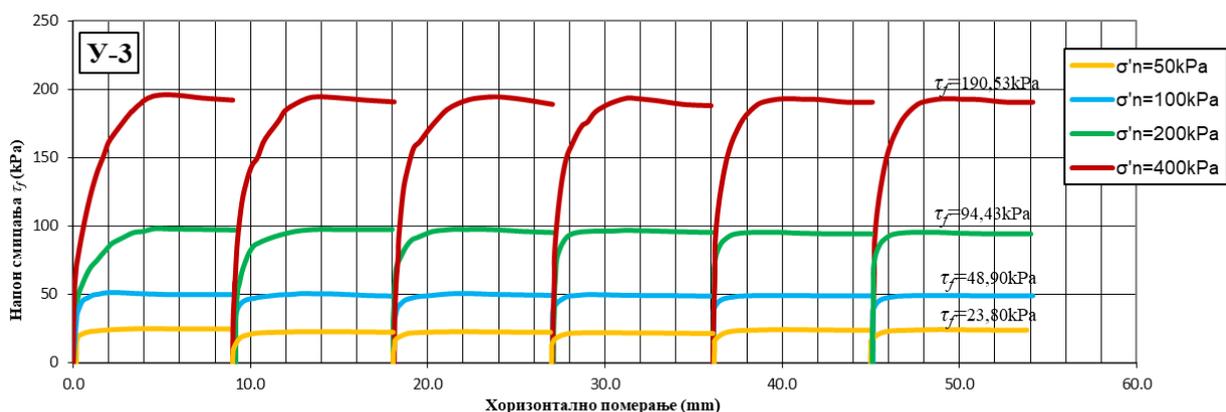


Слика 6.18. Узорак У-3 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-3 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.19 и 6.20.



Слика 6.19. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-3



Слика 6.20. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-3

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.4.

Табела 6.4. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-3

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-3	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	361 (267,8)	0,37	54,21	1,53
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	363 (269,3)	0,52	54,17	1,69
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	366 (271,5)	0,67	54,26	1,58
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	370 (274,5)	0,58	54,12	2,26

Алеврит

Основне идентификационо - класификационе карактеристике узорака алеврита, који су коришћени за извођење резидуалног опита директног и кружног смицања, приказане су у Табели 6.5, а резултати и слике извршених испитивања на овим узорцима дати су на сликама 6.21 до 6.32.

Табела 6.5. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорака алеврита

Алеврит	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,002$ mm	$d = 0,002 - 0,063$ mm	$d = 0,063 - 2,0$ mm	Влажност пре опита w (%)	Запреминска маса пре опита ρ (Mg/m ³)		I_p (%)	I_c
У-4	13	81	6	20,8	1,88-1,93	1,56-1,60	26,9	0,843
У-5	15	81	4	21,5	1,87-1,91	1,54-1,57	26,7	0,846
У-6	14	81	5	22,5	1,87-1,92	1,53-1,57	24,7	0,942

На сликама 6.21. и 6.22. је приказана клизна равна узорка У-4 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

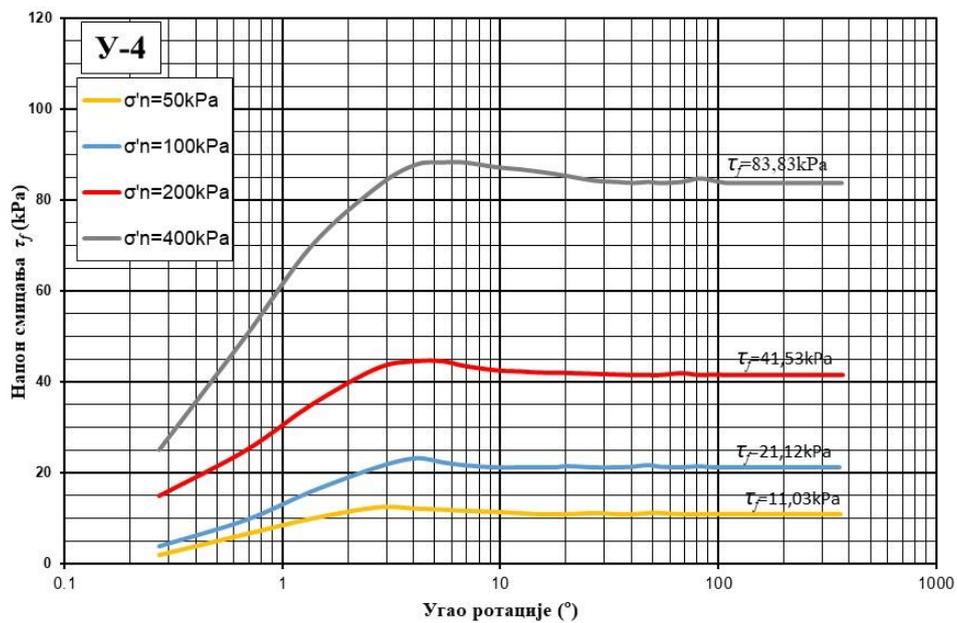


Слика 6.21. Узорак У-4 у кутији за кружно смицање након опита

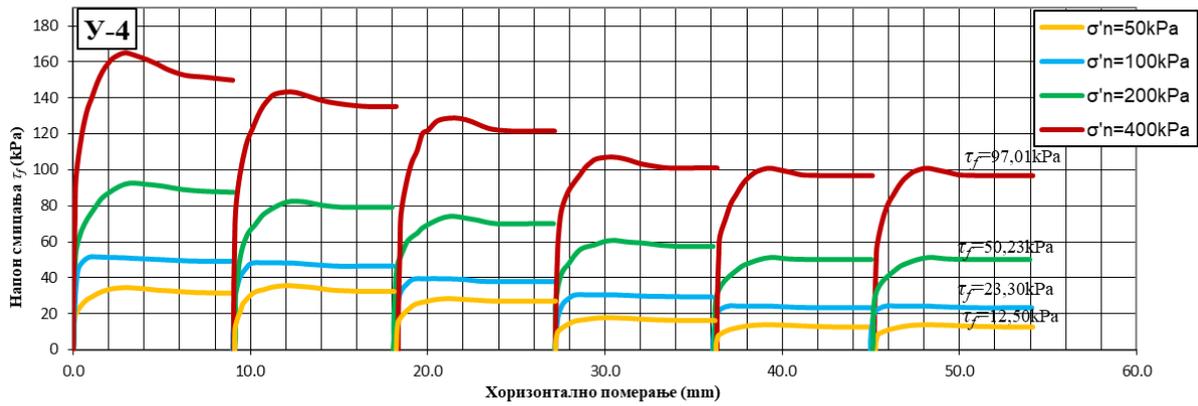


Слика 6.22. Узорак У-4 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-4 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.23. и 6.24.



Слика 6.23. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-4



Слика 6.24. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-4

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.6.

Табела 6.6. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-4

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-4	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	363 (269,3)	0,61	54,16	2,41
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	361 (267,8)	0,55	54,11	2,57
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	369 (273,7)	0,68	53,95	2,74
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	365 (270,8)	0,57	54,18	2,32

На сликама 6.25. и 6.26. је приказана клизна раван узорака У-5 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

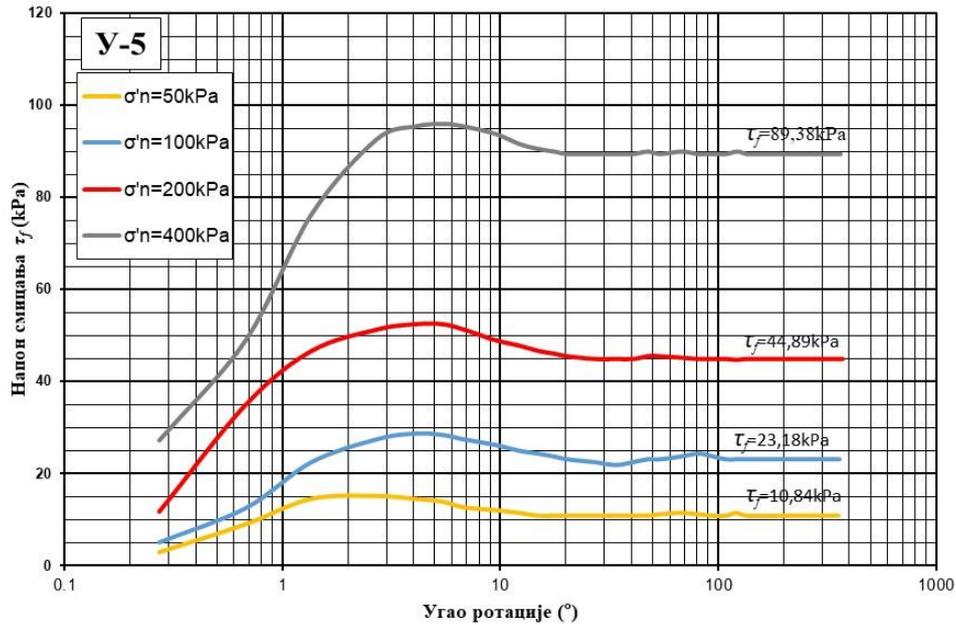


Слика 6.25. Узорак У-5 у кутији за кружно смицање након опита

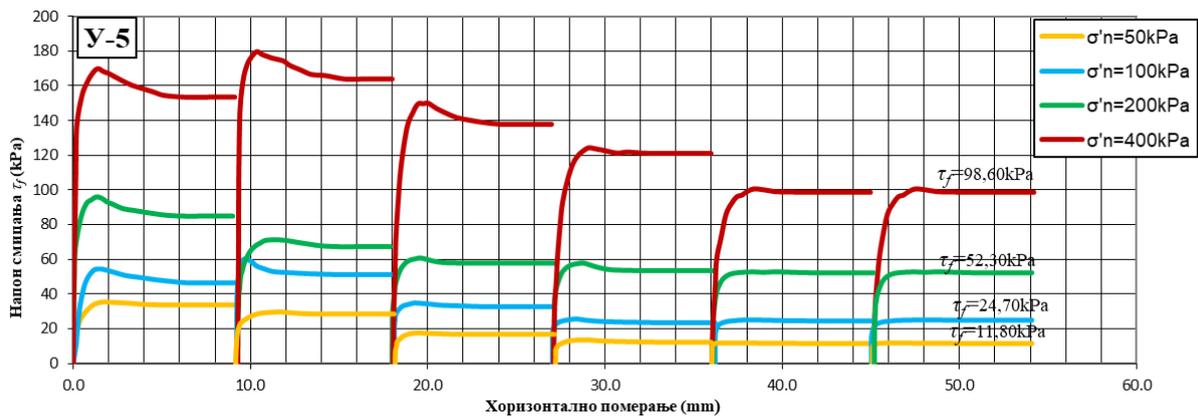


Слика 6.26. Узорак У-5 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-5 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.27 и 6.28.



Слика 6.27. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-5



Слика 6.28. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-5

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.7.

Табела 6.7. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-5

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-5	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	359 (266,3)	0,65	54,09	2,52
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	361 (267,6)	0,57	54,08	2,48
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	356 (264,1)	0,75	54,01	2,66
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,57	54,05	2,53

На сликама 6.29. и 6.30. је приказана клизна раван узорка У-6 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

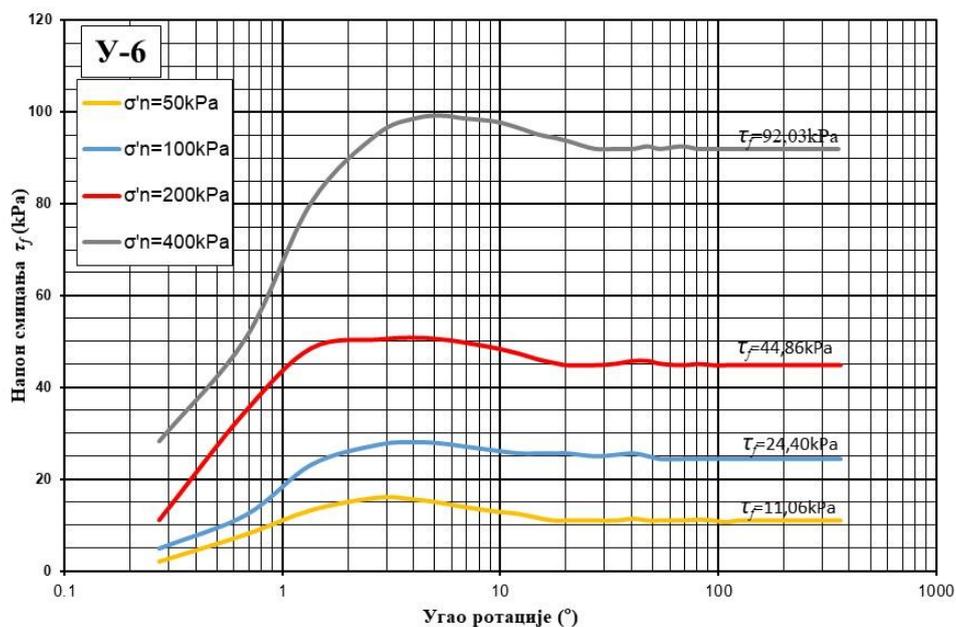


Слика 6.29. Узорак У-6 у кутији за кружно смицање након опита

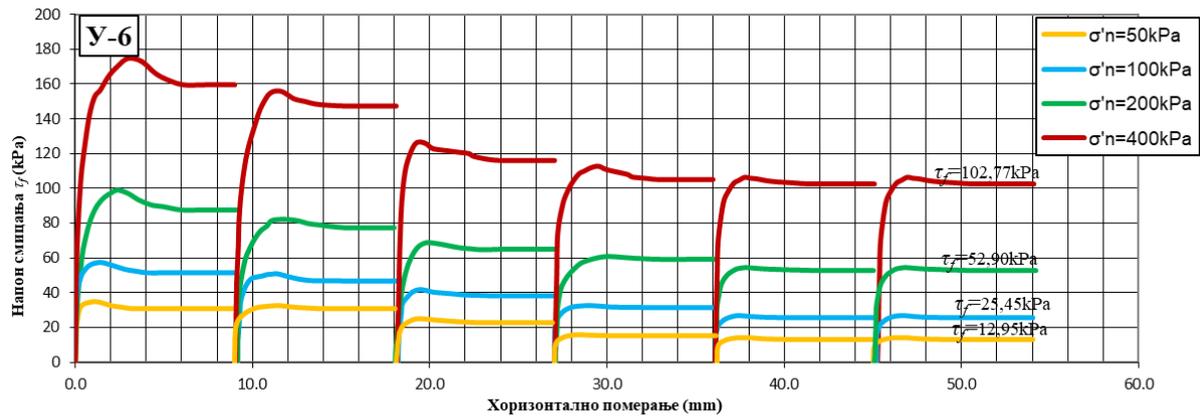


Слика 6.30. Узорак У-6 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-6 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.31 и 6.32.



Слика 6.31. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-6



Слика 6.32. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-6

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.8.

Табела 6.8. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-6

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-6	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	365 (270,8)	0,64	54,09	2,60
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	362 (268,5)	0,52	54,08	2,55
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,70	54,01	2,58
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	355 (263,35)	0,75	54,05	2,63

Сива глина

Основне идентификационо - класификационе карактеристике узорака сиве глине, који су коришћени за извођење резидуалног опита директног и кружног смицања, приказане су у Табели 6.9, а резултати и слике извршених испитивања на овим узорцима дати су на сликама 6.33 до 6.44.

Табела 6.9. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорака сиве глине

Сива глина	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,002 \text{ mm}$	$d = 0,002 - 0,063 \text{ mm}$	$d = 0,063 - 2,0 \text{ mm}$	Влажност пре опита w (%)	Запреминска маса пре опита		I_p (%)	I_c
					ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)		
У-7	30	69	1	23,9	1,92-1,96	1,55-1,58	42,5	0,913
У-8	33	65	2	24,5	1,90-1,94	1,53-1,56	40,6	0,966
У-9	34	66	0	23,5	1,98-2,03	1,61-1,64	45,5	0,959

На сликама 6.33 и 6.34. је приказана клизна равна узорка У-7 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

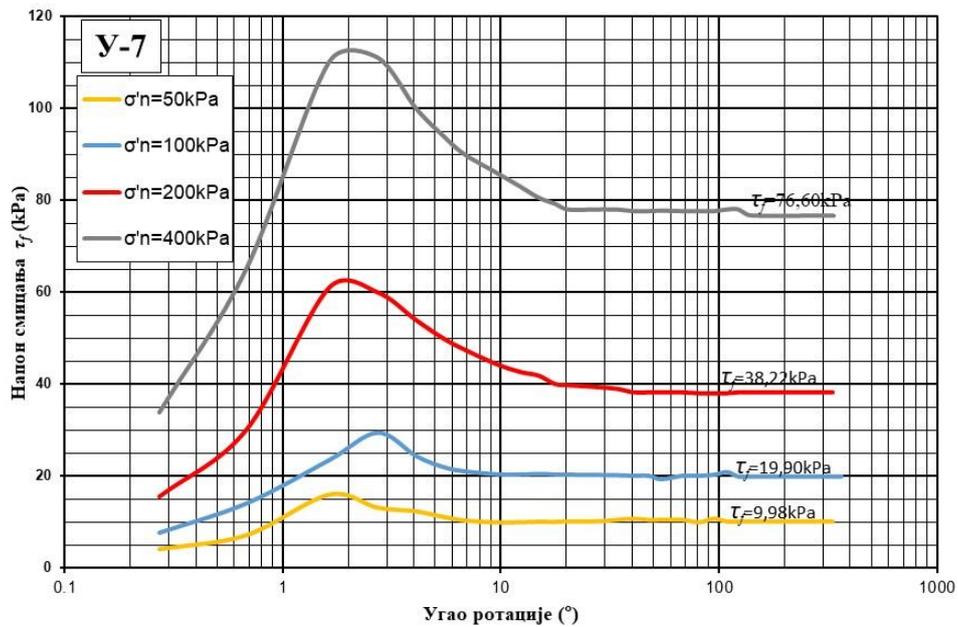


Слика 6.33. Узорак У-7 у кутији за кружно смицање након опита

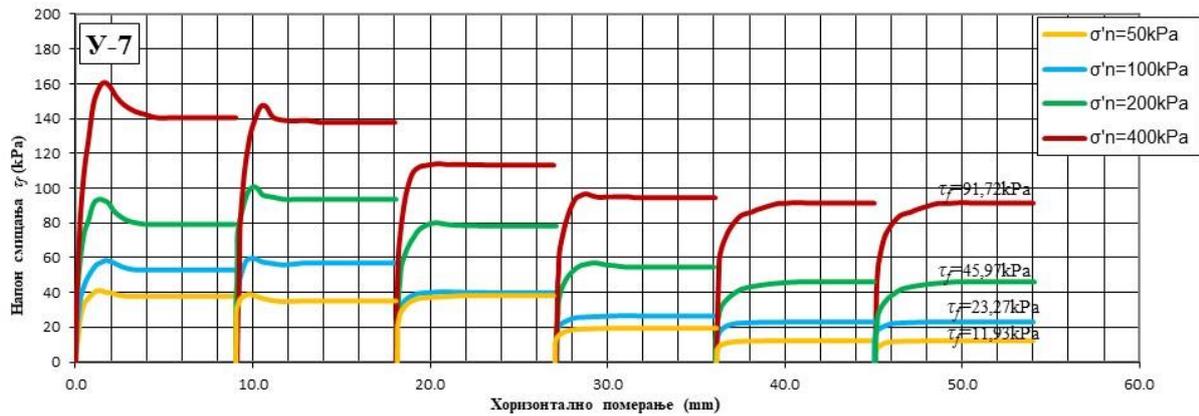


Слика 6.34. Узорак У-7 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-7 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.35 и 6.36.



Слика 6.35. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-7



Слика 6.36. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-7

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.10.

Табела 6.10 Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-7

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-7	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	333 (247,0)	0,75	54,12	2,79
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	362 (268,5)	0,70	54,05	3,01
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	335 (248,5)	0,75	54,02	3,11
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	341 (252,9)	0,75	54,08	3,06

На сликама 6.37. и 6.38. је приказана клизна раван узорака У-8 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

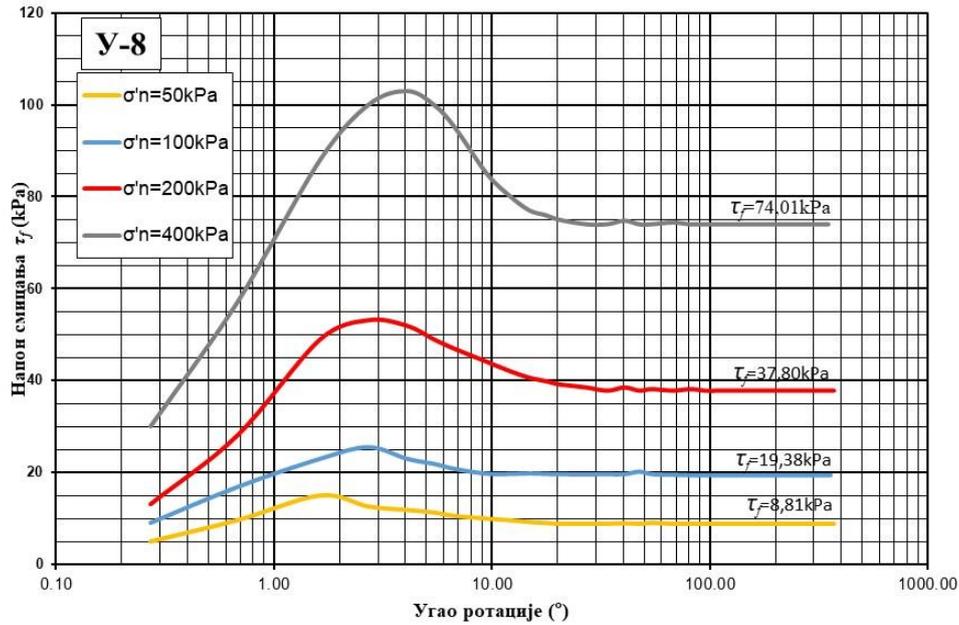


Слика 6.37. Узорак У-8 у кутији за кружно смицање након опита

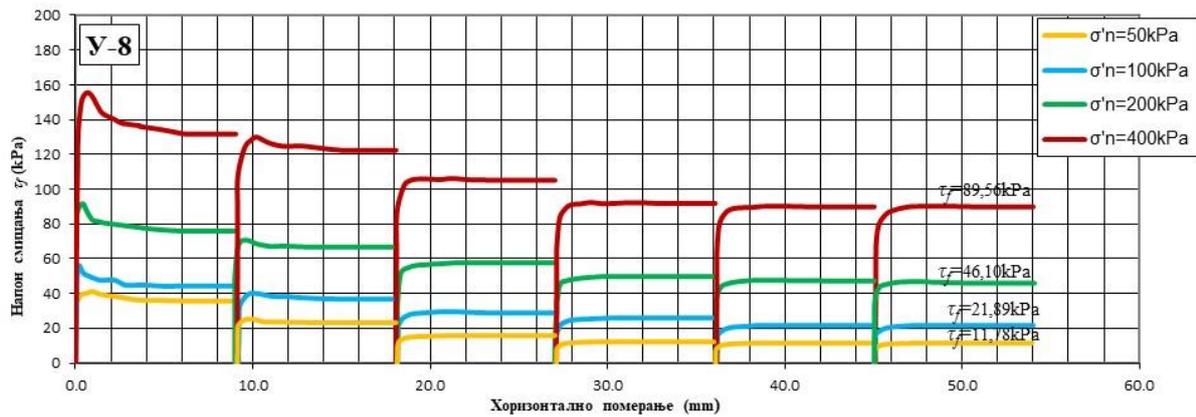


Слика 6.38. Узорак У-8 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-8 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.39 и 6.40.



Слика 6.39. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-8



Слика 6.40. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-8

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.11.

Табела 6.11. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-8

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (°) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-8	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	333 (273,7)	0,71	53,95	2,85
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	362 (264,8)	0,75	54,10	3,15
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	335 (273,0)	0,67	54,05	3,08
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	341 (259,6)	0,75	54,00	3,21

На сликама 6.41. и 6.42. је приказана клизна равна узорка У-9 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

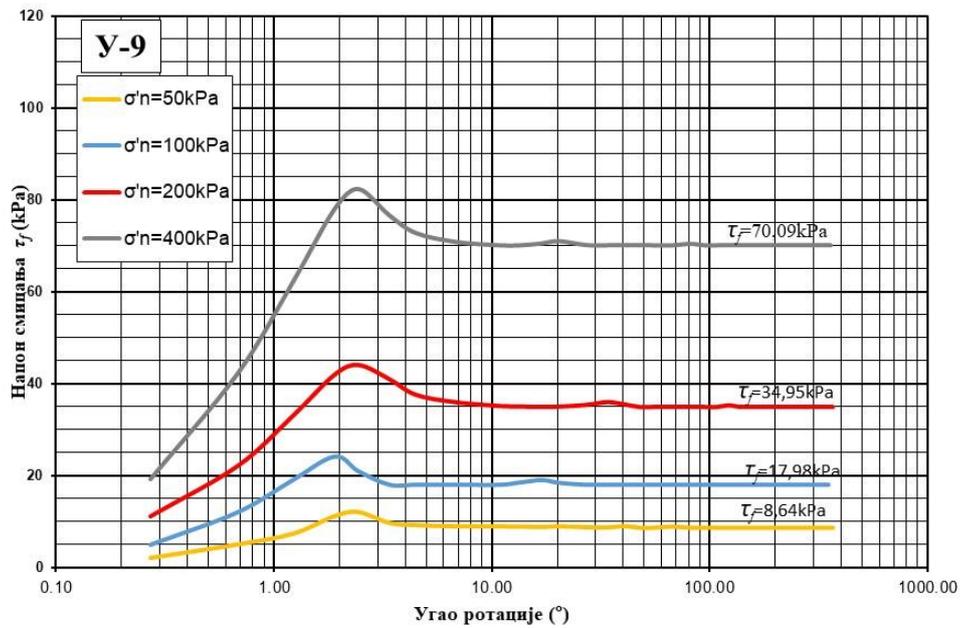


Слика 6.41. Узорак У-9 у кутији за кружно смицање након опита

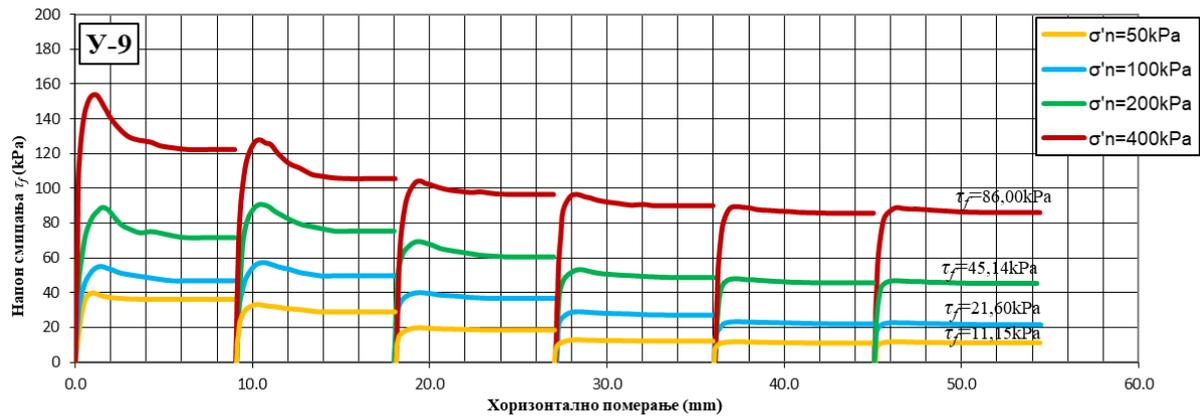


Слика 6.42. Узорак У-9 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-1 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.43 и 6.44.



Слика 6.43. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-9



Слика 6.44. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-9

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.12.

Табела 6.12. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-9

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-9	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	367 (272,3)	0,70	54,19	2,92
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	350 (259,6)	0,75	54,12	3,17
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	366 (271,5)	0,68	54,25	3,15
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	359 (266,3)	0,73	54,26	3,19

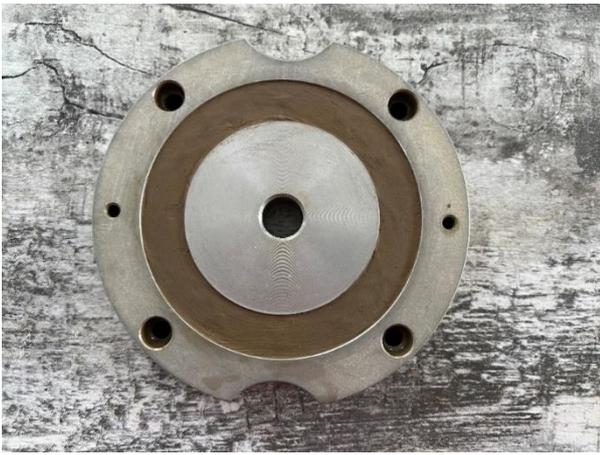
Песковита прашина

Основне идентификационо - класификационе карактеристике узорака песковите прашине, који су коришћени за извођење резидуалног опита директног и кружног смицања, приказане су у Табели 6.13, а резултати и слике извршених испитивања на овим узорцима дати су на сликама 6.45 до 6.56.

Табела 6.13. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорака песковите прашине

Песковита прашина	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,02 \text{ mm}$	$d = 0,002 - 0,063 \text{ mm}$	$d = 0,063 - 2,0 \text{ mm}$	Влажност пре опита w (%)	Запреминска маса пре опита		I_p (%)	I_c
	ρ (Mg/m ³)	ρ_i (Mg/m ³)						
У-10	4	82	14	26,6	2,01-2,06	1,59-1,63	21,6	1,155
У-11	6	78	16	29,5	2,06-2,11	1,59-1,63	18,3	1,131
У-12	7	73	20	28,2	1,99-2,03	1,55-1,58	18,3	1,174

На сликама 6.45. и 6.46. је приказана клизна равна узорка У-10 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

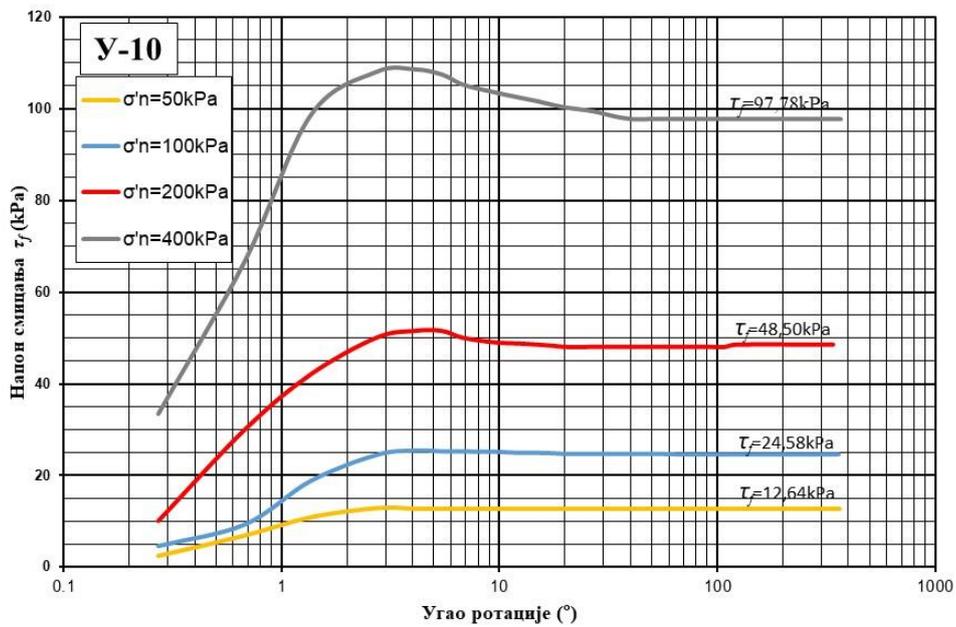


Слика 6.45. Узорак У-10 у кутији за кружно смицање након опита

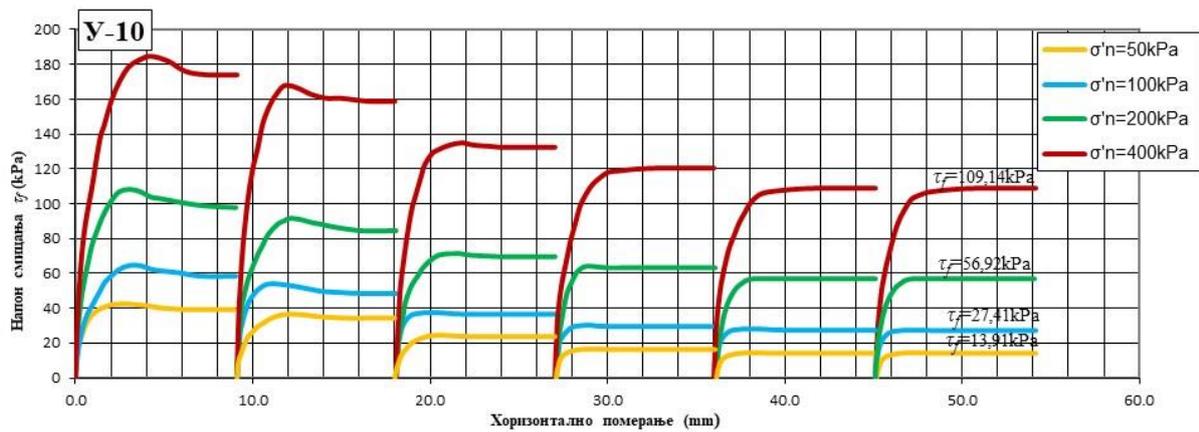


Слика 6.46. Узорак У-10 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-10 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.47. и 6.48.



Слика 6.47. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-10



Слика 6.48. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-10

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.14.

Табела 6.14. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-10

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-10	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,48	54,14	2,05
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	360 (260,1)	0,52	54,11	2,35
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	372 (276,0)	0,45	54,02	2,29
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	367 (272,3)	0,50	54,09	2,39

На сликама 6.49. и 6.50. је приказана клизна равна узорка У-11 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

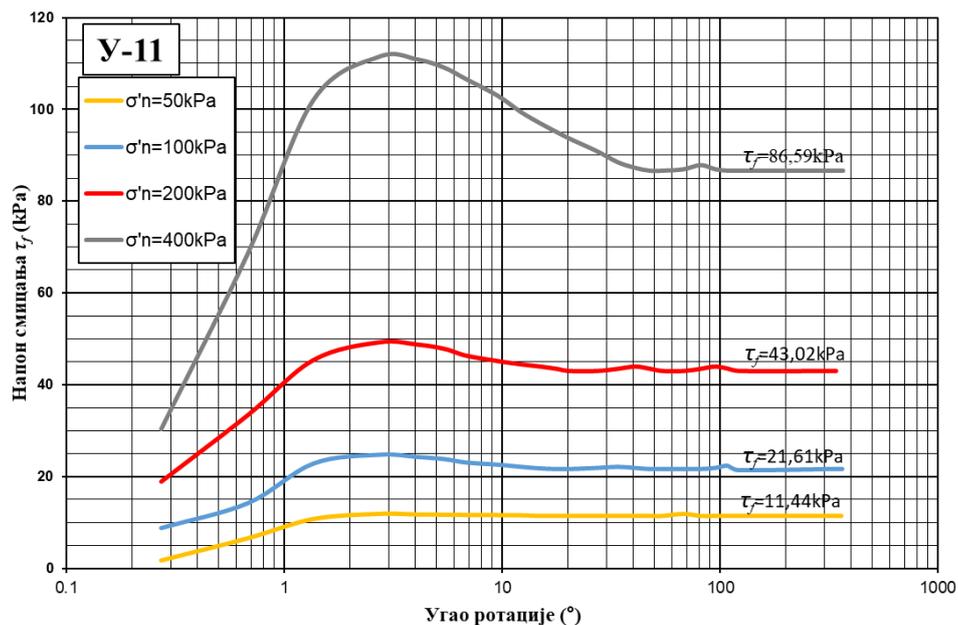


Слика 6.49. Узорак У-11 у кутији за кружно смицање након опита

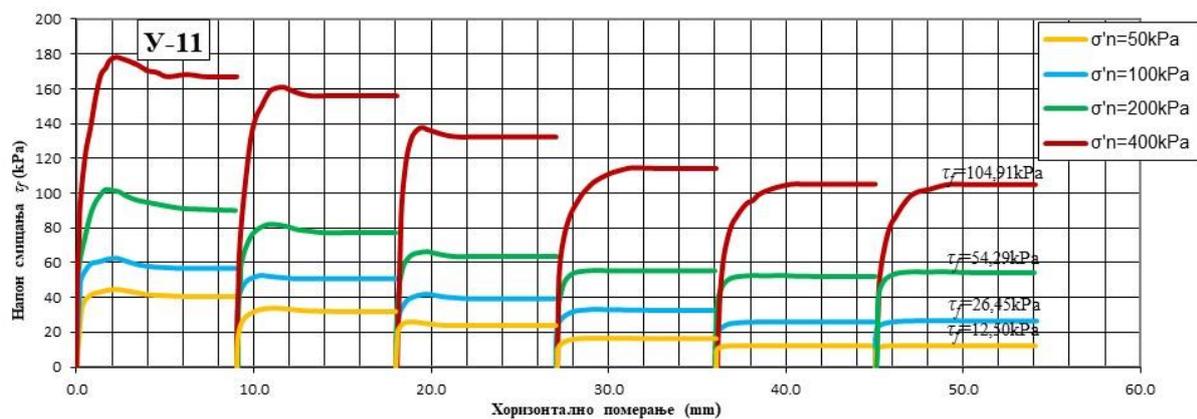


Слика 6.50. Узорак У-11 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-11 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.51 и 6.52.



Слика 6.51. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-11



Слика 6.52. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-11

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.15.

Табела 6.15. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорка У-11

Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (°) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-11	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	359 (266,3)	0,46	54,05	2,08
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	361 (267,8)	0,50	54,00	2,31
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	366 (271,5)	0,47	54,03	2,33
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,51	54,06	2,45

На сликама 6.53. и 6.54. је приказана клизна раван узорка У-12 након испитивања у апарату за кружно смицање и апарату за директно смицање.

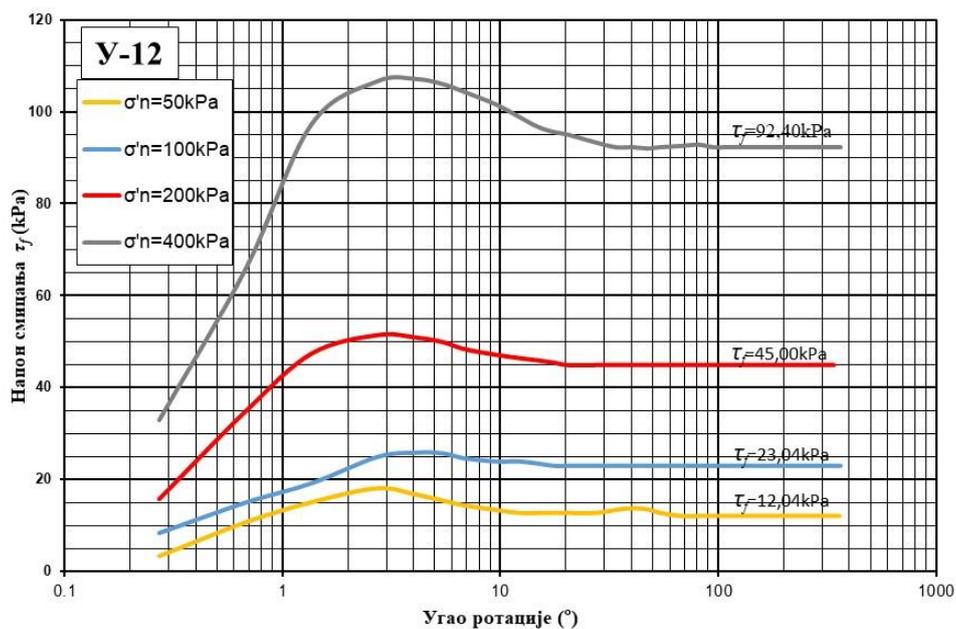


Слика 6.53. Узорак У-12 у кутији за кружно смицање након опита

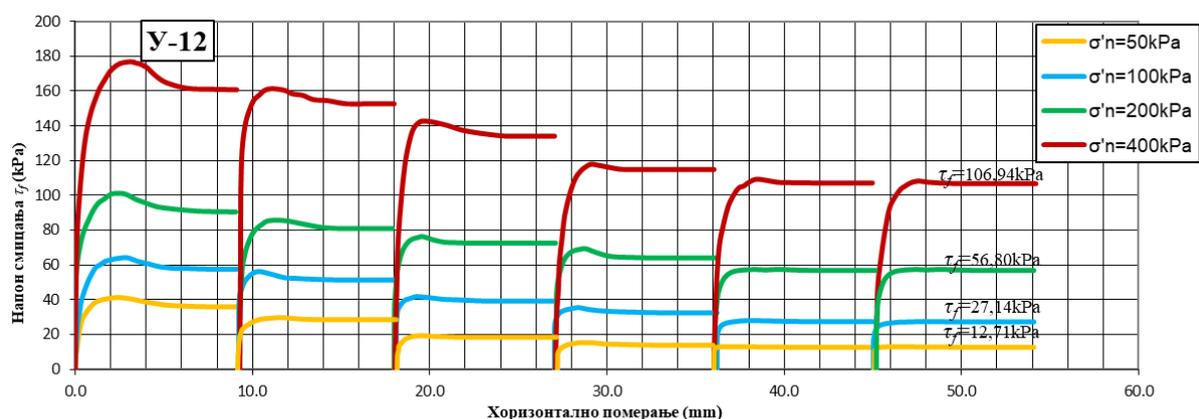


Слика 6.54. Узорак У-12 смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-12 у апаратима за кружно и директно смицање дати су на сликама 6.55 и 6.56.



Слика 6.55. Логаритамски дијаграм зависности напона смицања и угла ротације за узорак У-12



Слика 6.56. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-12

Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака након испитивања у апаратима за директно и кружно смицање дати су у табели 6.16.

Табела 6.16. Вредности вертикалне и хоризонталне деформације узорака У-12

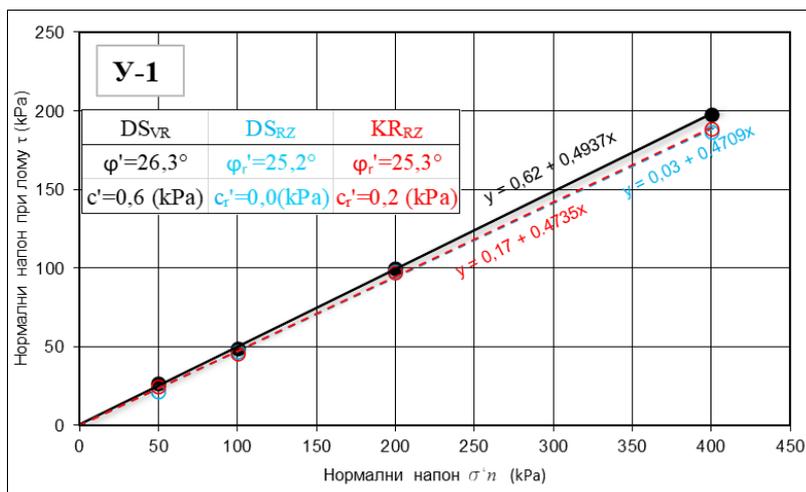
Узорак	Нормални ефективни напон	Опит кружним смицањем		Опит директним смицањем	
		Хоризонтална деформација ΔH_{hor} ($^{\circ}$) (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)	Хоризонтална деформација ΔH_{hor} (mm)	Вертикална деформација ΔH_{ver} (mm)
У-12	$\sigma'_n = 50 \text{ kPa}$	365 (270,8)	0,39	54,09	2,10
	$\sigma'_n = 100 \text{ kPa}$	362 (268,5)	0,47	54,01	2,33
	$\sigma'_n = 200 \text{ kPa}$	364 (270,0)	0,52	54,05	2,39
	$\sigma'_n = 400 \text{ kPa}$	359 (266,3)	0,49	54,02	2,37

6.2.1.1. Одређивање чврстоће смицања

Анализиран је однос између резидуалног напона на смицање и одговарајућих нормалних напона, како би се дефинисала резидуална чврстоћа смицања која је детаљно описана у Поглављу 2. Резидуални смичући напон добијен за сваки опит је нанешен у односу на примењене нормалне напоне од 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa и 400 kPa за све узорке тла, а на графику је извучена линеарна апроксимација анvelope лома. Једначина ове праве која представља Кулонов услов лома, анализирана је да би се одредио резидуални угао унутрашњег трења.

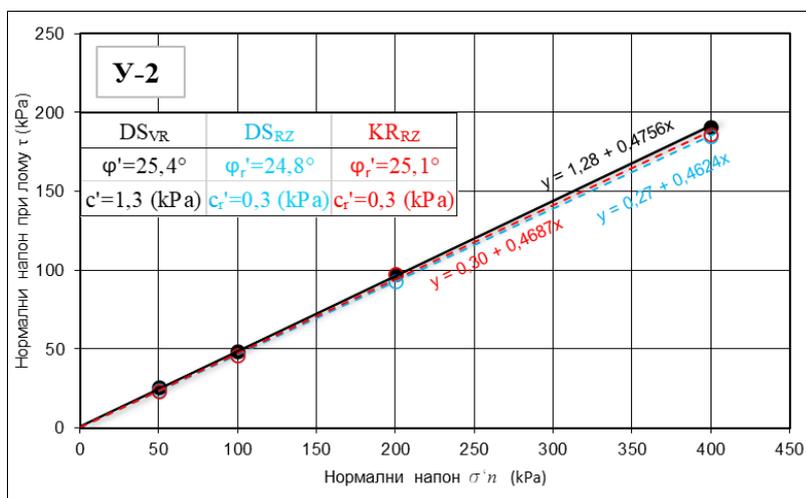
Песак

Збирни дијаграм (Слика 6.57.) приказује вредности вршне чврстоће смицања из апарата за директно смицање (DS_{VR}) и резидуалне чврстоће смицања из апарата за директно (DS_{RZ}) и кружно (KR_{RZ}) смицање чврстоће смицања за узорак У-1, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



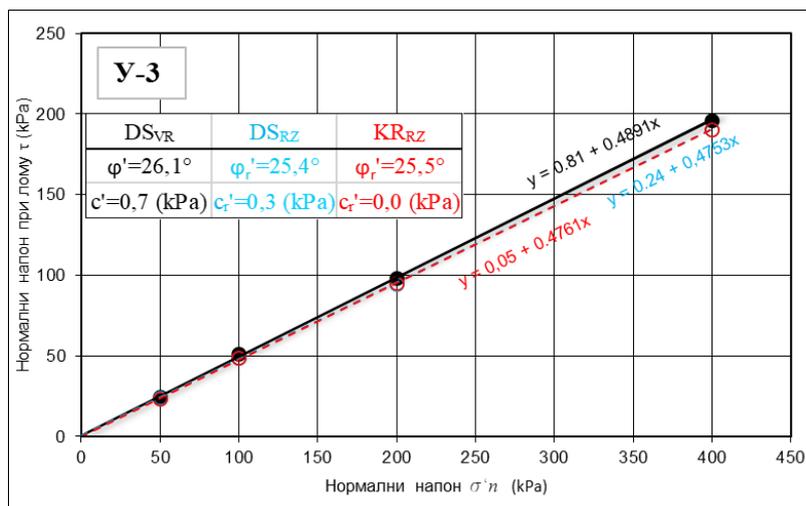
Слика 6.57. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-1 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

Збирни дијаграм (Слика 6.58.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-2, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.58. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-2 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

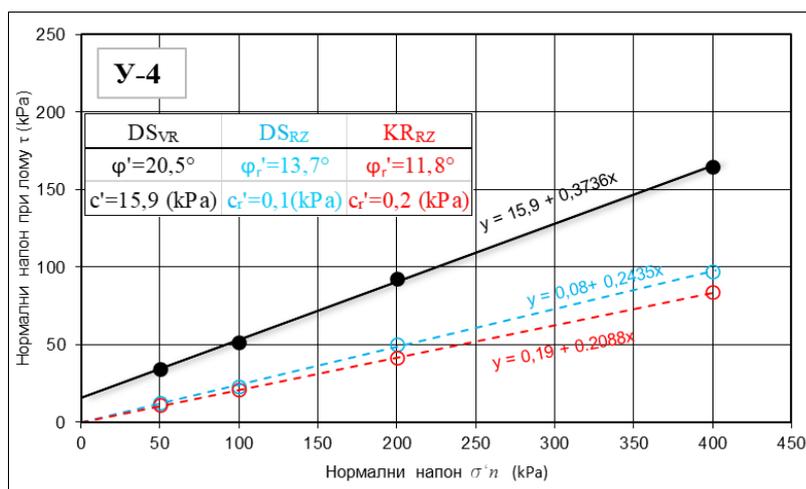
Збирни дијаграм (Слика 6.59.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-3, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.59. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-3 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

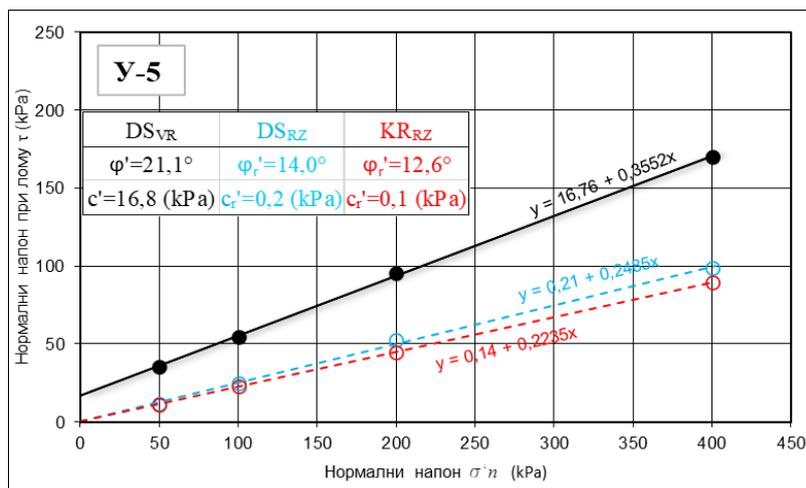
Алеврит

Збирни дијаграм (Слика 6.60.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак У-4, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



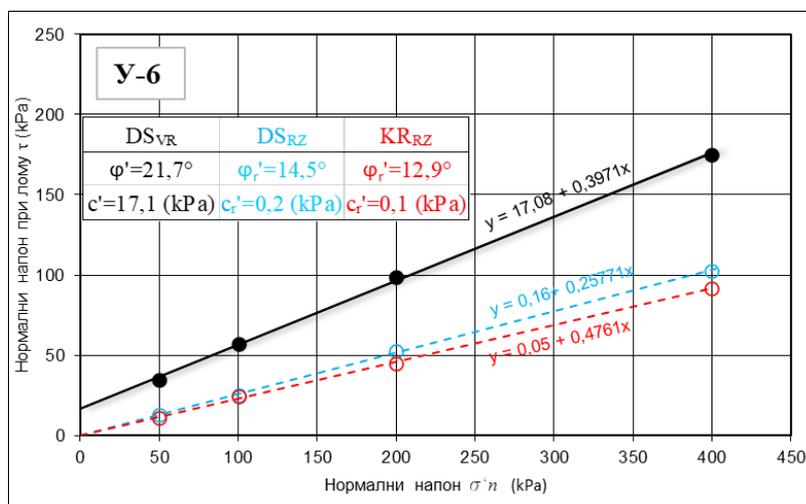
Слика 6.60. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак У-4 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

Збирни дијаграм (Слика 6.61.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак У-5, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.61. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-5 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

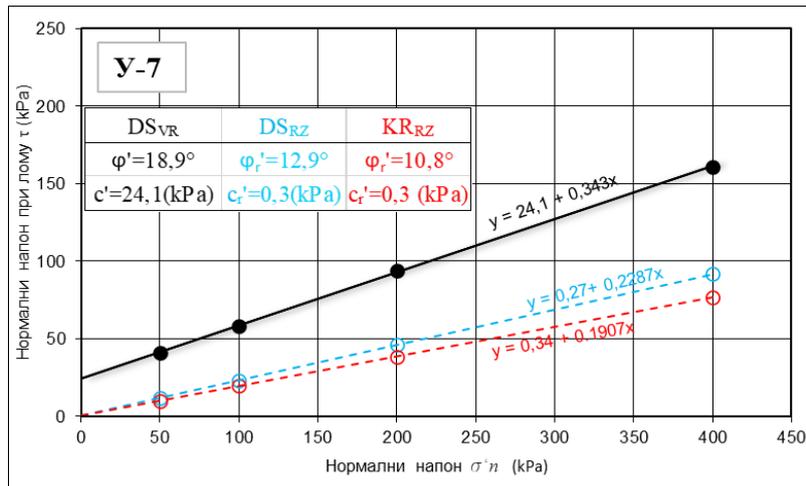
Збирни дијаграм (Слика 6.62.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-6, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.62. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-6 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

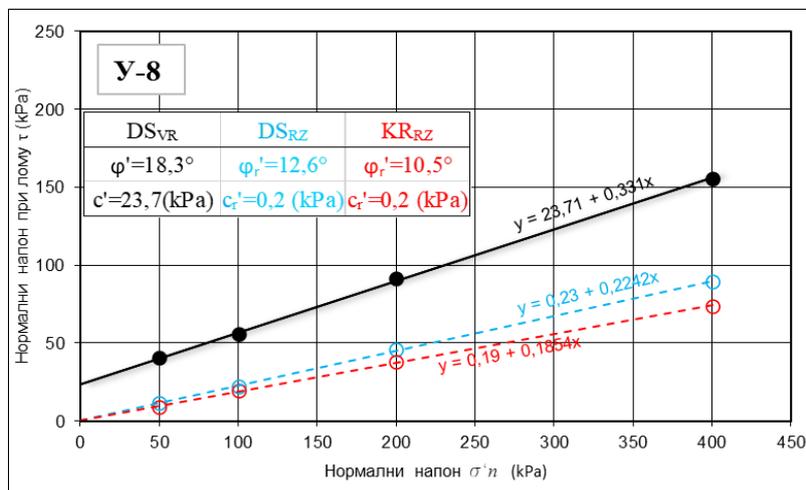
Сива глина

Збирни дијаграм (Слика 6.63.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-7, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



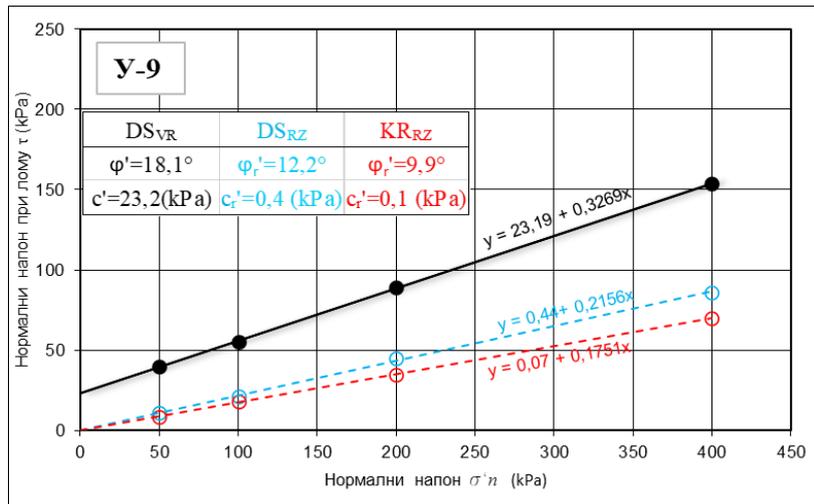
Слика 6.63. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-7 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

Збирни дијаграм (Слика 6.64.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-8, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.64. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-8 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

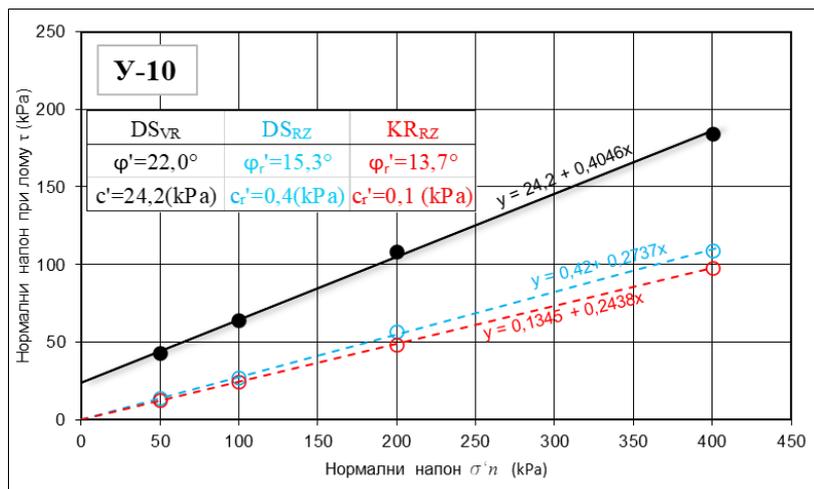
Збирни дијаграм (Слика 6.65.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-9, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.65. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-9 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

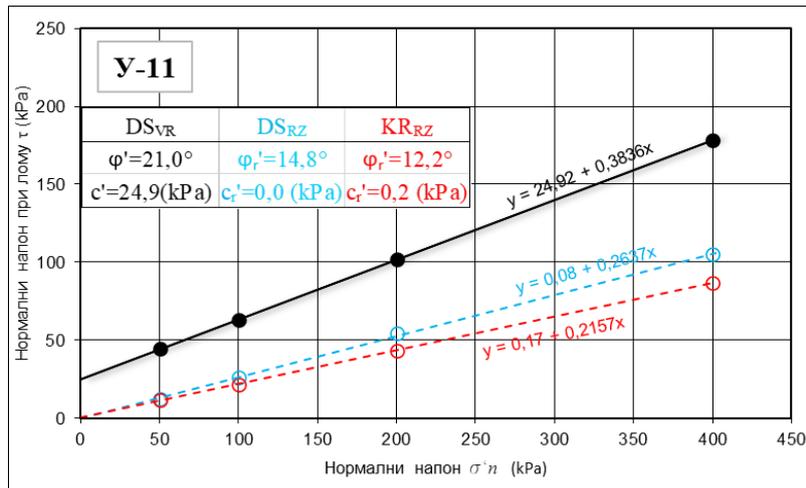
Песковита прашина

Збирни дијаграм (Слика 6.66.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-10, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



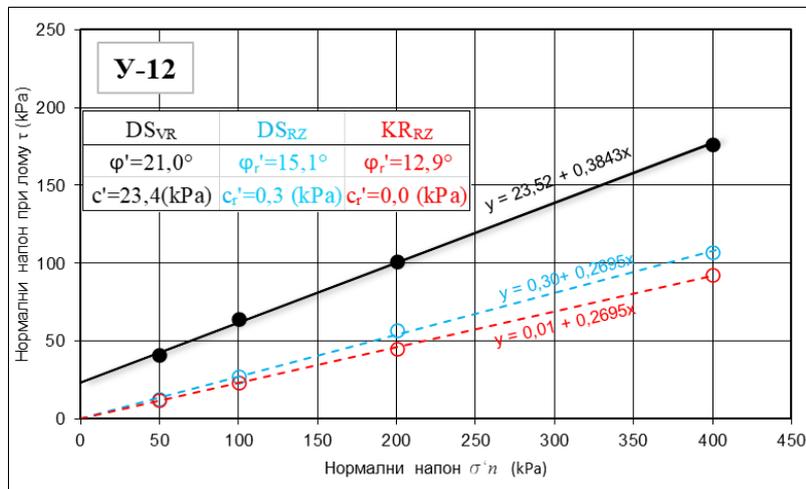
Слика 6.66. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-10 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

Збирни дијаграм (Слика 6.67.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-11, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.67. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-11 добијен помоћу апарата за смицање и кружно смицање

Збирни дијаграм (Слика 6.68.) приказује вредности вршне (DS_{vR}) и резидуалне (DS_{rZ} и KR_{rZ}) чврстоће смицања за узорак Y-12, добијене из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 6.68. Збирни дијаграм чврстоће смицања за узорак Y-12 добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

6.2.1.2. Секантни резидуални угао унутрашњег трења

Песак

Просечне вредности секантни угао унутрашњег трења добијене апаратом за кружно смицање се крећу у границама од $\varphi'_{r,sec}KS = 25,0^\circ$ до $25,8^\circ$ (Табела 6.17.).

Табела 6.17. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за песак

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)
50	3	23,65	25,3	0,69	24,8	26,1
100	3	46,63	25,0	0,80	24,5	25,9
200	3	95,59	25,8	0,36	25,4	26,1
400	3	187,91	25,2	0,27	25,0	25,5

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у интервалу од $\varphi'_{r,secDS} = 24,9^\circ$ до $25,4^\circ$ (Табела 6.18.).

Табела 6.18. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за песак

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secDS}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secDS}$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secDS}$ (°)
50	3	23,2	24,9	1,24	23,5	25,7
100	3	47,20	25,3	0,74	24,6	26,1
200	3	95,14	25,4	0,58	25,0	26,1
400	3	187,50	25,1	0,32	24,8	25,5

Алеврит

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за кружно смицање се крећу у интервалу од $\varphi'_{r,secKS} = 12,3^\circ$ до $12,9^\circ$ (Табела 6.19.).

Табела 6.19. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за алеврит

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\varphi'_{r,secKS}$ (°)
50	3	10,98	12,4	0,13	12,2	12,5
100	3	22,90	12,9	0,90	11,9	13,7
200	3	43,76	12,3	0,53	11,7	12,7
400	3	88,41	12,5	0,57	11,8	13,0

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у границама од $\varphi'_{r,secDS} = 13,8^\circ$ до $14,5^\circ$ (Табела 6.20.).

Табела 6.20. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за алеврит

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)
50	3	12,42	13,9	0,63	13,3	14,5
100	3	24,48	13,8	0,59	13,1	14,3
200	3	51,81	14,5	0,38	14,1	14,8
400	3	99,46	14,0	0,40	13,6	14,4

Сива глина

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за кружно смицање се крећу у интервалу од $\phi'_{r,sec}KS= 10,4^\circ$ до $10,8^\circ$ (Табела 6.21.).

Табела 6.21. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за сиву глину

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}KS$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}KS$ (°)
50	3	9,14	10,4	0,81	9,8	11,3
100	3	19,09	10,8	0,55	10,2	11,3
200	3	36,99	10,5	0,49	9,9	10,8
400	3	73,57	10,4	0,45	9,9	10,8

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у границама од $\phi'_{r,sec}DS= 12,5^\circ$ до $13,1^\circ$ (Табела 6.22.).

Табела 6.22. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за сиву глину

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)
50	3	11,62	13,1	0,45	12,6	13,4
100	3	22,25	12,5	0,49	12,2	13,1
200	3	45,74	12,9	0,14	12,7	13,0
400	3	89,09	12,6	0,39	12,1	12,9

Песковита прашина

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за кружно смицање се крећу у интервалу од $\phi'_{r,sec}KS= 12,8^\circ$ до $13,5^\circ$ (Табела 6.23.).

Табела 6.23. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за кружно смицање за песковиту прашину

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}$ (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,secKS}$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,secKS}$ (°)
50	3	12,04	13,5	0,65	12,9	14,2
100	3	23,08	13,0	0,81	12,2	13,8
200	3	45,51	12,8	0,76	12,1	13,6
400	3	92,26	13,0	0,76	12,2	13,7

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у границама од $\phi'_{r,sec}DS = 14,6^\circ$ до $15,6^\circ$ (Табела 6.24.).

Табела 6.24. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање за песковиту прашину

Нормални ефективни напон σ'_n (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Просечан секантни угао унутрашњег трења (°)	Стандардна девијација	Минимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)	Максимални измерени секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)
50	3	13,04	14,6	0,81	14,0	15,5
100	3	27,00	15,1	0,26	14,8	15,3
200	3	56,00	15,6	0,39	15,2	15,9
400	3	107,00	15,0	0,28	14,7	15,3

6.2.2. Приказ резултата испитивања непоремећених узорка

Алеврит

Основне идентификационо - класификационе карактеристике узорка алеврита, који су коришћени за извођење резидуалног опита директног смицања уграђеног у природном (непоремећеном) стању, приказане су у Табели 6.25, а резултати и слике извршених испитивања на овом узорку дати су на сликама 6.69 до 6.70.

Табела 6.25. Идентификационо-класификационе карактеристике уграђених узорка алеврита

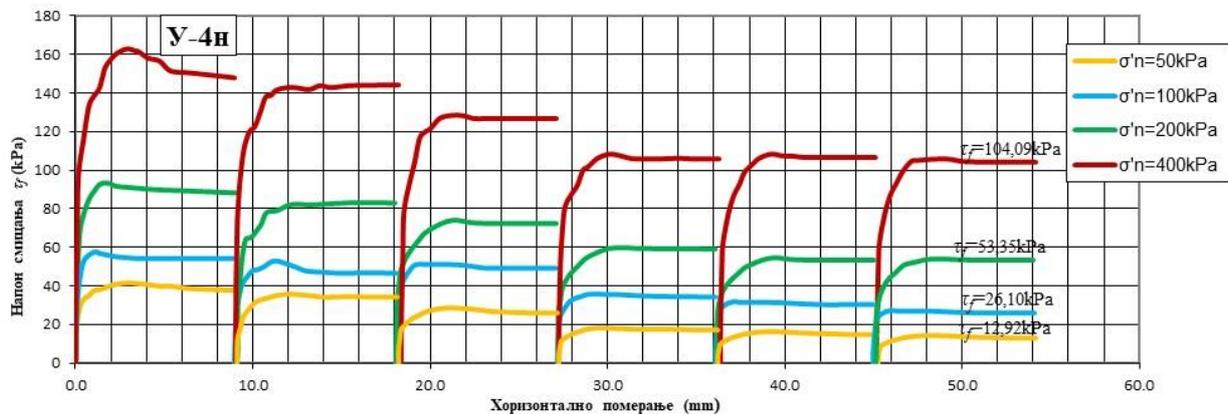
Алеврит	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,002$ mm	$d = 0,002 - 0,063$ mm	$d = 0,063 - 2,0$ mm	Влажност пре опита W (%)	Запреминска маса пре опита	I_p (%)	I_c	
					ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)		
У-4Н	13	81	6	23,9	1,956	1,578	26,9	0,843

На слици 6.69. је приказана клизна равна узорка У-4Н након испитивања у апарату за директно смицање.



Слика 6.69. Узорак У-4Н смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-4Н у апарату за директно смицање дати су на Слици 6.70.



Слика 6.70. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања узорак У-4Н

Сива глина

Основне идентификационо - класификационе карактеристике узорка сиве глине, које су коришћене за извођење резидуалног опита директног смицања уграђеног у природном (непоремећеном) стању, приказане су у Табели 6.26, а резултати и слике извршених испитивања на овом узорку дати су на сликама 6.71 до 6.72.

Табела 6.26. Идентификационо-класификационе карактеристике узграђених узорка сиве глине

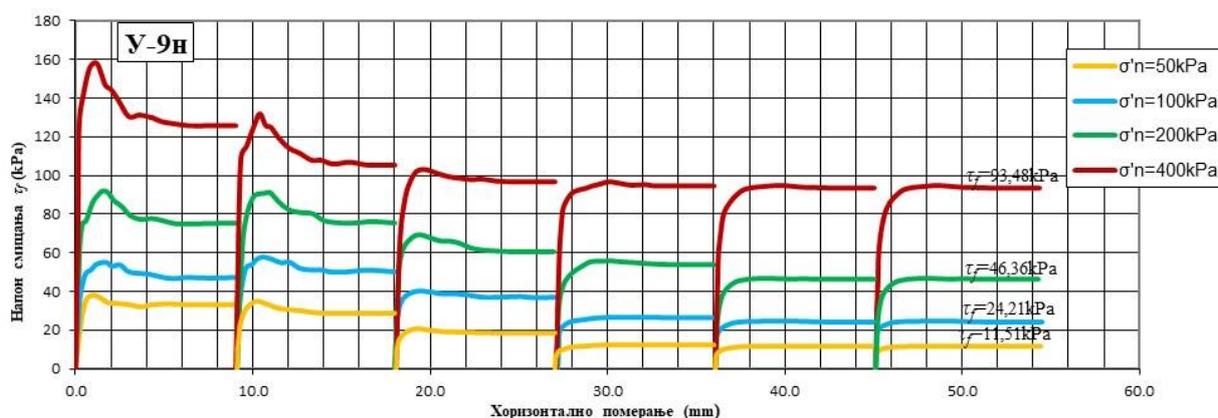
Сива глина	Идентификационо-класификациони показатељи							
	$d < 0,002$ mm	$d = 0,002 -$ $0,063$ mm	$d = 0,063 -$ $2,0$ mm	Влажност пре опита W (%)	Запреминска маса пре опита		I_p (%)	I_c
					ρ (Mg/m ³)	ρ_d (Mg/m ³)		
У-9Н	34	66	0	24,4	2,006	1,613	45,5	0,959

На слици 6.71. је приказана клизна равна узорка У-4Н након испитивања у апарату за директно смицање.



Слика 6.71. Узорак У-9Н смицан у кутији за директно смицање - после опита

Резултати испитивања на узорку У-9Н у апарату за директно смицање дати су на Слици 6.72.

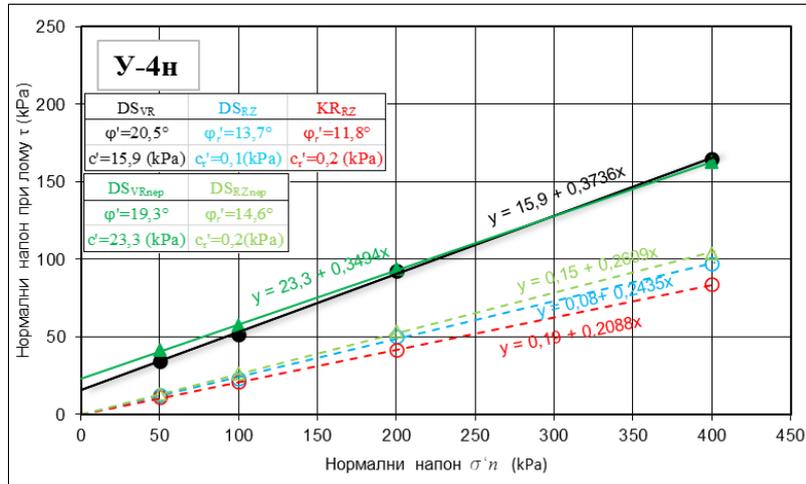


Слика 6.72. Дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања узорак У-9Н

6.2.2.1. Дефинисање чврстоће смицања непоремећених узорака

Алеврит

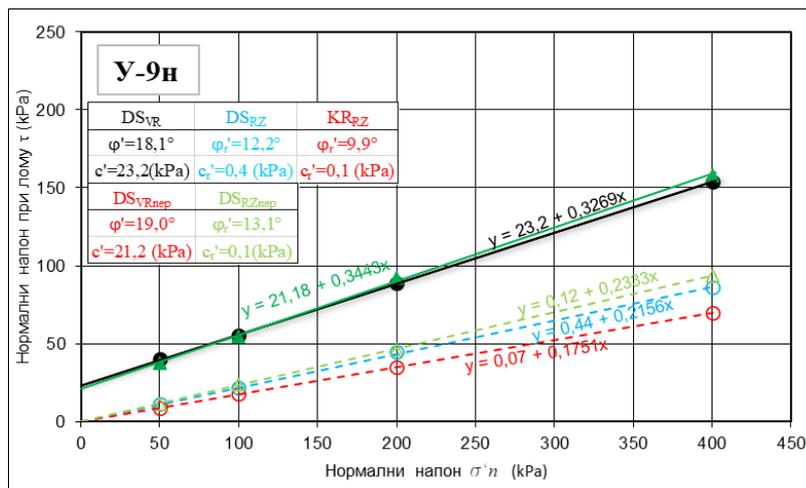
На Слици 6.73. приказан је збирни дијаграм са вредностима вршне (DS_{VR}) и резидуалне (DS_{RZ} и KR_{RZ}) чврстоће смицања за узорак У-4 који је уграђен у поремећеном стању у апарате за директно и кружно смицање и вредности вршне (DS_{VRnep}) и резидуалне (DS_{RZnep}) чврстоће смицања узорка У-4Н уграђеног у природном (непоремећеном) стању у апарат за директно смицање.



Слика 6.73. Дијаграм чврстоће смицања у функцији нормалних напона за узорак У-4Н добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

Сива глина

На Слици 6.74. приказан је збирни дијаграм са вредностима вршне (DS_{VR}) и резидуалне (DS_{RZ} и KR_{RZ}) чврстоће смицања за узорак У-9 који је уграђен у поремећеном стању у апарате за директно и кружно смицање и вредности вршне (DS_{VRnep}) и резидуалне (DS_{RZnep}) чврстоће смицања узорка У-9Н уграђеног у природном (непоремећеном) стању у апарат за директно смицање.



Слика 6.74. Дијаграм чврстоће смицања у функцији нормалних напона за узорак У-9Н добијен помоћу апарата за директно и кружно смицање

6.2.2.2. Секантни резидуални угао унутрашњег трења

Алеврит

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у границама од 14,5° до 14,9° (Табела 6.27.).

Табела 6.27. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање

Нормални напон (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)
50	1	12,93	14,5
100	1	26,10	14,6
200	1	53,35	14,9
400	1	104,09	14,6

Сива глина

Просечне вредности секантног угла унутрашњег трења добијене апаратом за директно смицање се крећу у границама од 13,0° до 13,6° (Табела 6.28.).

Табела 6.28. Вредности секантног угла унутрашњег трења добијеног апаратом за директно смицање

Нормални напон (кПа)	Број опита	Просечан резидуални напон смицања τ_r (кПа)	Секантни угао унутрашњег трења $\phi'_{r,sec}DS$ (°)
50	1	11,51	13,0
100	1	24,21	13,6
200	1	46,36	13,1
400	1	93,48	13,2

7. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЛАБОРАТОРИЈСКИХ ИСПИТИВАЊА

На основу литературе (Поглавље 2) и експерименталних испитивања тла (Поглавље 6.2), у овом поглављу ће се дефинисати три основна механизма резидуалне смичуће чврстоће и анализирати резултати добијени из апарата за директно и кружно смицање који су представљени у збирној табели 7.1.

Табела 7.1. Збирна табела идентификационо-класификационих индекса и резидуалних углова унутрашњег трења добијених из ДС и КС апарата

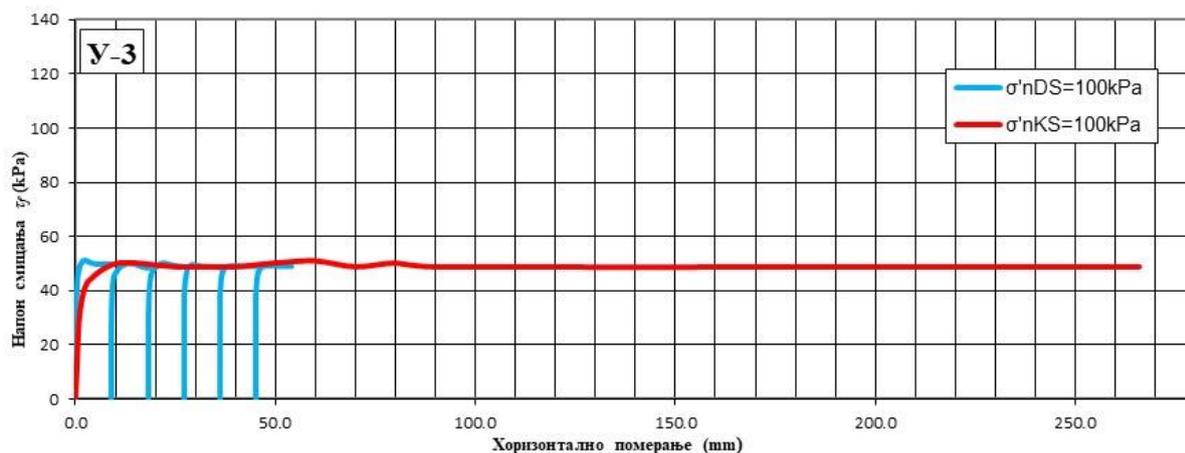
Геотехничка средина	Ознака узорка	Садржај фракција глине F_G (%)	Садржај фракција прашине F_S (%)	Садржај фракција песка F_P (%)	Граница течења LL (%)	Индекс пластичности I_P (%)	Индекс конзистенције I_c	Резидуални угао унутрашњег трења $\phi'_r DS$	Резидуални угао унутрашњег трења $\phi'_r KS$
Песак	У-1	0	3	97	-	-	-	25,2	25,3
	У-2	0	2	98	-	-	-	24,8	25,1
	У-3	0	3	97	-	-	-	25,4	25,5
Алеврит	У-4	13	81	6	46,6	26,9	0,843	13,7	11,8
	У-4Н*							14,6	-
	У-5							14,0	12,6
Глина	У-6	30	69	1	65,4	42,5	0,913	14,5	12,9
	У-7							12,9	10,8
	У-8							12,6	10,5
Песковита прашина	У-9	34	66	0	68,0	45,5	0,959	12,2	9,9
	У-9Н*							13,1	-
	У-10							15,3	13,7
Песковита прашина	У-11	4	82	14	47,5	21,6	1,155	14,8	12,2
	У-12							15,1	12,9
	У-11							6	78
У-12	7	73	20	45,7	18,3	1,174	15,1	12,9	

*узорци уграђени у непо ремећеном стању

7.1. АНАЛИЗА РЕЗИДУАЛНИХ МЕХАНИЗАМА КЛИЗАЊА

7.1.1. Котрљање

Котрљањем се карактерише стање резидуалног трења које се дешава при константној запремини, а током смицања не долази до специфичне оријентације честица. У овом стању, тла обично показују високе чврстоће смицања, често са резидуалним угловима унутрашњег трења који премашују $\phi'_r > 25^\circ$ (Lupini, 1981). Механизам котрљања се јавља код тла са високим садржајем песковитих фракција а ток смицања у апаратима за директно и кружно смицање представљен је на сликама 6.9. до 6.20. Пошто оријентација честица не доприноси механизму трења, резидуално стање се постиже при релативно малим хоризонталним померањима. Након достизања вршне чврстоће, не долази до пада напона, већ се крива смицања заравњује и прелази у резидуално стање. У апарату за кружно смицање на испитиваним узорцима песка (У-1 до У-3) резидуално стање је постигнуте негде између 70° и 100° угла ротације, што би одговарало померањима између 50,0 mm и 72,0 mm, док у апарату за директно смицање резидуално стање је наступило између трећег и четвртог циклуса тј. између 30,0 mm и 40,0 mm укупног померања (Слика 7.1).

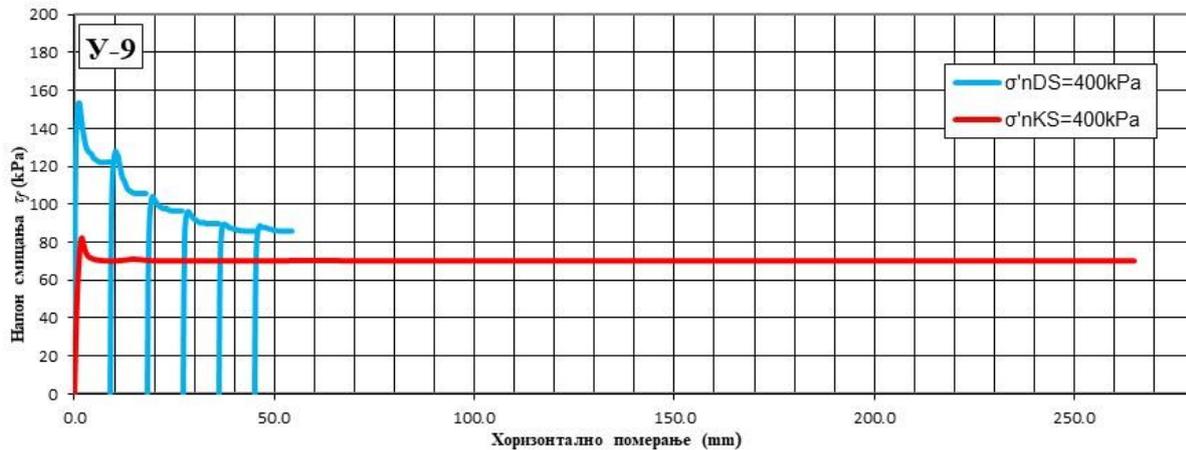


Слика 7.1. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-3 при вертикалном оптерећењу $\sigma'n=100\text{ kPa}$

7.1.2. Уређење чврстих честица дуж равни смицања

Резидуална чврстоћа тла код уређења чврстих честица дуж равни смицања условљена је минералашким саставом плочастих честица. Присуство и тип ових минерала значајно утичу на механизам клизања и коначну резидуалну чврстоћу. Уређење чврстих честица дуж равни смицања се јавља када је удео минералних честица са ниским трећем довољно висок да омогући формирање полиране смичуће површине. Као што је указао Lupini, 1981, и како је приказано у овој дисертацији, клизна раван се формира уређеном оријентацијом честице фракције глине. Посматрају се ниски углови резидуалног трења, који се обично крећу у опсегу од 5° до 12° , иако местимично могу бити већи.

Ток смицања у апаратима за кружно и директно смицање за узорке сиве глине представљен је на дијаграмима на сликама 6.33-6.44. С обзиром да се ради о прерађеним узорцима, у њима преовлађују непостојане, односно хидроколоидалне везе, због чега је ток активирања отпора спорији и сложенији. Овај процес прати видљива хоризонтална деформација узорка, која настаје услед померања, па чак и ротирања и смицања елементарних честица. Међутим, код непоремећеног узорка (У-9Н), тло има тенденцију да показује крти и јасно изражени лом током иницијалног смицања (Слика 6.72.). Дијаграми илуструју драстичан пад смичуће чврстоће, што се може приписати већем садржају глинених фракција и високој пластичности тла. Плочасти минерали глине присутни у тлу показују снажну тенденцију да се оријентишу паралелно са равни смицања током деформације. Ова оријентација доприноси значајном смањењу чврстоће тла. У апарату за кружно смицање резидуално стање је постигнуто негде између 15,0 mm - 18,0 mm хоризонталне деформације. Док се у апарату за директно смицање резидуално стање постигло тек у петом циклусу смицања (између 45,0 mm и 50,0 mm) (Слика 7.2).



Слика 7.2. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-9 при вертикалном оптерећењу $\sigma'_n=400$ kPa

Према Lupini-ју, ово понашање се класификује као клизни механизам или уређење чврстих честица. Skempton (1970-1985) је закључио да услед повећања влажности као последица деформације и реоријентације глинених честица паралелно смеру смицања, након постизања вршне дренаране чврстоће смицања долази до њеног јасно израженог пада у преконсолидованој глини.

7.1.3. Прелазно стање између котрљања и уређења чврстих честица

Прелазно стање између котрљања и уређења чврстих минералних честица дуж клизне равни карактерише се присуством дисконтинуираних клизних смичућих површина, које се формирају од делова тла чије је понашање слично механизму котрљања. Померање потребно за успостављање резидуалних услова повећава се са садржајем глине што за последицу има значајно повећање удела клизања које може да се препише уређењу чврстих честица и самим тим делимичном умањењу прелазног механизма смицања.

Ток смицања у апаратима за кружно и директно смицање за узорке алеврита и песковитих прашина представљен је дијаграмима на сликама од 6.21. до 6.32. и од 6.45 до 6.56. На основу ниског садржаја глине и средње пластичности тла, у комбинацији са специфичним обликом криве напон-хоризонтална деформација, можемо закључити да се механизам кретања класификује као прелазни према Lupini-ју (1981). Прелазна тла карактерише јединствена мешавина кохезивних и некохезивних фракција. Низак садржај глиновитих фракција сугерише да тло задржава неке кохезивне карактеристике, али неће показивати исти ниво пластичности као глиновита тла. Средња пластичност указује да тло испољава пластично понашање да се деформише под напрезањем, али не прекомерно, што одговара прелазном понашању. Како се садржај глине повећава, уређено понашање постаје доминантније, док већи садржаји прашинастих, а нарочито песковитих фракција у тлу фаворизују механизам котрљања. На испитиваним узорцима алеврита у апарату за кружно смицање резидуално стање је постигнуто негде између 15,0 и 45,0mm хоризонталне деформације, са изузетком код узорака У-4 ($\sigma'_n = 400$ kPa) и У-5 ($\sigma'_n = 100$ kPa) где је резидуално стање постигнуто на око 75mm хоризонталне деформације. На испитиваним узорцима песковите прашине у апарату за кружно смицање резидуално стање је постигнуто негде између 15,0 и 75,0mm хоризонталне деформације, са изузетком код узорка У-11 ($\sigma'_n = 100$ kPa и $\sigma'_n = 200$ kPa) где је резидуално стање постигнуто негде између 88,0 и 96,0 mm хоризонталне деформације. Док се у апарату за

директно смицање резидуално стање постигло негде између трећег и четвртог циклуса, између 30,0 mm и 40,0 mm укупног померања (Слика 7.3).



Слика 7.3. Карактеристични дијаграм зависности напона смицања и хоризонталног померања за узорак У-6 при вертикалном оптерећењу $\sigma'_n=200$ kPa

Као и у случају код узорка У-9Н, узорак алеврита У-4Н уграђен у непоремећеном стању показује крто понашање током иницијалног смицања у нормално консолидованом стању и крива тока смицања показује неуједначеност и непредвидљивији облик (Слика 6.71).

Ефекат нагомилавања честица

Код директног смицања после првог и другог циклуса смицања и враћања кутије у првобитан положај због оријентације честица у клизној равни на узорцима У-5 (крива при нормалним оптерећењима од 100 и 400 кПа), У-7 (крива на 100 кПа) и У-9 (крива на 100 и 200 кПа) је дошло до њиховог нагомилавања и истезања (распоређивања), услед којег долази до наглог повећања напона смицања (Слике 6.28, 6.36 и 6.44). Криве смичући напон у зависности од хоризонталног померања код реверсног ДС опита је понекад веома тешко тумачити због обновљених пикова при променама смера смицања и самог облика криве (Lupini, 1980).

7.2. ПОРЕЂЕЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Резидуални угао унутрашњег трења варира у зависности од својстава тла као и величине нормалног напона, под условом да је резидуална кохезија тла нула (Skempton, 1964; Skempton, 1985; Максимовић, 1989; Kimura и сар., 2014). Подразумева се да су након постизања резидуалног стања, сви унутрашњи адхезивни и кохезивни ефекти унутар узорка исцрпљени. У овој фази, честице у узорку су изгубиле способност да одржавају међусобну повезаност, што значи да више не постоје додатне кохезивне силе које би их држале заједно и сматра се да је вредност кохезије једнака нули. Вредности кохезије које су приказане на дијаграмима чврстоће смицања у поглављу 6.2.1.1. кретале су се до 0,5 кПа, а узимајући у обзир претходно наведено, усвојено је за даље разматрање да је резидуална кохезија једнака нули ($c'_r = 0$ кПа).

На основу резултата испитивања за песак приказаних у табелама 6.17, 6.18. и 7.1., поређењем према различитим начинима интерпретације, тј. са секантним резидуалним угловима унутрашњег трења, вредности $\varphi'_{r,secDS}$ су веће за $1,5^\circ$ - $2,1^\circ$ у односу на φ'_{rDS} , док се вредности за KS слажу у доброј мери. Резидуална чврстоћа пескова није често анализирана у литератури. Lupini (1981) је у својој анализи дошао до закључка да се резидуални углови за песковита тла

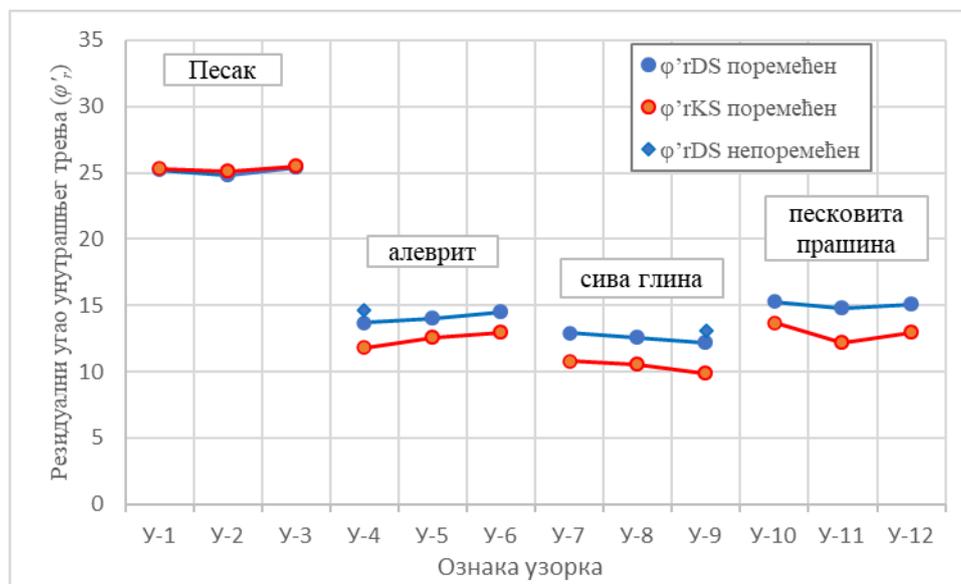
обично крећу изнад 25° што се у доброј мери поклапа са резултатима добијеним у овој дисертацији, осим узорка У-2 чија је вредност добијена у апарату DS износи $\varphi'_{r,DS} = 24,8^\circ$.

На основу два типа интерпретације резултата за резидуалне углове φ'_r и $\varphi'_{r,sec}$, поређењем резултата добијених за алеврит (табеле 6.19, 6.20. и 7.1.) утврђено је добро подударане резултата.

Слично томе, поређење резултата резидуалних углова унутрашњег трења φ'_r и $\varphi'_{r,sec}$ за сиве глине (табеле 6.21, 6.22. и 7.1.) показује да су вредности $\varphi'_{r,sec,KS}$ веће за $0,5^\circ$ у односу на $\varphi'_{r,DS}$, док се вредности добијене методом DS у доброј мери слажу.

Резултати интерпретације резидуалних углова унутрашњег трења (φ'_r и $\varphi'_{r,sec}$) за песковите прашине приказаних у табелама 6.23, 6.24. и 7.1., показују добра поклапања добијених вредности. Међутим, вредности $\varphi'_{r,KS}$ показују много веће расипање резултата у односу на $\varphi'_{r,sec,KS}$. Насупрот томе, код вредности добијених помоћу DS апарата ситуација је обрнута, $\varphi'_{r,sec,DS}$ показују знатно веће расипање у односу на оне $\varphi'_{r,DS}$.

На слици 7.4. дат је збирни дијаграм вредности резидуалних углова унутрашњег трења добијених у апарату за директно смицање и апарату за кружно смицање.



Слика 7.4. Поређење вредности резидуалног угла унутрашњег трења добијених у апарату за директно смицање и апарату за кружно смицање

Генерално, поређење добијених резултата (Слика 7.4.) показује следеће:

- Резидуални углови унутрашњег трења пескова добијени из KS и DS апарата показују добро поклапање;
- Резидуални углови унутрашњег трења добијени из KS на сивим глинама су за $1,7 - 2,3^\circ$ мањи од углова унутрашњег трења одређених класичном методом (реверсним опитом) за резидуалне параметре чврстоће смицања у DS ;
- На узорцима алеврита, разлика између резидуалних углова унутрашњег трења добијених из DS и KS је нешто мања, при чему су вредности углова из DS за $1,2 - 1,9^\circ$ веће у односу на вредности добијене из KS ;

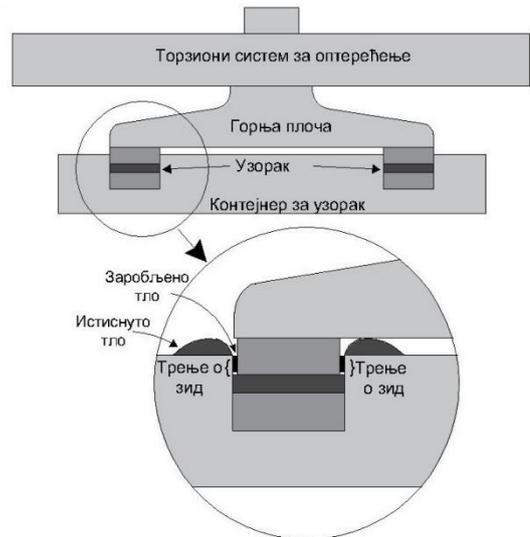
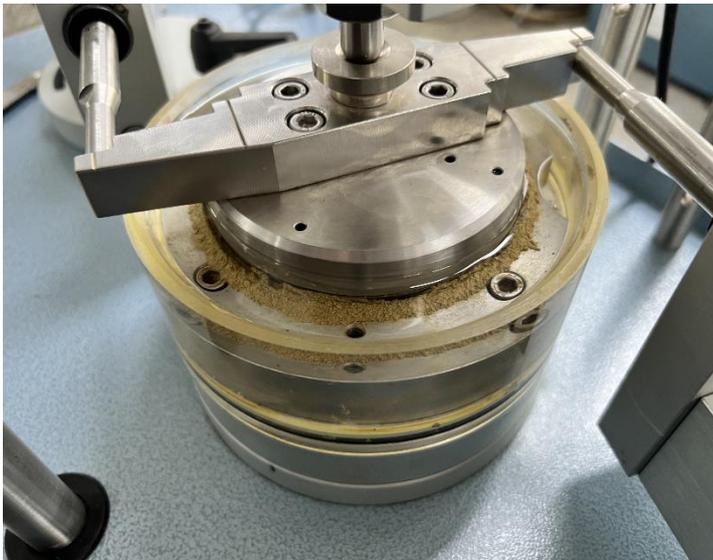
- Код узорака песковите прашине, разлика у резидуалним угловима унутрашњег трења добијених из DS и KS је израженија, при чему су вредности угла из DS за 1,6 - 2,6° веће од вредности добијених из KS.

Anaii и сар. (1988) утврдили су да модификовани опити на Bromhead-овом апарату за кружно смицање дају ниже вредности резидуалног угла трења од реверсног опита директним смицањем. Vithana и сар. (2012) су у свом истраживању објавили да су вредности φ'_r добијене опитом директног смицања скоро два пута веће у односу на оне добијене кружним смицањем на узорцима бентонитских и муљевитих глина, а код узорака леса, алеврита и алувијалног леса веће за око 1,02 до 1,3 пута. Ракић и сар. (2011) су на узорцима високо пластичних угљевитих глина и алеврита са ПК „Тамнава - Западно Поље“ утврдили да су вредности резидуалног угла унутрашњег трења добијене у DS апарату биле веће у односу на KS апарат. За глине, ова разлика је износила 4,0° - 4,6°, док је за алеврите била у опсегу од $\varphi'_r = 1,3^\circ - 2,0^\circ$. Chen и Liu (2013), с друге стране, добили су сличне вредности φ'_r користећи оба апарата. Heidemann (2020) је на узорцима прашинастог тла из великог клизишта у Бразилу утврдио да је резидуални угао унутрашњег трења измерен у DS апарату износио $\varphi'_{rDS} = 12,0^\circ$, док је у KS апарату добијена знатно мања вредност од $\varphi'_{rKS} = 7,7^\circ$.

Вредности резидуалних углова унутрашњег трења за узорке У-4 (алеоврит) и У-9 (сива глина) који су уграђени прерађени (преобликовани) у апарат за директно смицање износе $\varphi'_{rDS} = 13,7^\circ$ и $\varphi'_{rDS} = 12,2^\circ$, редом. Ради поређења, узорци истих материјала, испитани у непоремећеном стању показали су веће вредности резидуалних углова унутрашњег трења, од $\varphi'_{rDS} = 14,6^\circ$ за алеоврит и $\varphi'_{rDS} = 13,1^\circ$ за сиву глину тј. у оба случаја је повећање угла унутрашњег трења износило $\varphi'_r = 0,9^\circ$ (Слика 7.4). Разлике у резултатима између узорака који су прерађени и оних који су остали у непоремећеном стању могу указивати на значајне промене у структури тла, које могу настати током процеса обраде. Ово смањење вредности може се повезати са ефектима као што су негативне промене у порозности или структурним својствима тла. Поред тога, док се тло прерађује, долази до промене у међусобном распореду честица, што може додатно утицати на механизме везивања честица.

7.3. ОГРАНИЧЕЊА АПАРАТА

Главни фактор који утиче на испитивање резидуалне чврстоће у Бромхедовом апарату је величина трења која се развија дуж унутрашњег и спољашњег зида порозног камена и кутије апарата (Слика 7.5). Што се више горњи порозни камен утисне у узорак, то се површина трења повећава јер се активира и трење између зидова апарата и самог узорка и самим тим су вредности резидуалне чврстоће веће. Такође, приликом смицања обично се одређена количина узорка истискује између горњег порозног камена и зидова кутије са узорком. Како се горњи порозни камен спушта у кутију са узорком, повећава се могућност да се избачено тло зароби између кутије и порозног камена. То такође може да доведе до повећања отпора смицања како се горња плоча све више утискује у узорак.



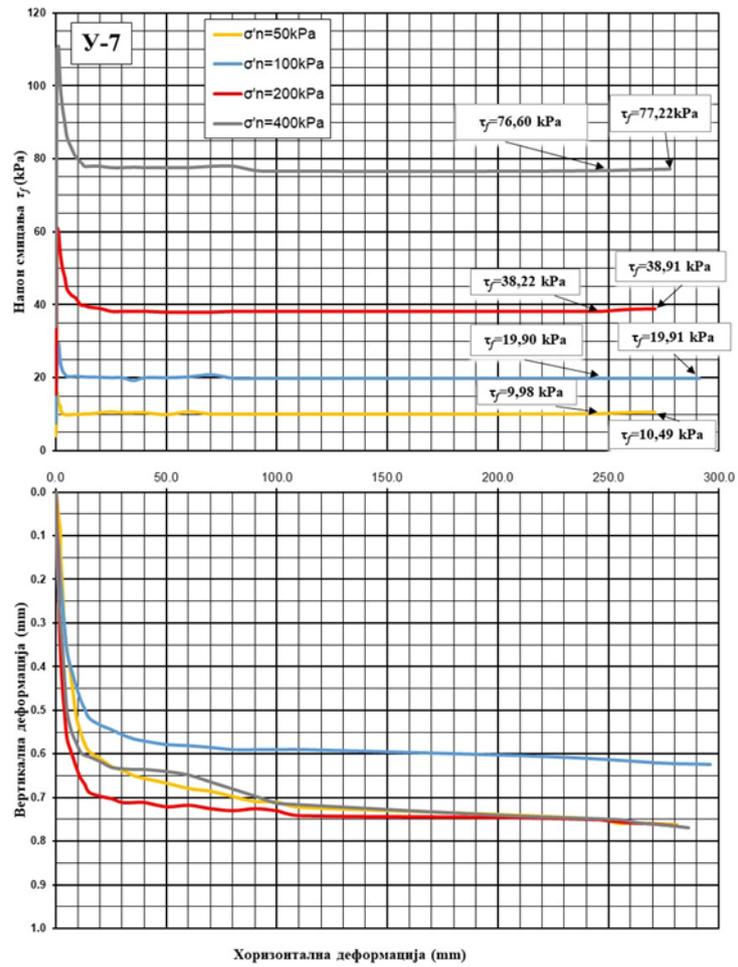
Слика 7.5. Трење дуж унутрашњег и спољашњег зида изазвано истискивањем дела узорка (извор: Меехан, 2007)

На основу истраживања Stark (1992), количина истиснутог тла из апарата се повећава са брзином смицања, повећањем ефективног нормалног напона, садржајем глине и напоном бубрења. Узорци су имали дебљину од 2,0 и 4,0 mm пре смицања и добијене су вредности резидуалног смичућег напона тла од 32 kPa и 24 kPa, при нормалном напону од 345 kPa. Разлика у резидуалном смичућем напону, тј. 8 kPa или 25%, приписује се додатном трењу између зидова које је изазвано утискивањем горњег порозног камена за додатна 2,0 mm у кутију са узорком пре смицања.

Резултати испитивања добијени овим истраживањем показују да се најнижа резидуална чврстоћа постиже када горњи порозни камен остаје на или близу површине кутије са узорком, односно када се не врши његово утискивање у узорак, и да ова резидуална чврстоћа најбоље одговара ситуацији на терену.

На основу овог истраживања утврђено је да узорак може да обави укупно спуштање, услед консолидације и/или избацивања тла током смицања, од 0,75 mm (15% од почетне висине која износи 5 mm) и да и даље постиже резидуалну чврстоћу која је приближна стању на терену.

На слици 7.6. за узорак У-7 приказани су резултати при различитим вертикалним оптерећењима (50, 200 и 400 kPa) где се јасно види да је дошло до континуираног раста напона смицања након што је горњи порозни камен прешао границу утискивања од 0,75 mm. Исто то се десило на узорцима: У-5 (при ефективном вертикалном напону $\sigma'_n = 200$ kPa), У-6 (при ефективном вертикалном напону $\sigma'_n = 400$ kPa), У-8 (при ефективним вертикалним напонима $\sigma'_n = 100$ kPa и 200 kPa), У-9 (при ефективном вертикалном напону $\sigma'_n = 100$ kPa).



Слика 7.6. Карактеристичан дијаграм односа напона снцања и хоризонталне деформације и однос вертикалне и хоризонталне деформације за узорак Y-7

8. КОРЕЛАЦИОНЕ ЗАВИСНОСТИ И ВЕРИФИКАЦИЈА

8.1. КОРЕЛАЦИОНЕ ЗАВИСНОСТИ ПАРАМЕТАРА

Корелације имају значајну улогу у механици тла од самог почетка њихове примене, посебно када лабораторијска или ин-ситу испитивања одређених физичких својстава тла нису изводљива. С обзиром на време и финансијска средства неопходна за испитивање резидуалне чврстоће тла, неки истраживачи су развили корелације између различитих физичких својстава тла и параметара резидуалне чврстоће смицања. Ове корелације, засноване на доступним подацима испитивања, омогућиле су добру процену параметара чврстоће (Skempton 1964, 1985; Chandler, 1969; Voight, 1973; Lupini и сар., 1981; Mesri и Cepeda-Diaz, 1986; Collota и сар., 1989; Stark и Eid, 1994; Mesri и Shahien, 2003; Tiwari и Marui, 2005; Tiwari и Ajmera, 2011; Natipoglu, 2011).

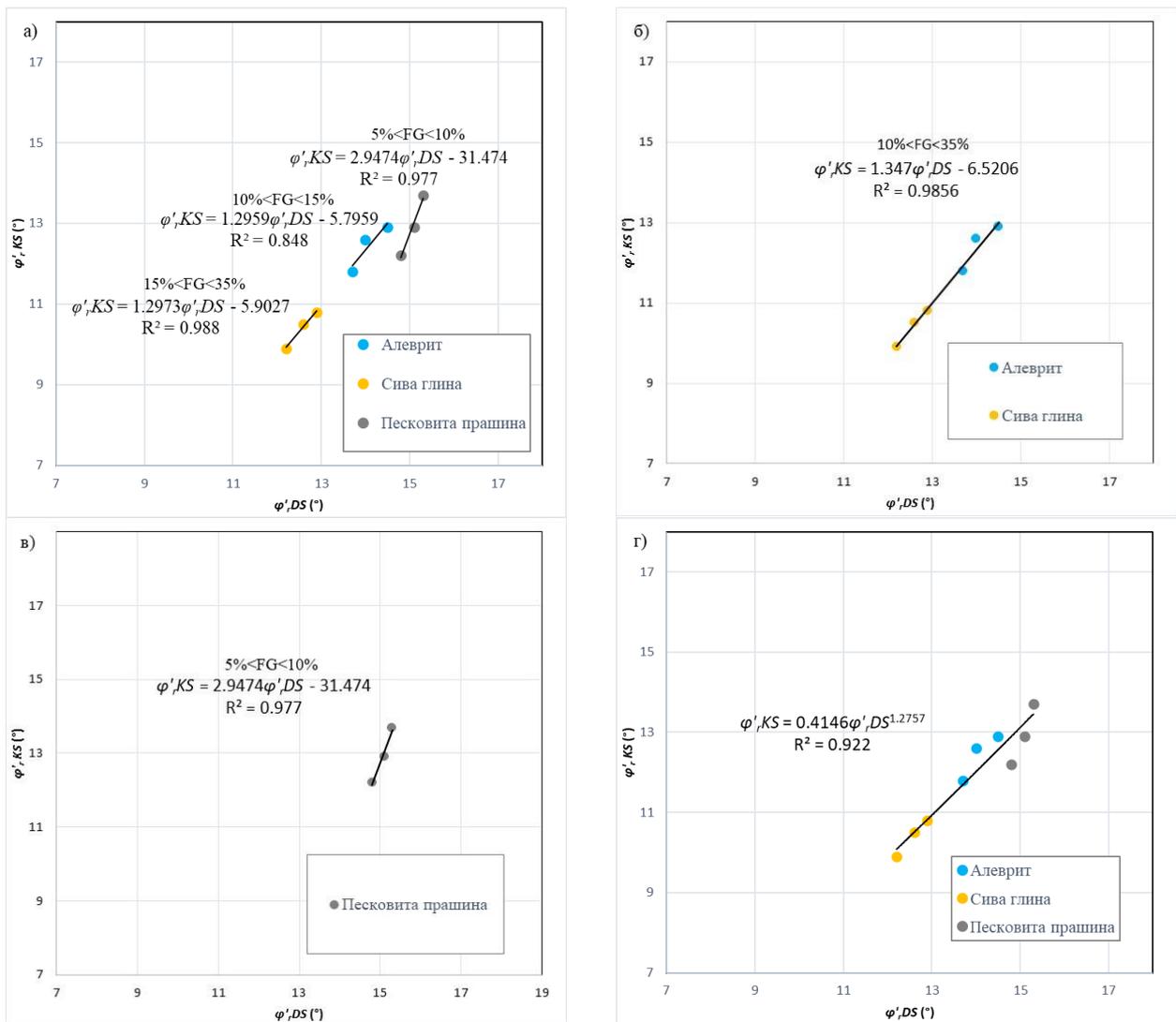
Практичне корелације између резидуалног угла унутрашњег трења, гранулометријског састава и/или Атербергових граница кохезивног тла су често у употреби а као најзначајније приказане су у следећој литератури:

- ϕ'_r - глиновите фракције ($F_G - d \% < 0,002mm$): Skempton (1964); Borowicka (1965); Binnie, Clark и Skempton (1967); Blondeau-Josseaux (1976); Kenney (1977); Lupini, Skinner & Vaughan (1981); Skempton (1985); Stark и Eid (1994); Tiwari (2005); Kimura и сар. (2013); Lian и сар. (2020);
- ϕ'_r - Индекс пластичности (I_p): Fleischer (1972); Voight (1973); Kanji (1974); Bucher (1975); Seycek (1979); Vaughan, Hight, Sodha & Walbancke (1979); Lambe (1985); Stark и Eid (1994); Wesley (2003); Tiwari (2005); Kimura и сар. (2013); Lian и сар. (2020); Shimobe (2025);
- ϕ'_r - граница течења (LL): Haefeli (1951); Bishop (1971); Stark и Eid (1994); Wesley (2003); Tiwari (2005); Kimura и сар. (2013); Lian и сар. (2020); Hayden (2020); Shimobe (2025);.

У овој дисертацији су поред ових корелација, анализирани и односи између резидуалних углова унутрашњег трења и процента учешћа прашинастих фракција F_s ($d \% = 0,002-0,063 mm$), процента учешћа песковитих фракција F_p ($d \% = 0,063-2,0 mm$) (Yatabe, 1996) и CALIP параметра (Collota, 1989).

8.1.1. Корелационе зависности између резидуалних углова унутрашњег трења дефинисаних коришћењем различитих апарата (DS и KS)

Из кохерентних слојева ПК Дрмно (алеврит, сива глина и песковита прашина) спроведена је корелациона анализа вредности резидуалних углова унутрашњег трења добијених из апарата за директно и кружно смицање (Слика 8.1).



Слика 8.1. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења добијених из апарата за кружно и директно смицање а-в) Линеарна регресија, г) Степена регресија

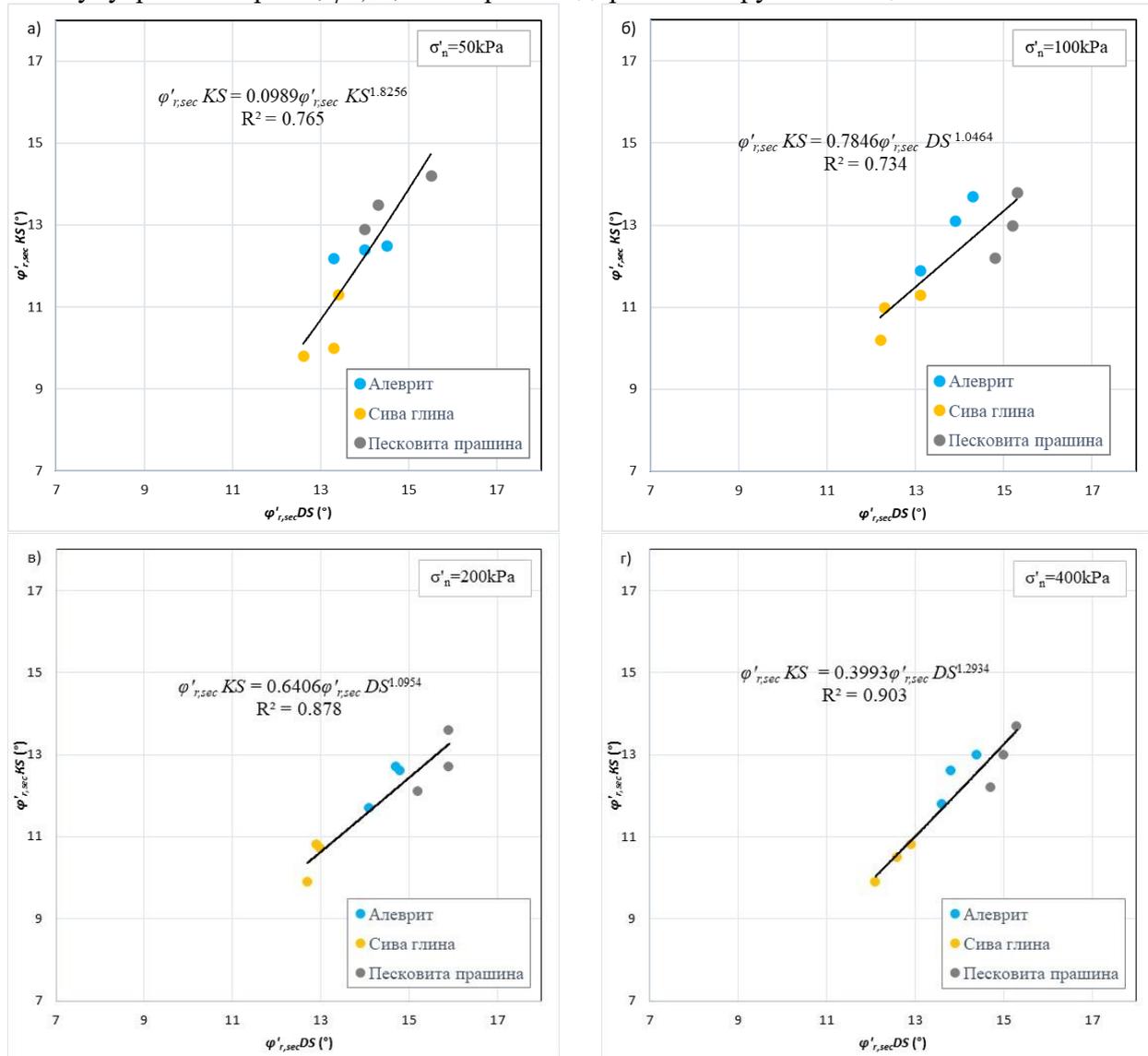
Анализа показује да постоји јака корелација између вредности угла унутрашњег трења добијених директним и кружним смицањем, али да се ова корелација разликује у зависности од процента учешћа глиновитих фракција. За узорке са сличним саставом глиновитих фракција линеарна регресија пружа добру апроксимацију везе ($R^2=0,848 - 0,988$). Међутим, када се анализирају сви узорци заједно, услед расипања вредности на дијаграму, линеарни модел није погодан, а предложена степена функција (јед. 8.1) је прецизнији модел. Степена функција се показује као бољи приступ када се анализирају сви узорци заједно.

Корелација између вредности углова измерених у два апарата за смицање може се изразити степеном функцијом:

$$\varphi'_{r,KS} = 0,4146\varphi'_{r,DS}^{1,2757} \quad (8.1)$$

са коефицијентом корелације $R^2 = 0,922$, где је $\varphi'_{r,KS}$ угао добијен из апарата за кружно смицање, а $\varphi'_{r,DS}$ је вредност угла добијена из апарата за директно смицање.

На слици 8.2. приказана је корелациона анализа добијених вредности секантних резидуалних углова унутрашњег трења, $\phi'_{r,sec}$, из апарата за директно и кружно смицање.



Слика 8.2. Корелационе зависности секантних резидуалних углова унутрашњег трења добијених из апарата за кружно и директно смицање при нормалним ефективним напонима а) 50 kPa, б) 100 kPa, в) 200 kPa, г) 400 kPa

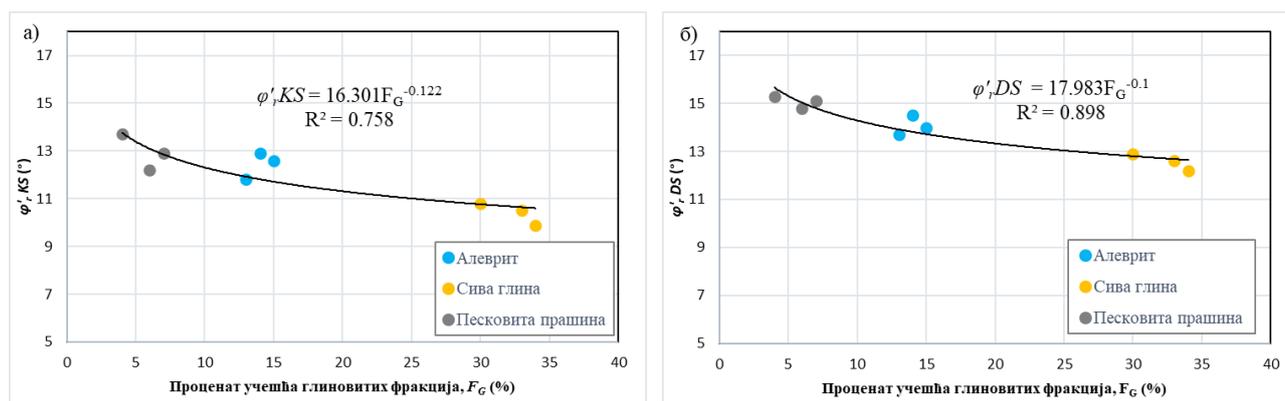
Анализа секантних углова на слици 8.2. показује генерално добру нелинеарну корелацију између вредности добијених DS и KS методама. Вредности коефицијената корелације (R^2) указују на умерену корелацију при нормалним ефективним напонима од 50 kPa и 100 kPa, док је при вишим вредностима напона (200 и 400 kPa) успостављена јака корелациона веза. Ово сугерише да веза између секантних углова добијених различитим методама постаје конзистентнија при већим нивоима напона.

8.1.2. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и процентуалног учешћа појединих фракција у гранулометријском саставу тла

Skempton (1964) је доказао да резидуални угао унутрашњег трења има тенденцију смањења са повећањем процента фракција глине, F_G . Резидуална чврстоћа различитих врста тла су испитивана са становишта типа и процента учешћа фракција глине (Voight, 1973; Kanji, 1974b;

Kenney, 1977). Gibo и сар. (1987) су објавили да постоји јасна корелација између садржаја монтморионита и његове резидуалне чврстоће. Монтморионит се сматра минералом глине који даје ниску вредност φ'_r . Сматрали су да ће фракције монтморионита вероватно бити оријентисане паралелно са смером смицања. Fang (2024) је на 15 вештачки направљених узорака материјала узетих из насипа акумулационог резервоара бране са различим процентима учешћа финозрних фракција ($d \leq 0,075\text{mm}$) добио вредности $\varphi'_r = 32,94\text{--}13,97^\circ$ (Табела 2.2) и закључио да се резидуална чврстоћа тла смањује са повећањем процента финих честица.

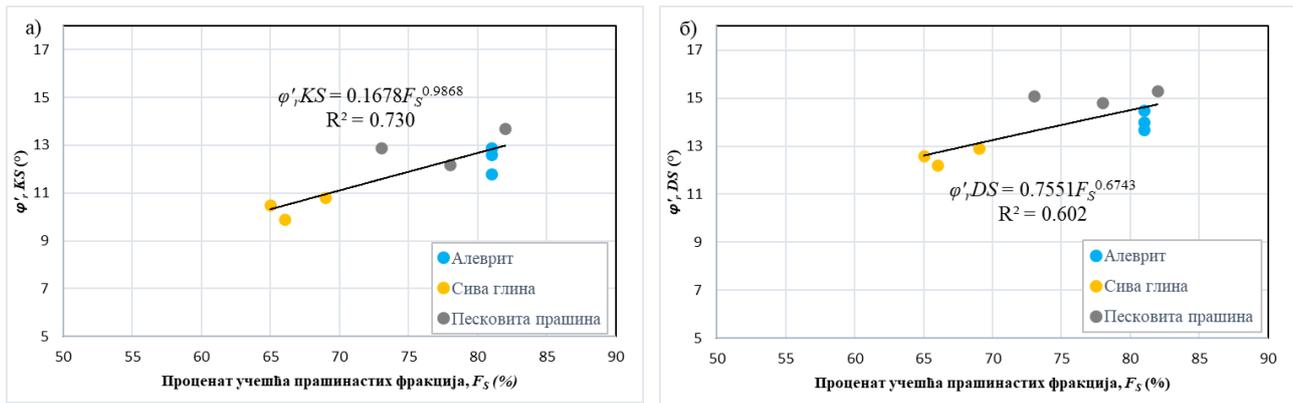
На слици 8.3. приказан је корелациони дијаграм φ'_r у односу на проценат учешћа фракција глине F_G различитих врста тла. Према Skempton-у (1985), када је у тлу фракција глине око 50%, резидуална чврстоћа је скоро у потпуности контролисана трећем клизања минерала глине, а даље повећање фракције глине има мали ефекат.



Слика 8.3. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и процента учешћа глиновитих фракција F_G

Између резидуалног угла унутрашњег трења (из оба испитивања) и садржаја глиновитих фракција утврђена је јача до јака нелинеарна корелација. Са порастом удела глине, угао унутрашњег трења се смањује, што је у складу са постојећим истраживањима (Skempton (1964); Borowicka (1965); Binnie, Clark и Skempton (1967); Blondeau-Josseume (1976); Kenney (1977); Lupini, Skinner и Vaughan (1981); Skempton (1985); Stark и Eid (1994); Tiwari (2005); Kimura и сар. (2013); Lian и сар. (2020)) која указују на то да већи удео глине доводи до смањења резидуалне чврстоће услед преоријентације плочастих минерала паралелно правцу смицања. Корелациона зависност је јача код резултата добијених методом директног смицања ($R^2 = 0,898$) у поређењу са кружним смицањем ($R^2 = 0,758$).

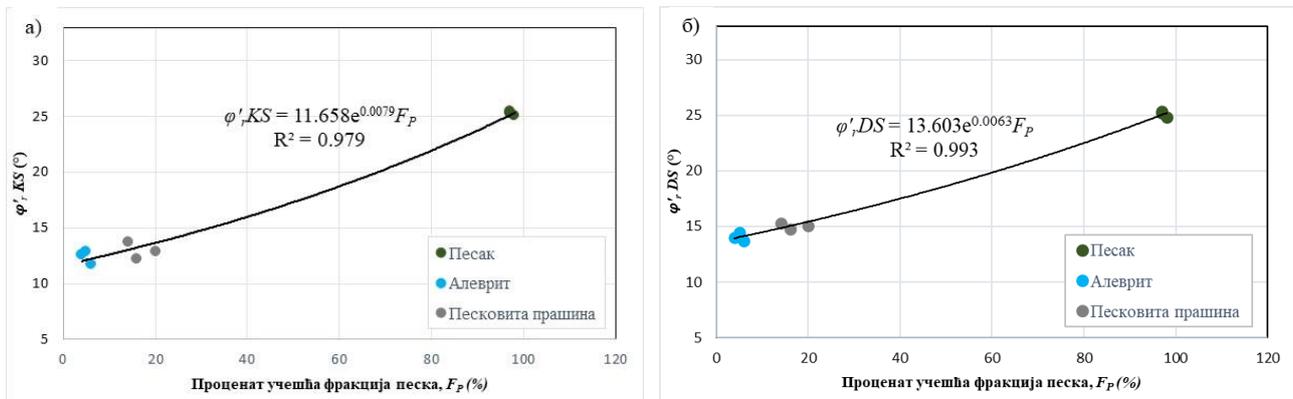
Однос између вредности резидуалног угла унутрашњег трења φ'_r и процентуалног учешћа фракција прашине приказан је на Слици 8.4. Може се приметити да вредности φ'_r расту са повећањем процента учешћа прашинастих фракција.



Слика 8.4. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и процента учешћа фракција прашине F_S

Корелација је представљена нелинеарном функцијом (Слика 8.4), при чему је добијен коефицијент корелације $R^2 = 0,730$ за однос $\varphi'_{r,KS} - F_S$, односно $R^2 = 0,602$ за $\varphi'_{r,DS} - F_S$. Ове вредности указују на јачу везу кад су у питању параметри добијени из КС апарата и могу имати практичну важност између параметара. Док корелација параметара $\varphi'_{r,DS}$ и F_S показује значајну везу и мању несигурност између ових параметара.

Корелација је урађена на девет узорак (по три узорка из средина песка, алеврита и песковите прашине). Узорци сиве глине нису узимани у корелацију због ниског садржаја песковитих фракција (0 - 2%). Однос између вредности резидуалног угла унутрашњег трења φ'_r и процента учешћа фракција песка (F_p) приказан је на Сlici 8.5. Може се приметити да вредности φ'_r расту са повећањем процента учешћа песковитих фракција.

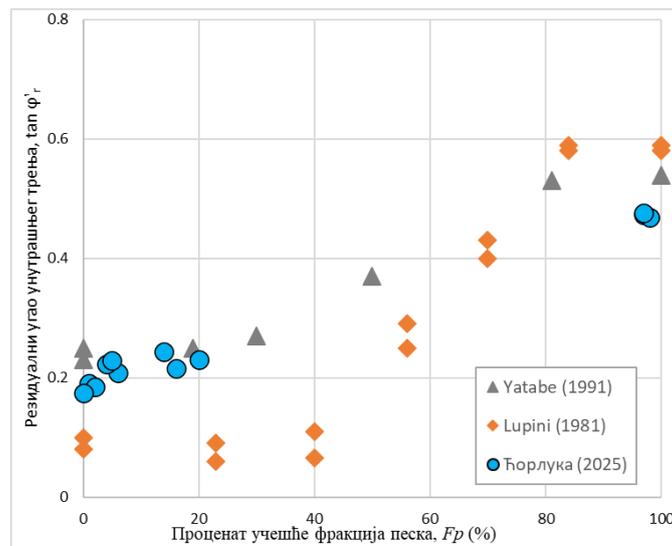


Слика 8.5. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и процента учешћа фракција песка F_p

Корелација је представљена експоненцијалном нелинеарном линијом (Слика 8.5), при чему је за $F_p - \varphi'_{r,KS}$ добијен коефицијент корелације $R^2 = 0,98$, односно, за $F_p - \varphi'_{r,DS}$, $R^2 = 0,99$. Ове вредности указују на врло јаку везу између ових параметара и имају високу практичну важност.

Yatabe и сар. (1996) утврдили су да се резидуални угао унутрашњег трења (φ'_r) значајно повећава када садржај песковитих фракција у тлу (F_p) пређе 30%, што је потврђено резултатима истраживања у дисертацији (Слика 8.6). Такође, показали су да када F_p пређе 80%, вредност φ'_r постаје приближно једнака оној за чисти песок ($F_p = 100\%$). Ови резултати указују

да присуство песка има значајан утицај на резидуалну чврстоћу тла, али тај утицај не прати једноставан линеарни тренд



Слика 8.6. Однос $\tan \varphi'_r$ и процентуалног учешћа фракција песка (Yatabe, 1996 - модификовано)

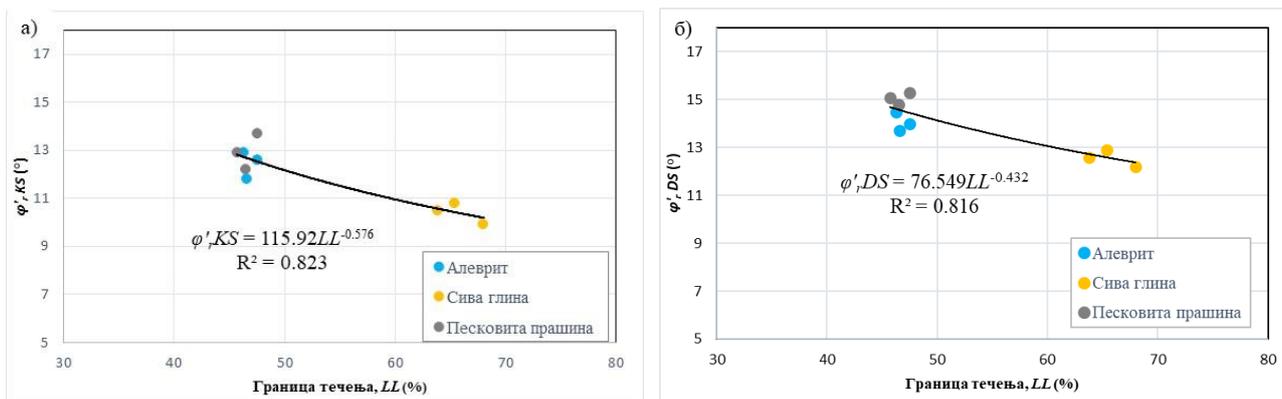
У овој дисертацији, добијени резултати за однос између процентуалног учешћа песковитих фракција (F_p) и тангенса угла унутрашњег трења ($\tan \varphi'_r$) су упоређени са резултатима приказаним у радовима Yatabe (1991) и Lupini (1981) (Слика 8.6). Анализа показује да су вредности $\tan \varphi'_r$ у овој дисертацији углавном веће него у раду Lupini-ја (1981) за већину испитиваних узорака. Међутим, при већим вредностима F_p , $\tan \varphi'_r$ је у овој дисертацији ниже него у раду Yatabe (1991), где је уочена најјача позитивна корелација између F_p и $\tan \varphi'_r$. Ове разлике у резултатима вероватно су последица варијација у својствима тла и/или методологији испитивања.

8.1.3. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења и индекса пластичности

Корелације засноване на параметрима који дефинишу стање пластичности, прилично су уобичајене у литератури и могу бити веома корисне. Најчешће се користе корелације које укључују границу течења LL или индекс пластичности I_p .

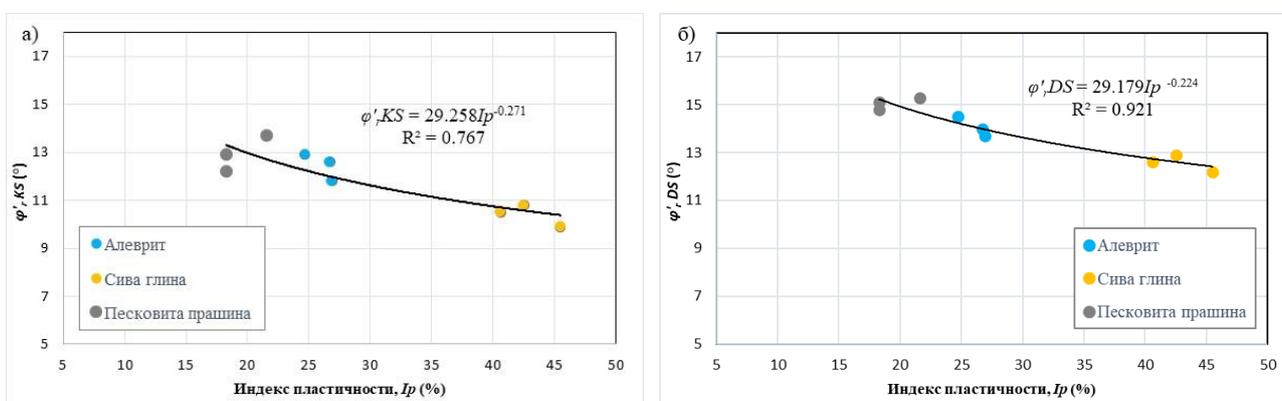
У основи, својства кохезивног тла не могу се независно повезати ни са LL ни са I_p . Casagrande (1948) је направио свој добро познати дијаграм пластичности, који је сада успостављен као основа за процену и класификацију ситнозрних тла, уз одређене корекције које су временом увођене. Casagrande и његови сарадници тада су препознали ограничења класификације ситнозрних тла на основу величине честица и открили да Атербергове границе пружају много поузданији показатељ инжењерских својстава

Однос између вредности резидуалног угла унутрашњег трења φ'_r и границе течења (LL) приказан је на Слици 8.7. Корелација је урађена за девет узорака (по три узорка из средина алеврита, сиве глине и песковите прашине). Може се приметити да вредности φ'_r опадају са повећањем границе течења, за испитиване узорке са границом течења $LL > 45\%$, што сугерише директну везу између механичких карактеристика и границе течења LL .



Слика 8.7. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и границе течења LL

Корелације између ових вредности изражене су односом са коефицијентом корелације LL – $\phi'_{r,KS}$ и LL – $\phi'_{r,DS}$ који износи 0,823, односно 0,816 (Слика 8.7). Ове вредности указују на јаку везу између ових параметара и имају практичну важност.



Слика 8.8. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења из КС апарата (а) и ДС апарата (б) и индекса пластичности I_p

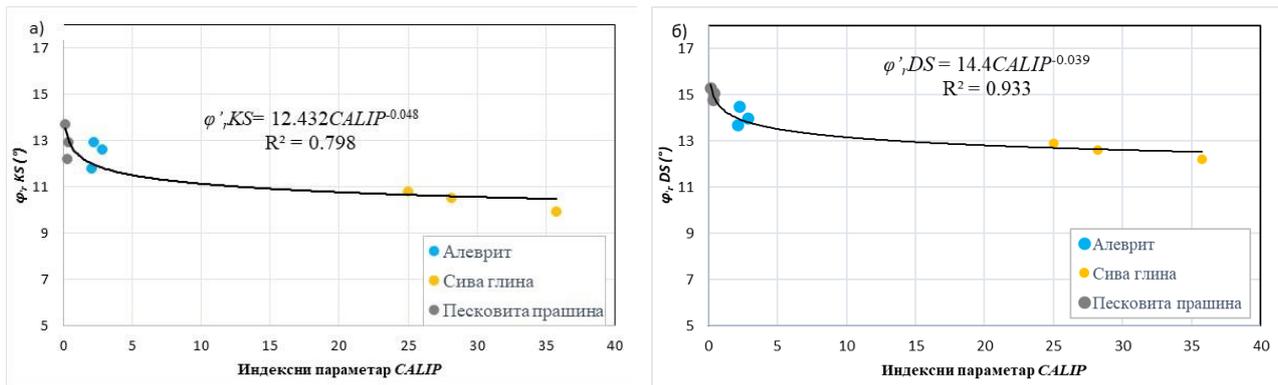
Слика 8.8. приказује корелације између резидуалног угла унутрашњег трења (ϕ'_r), добијених из апарата за кружно и директно смицање, и индекса пластичности (I_p). Може се уочити да вредности ϕ'_r показују опадање са повећањем индекса пластичности. Ове корелације су изражене нелинеарним односом, при чему коефицијенти корелације $I_p - \phi'_{r,KS}$ и $I_p - \phi'_{r,DS}$ износе 0,767 и 0,921, редом. Ове вредности сугеришу јачу, односно врло јаку везу између параметара, што указује на њихову значајну практичну примену.

Јаке негативне корелације између резидуалног угла унутрашњег трења и границе течења (LL), као и индекса пластичности (I_p) указују на то да тла са већом пластичношћу имају нижу резидуалну чврстоћу. Ово је у складу са чињеницом да пластична тла карактерише мање стабилна структура и имају већу склоност на прерасподелу честица у правцу смицања.

8.1.4. Корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и комбинованог параметра CALIP

На слици 8.9. приказана је корелациона анализа добијених вредности резидуалних углова унутрашњег трења из апарата КС (а), апарата за ДС (б) и комбинованог индексног параметра CALIP. Ове корелације су изражене нелинеарним односом, при чему коефицијенти корелације

$CALIP - \varphi'_r,KS$ и $CALIP - \varphi'_r,DS$ износили 0,798, односно 0,933. Ове вредности сугеришу јаку везу између параметара, што указује на њихову практичну важност.



Слика 8.9. Корелационе зависности резидуалних углова унутрашњег трења добијене у КС апарату (а) и ДС апарату (б) у односу на параметар $CALIP$

Ограничења и потенцијални извори грешака:

Важно је напоменути да добијене корелације важе само за специфичне геолошке локације и испитивани материјал. Примена ових корелација на друга тла може дати различите резултате. Поред тога, могући извори грешака укључују:

- Релативно мали, недовољан број узорака за неке типове тла;
- Варијабилности физичко-механичких својстава унутар истог типа тла;
- Утицај фактора који нису укључени у анализу, као што су минералoшки састав глине, облик и збијеност крупнозрних тла, итд.

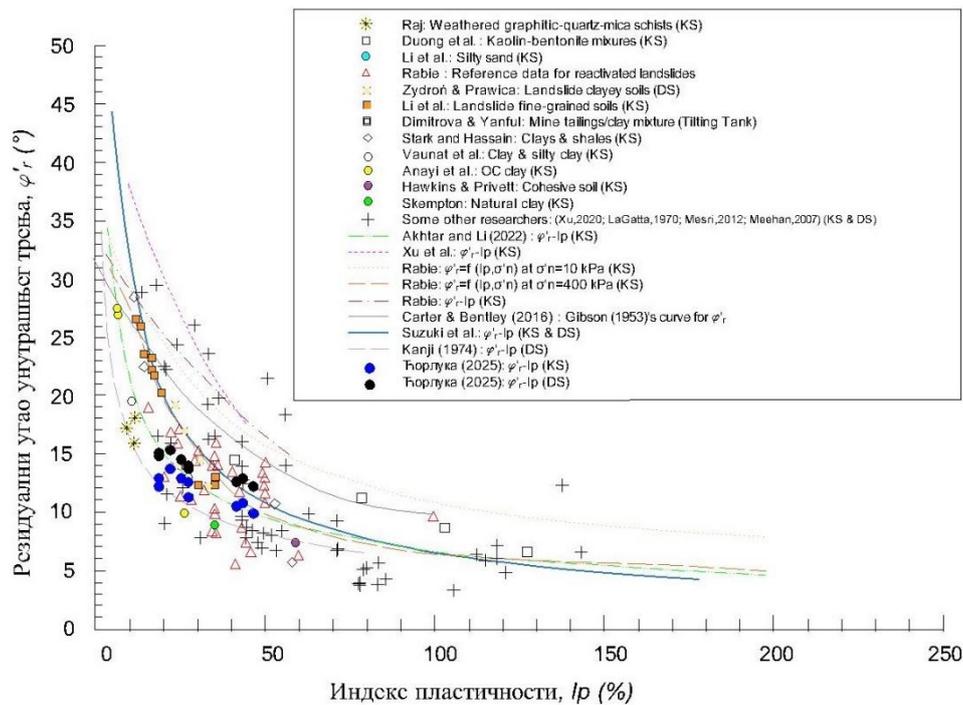
8.2. ВЕРИФИКАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

8.2.1. Верификација корелационих резултата упоредном анализом са референтним подацима из литературе

У овој дисертацији је верификација корелационих зависности између параметара резидуалне чврстоће смицања (резидуални угао унутрашњег трења) и различитих индексних својстава (граница течења, индекс пластичности, садржај глине, прашине и песка) извршена на основу поређења са корелацијама приказаним у релевантној литератури (Поглавље 2.1).

У поглављу 2.1 (Слике 2.9. и 2.10.) наведено је осамнаест литературних података који се односе на корелационе зависности између параметара $\varphi'_r(KS, DS)$ и вредности границе течења као и индекса пластичности за ситнозрне материјале (Shimobe, 2025). Ови подаци потичу са разних подручја широм света, тако да се односе на материјале различитог састава.

На сликама 8.10. и 8.12. дат је упоредни приказ корелационих зависности између параметара φ'_r,KS , φ'_r,DS , LL и I_p из наведене литературе, укључујући и корелације добијене истраживањима за потребе ове дисертације.



Слика 8.10. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ',KS , ϕ',DS и I_p предложених у дисертацији и литературних података (Shimobe, 2025 - прилагођено)

Слика 8.10 илуструје корелацију између резидуалног угла унутрашњег трења (ϕ'_r) и индекса пластичности (I_p). Корелације за ϕ'_r,KS и I_p добијене у овој докторској дисертацији, посебно оне које се приближавају доњој граници, показују велико слагање са неколико објављених студија. Конкретно, подаци се уско поклапају са доњим границама утврђеним од стране Rabie (2016), Akhtar и Li (2022), и општим трендом уоченим код Meehan (2007), Mesri (2012) и Xu (2020). Ова подударана указују на слично понашање тла која су била предмет ове дисертације и истраживања наведених аутора, посебно у контексту испитивања спроведених у апарату за кружно смицање.

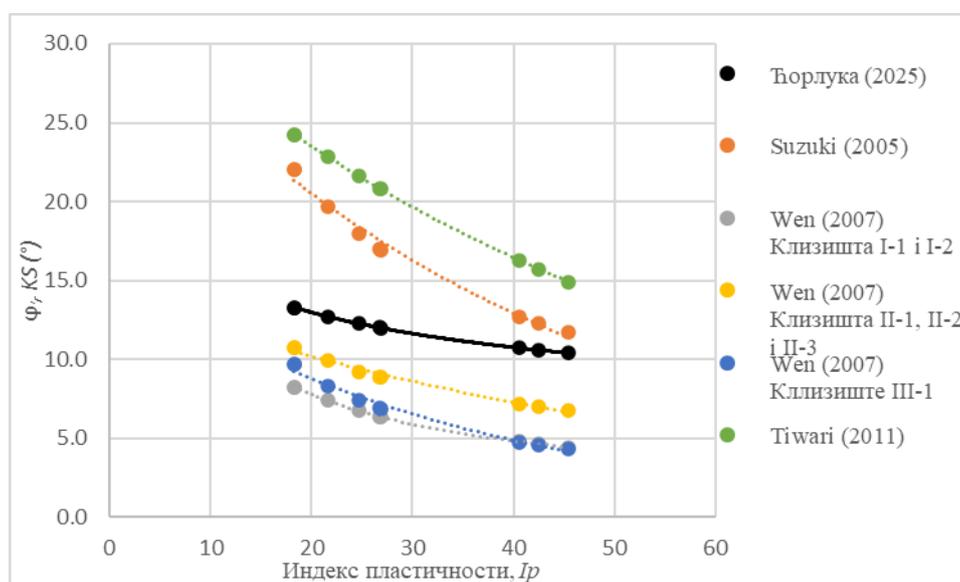
Слично томе, корелације добијене за ϕ'_r,DS и I_p , показују одређени степен усклађености са литературом. Ови резултати квалитативно се поклапају са трендовима које су утврдили La Gatta, 1970; Suzuki, 2005; Meehan, 2007; Mesri, 2012; Xu, 2020. Међутим, важно је напоменути да укупно расипање података код различитих истраживача и типова тла одражава утицај фактора који нису повезани са индексом пластичности у одређивању резидуалне смичуће чврстоће.

Табела 8.1 приказује емпиријске једначине између резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за кружно смицање у засићеним условима (ϕ',KS) и индекса пластичности (I_p) и коефицијенте корелације (R^2) добијене у различитим истраживањима, укључујући модел из ове дисертације.

Табела 8.1. Једначине и коефицијенти детерминације добијени из различитих корелација између параметара $\varphi_r'KS$ - I_p

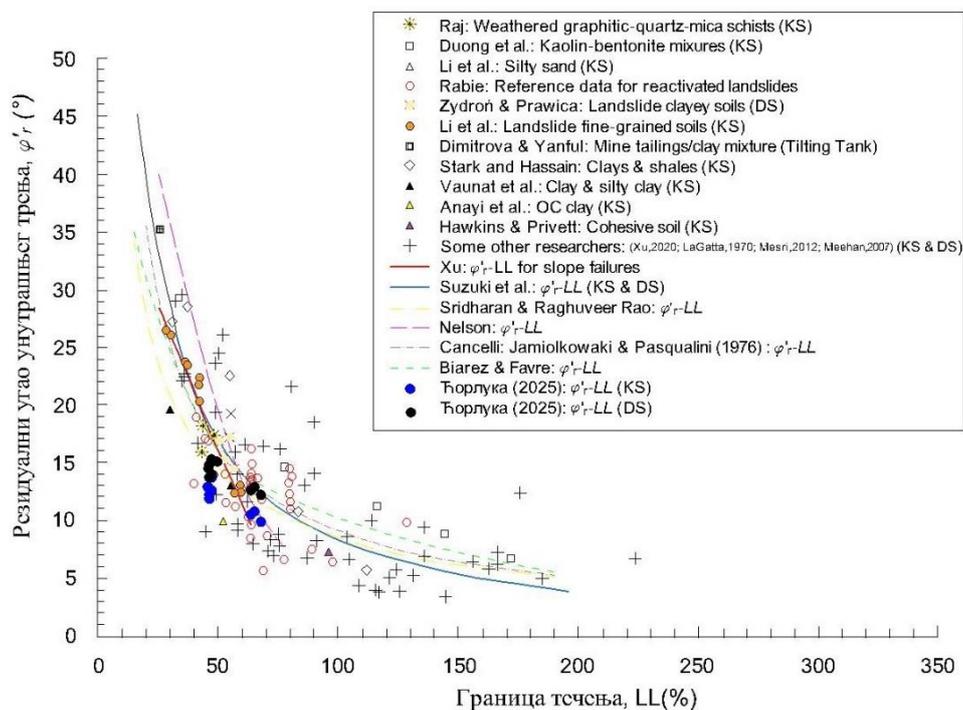
Аутор и година	Једначина	Степен корелације (R^2)
Suzuki (2005)	$\varphi_r'KS = 3,449 \cdot I_p^{-0,737}$	0,855
Wen (2007) Клизишта I-1 и I-2	$\varphi_r'KS = 60,515 \cdot I_p^{-0,6846}$	0,727
Wen (2007) Клизишта II-1, II-2 и II-3	$\varphi_r'KS = 47,363 \cdot I_p^{-0,5093}$	0,792
Wen (2007) Клизиште III-1	$\varphi_r'KS = 127,55 \cdot I_p^{-0,8875}$	0,808
Tiwari (2011)	$\varphi_r'KS = 33,549 \cdot e^{-0,0178(I_p)}$	0,905
Ђорлука (2025)	$\varphi_r'KS = 29,258 \cdot I_p^{-0,271}$	0,767

Слика 8.11 графички приказује корелације између резидуалног угла унутрашњег трења добијеног у апарату за кружно смицање у засићеним условима ($\varphi_r'KS$) и индекса пластичности (I_p) за различите моделе, користећи вредности I_p са ПК Дрмно.



Слика 8.11. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара $\varphi_r'KS$ - I_p предложених у дисертацији и литературних података

Видљива је јасна разлика у добијеним кривама. Крива добијена коришћењем једначина Wen-а (2007) се налази испод кривих добијених коришћењем једначина Tiwari-ја (2011), Suzuki-ја (2005) и модела из ове дисертације. Крива из ове дисертације показује сличан тренд као остали модели, али са блажим нагибом и налази се у средини између кривих модела Wen-а и Suzuki-ја и Tiwari-ја. Ова разлика је последица различитих типова тла, метода одређивања параметара и географских локација.



Слика 8.12. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r KS, ϕ'_r DS и LL предложених у дисертацији и литературних података (Shimobe, 2025 – прилагођено)

Слика 8.12 илуструје корелацију између резидуалног угла унутрашњег трења (ϕ'_r) и границе течења (LL). Корелације за ϕ'_r KS и LL добијене у овој докторској дисертацији, посебно оне у близини доње границе (сива глина), показују одређени степен усклађености са неколико литературних извора. Конкретно, тренд опадања ϕ'_r са повећањем LL квалитативно се поклапа са запажањима до којих су дошли Nelson (1992), Rabie (2016) и Xu (2020). Ова сличност указује на упоредиво понашање тла, у оквиру методологије испитивања апаратом за кружно смицање. Међутим, примећено је значајно расипање података, што указује на утицај других фактора, осим саме границе течења, који могу играти важну улогу у дефинисању механичких својстава тла.

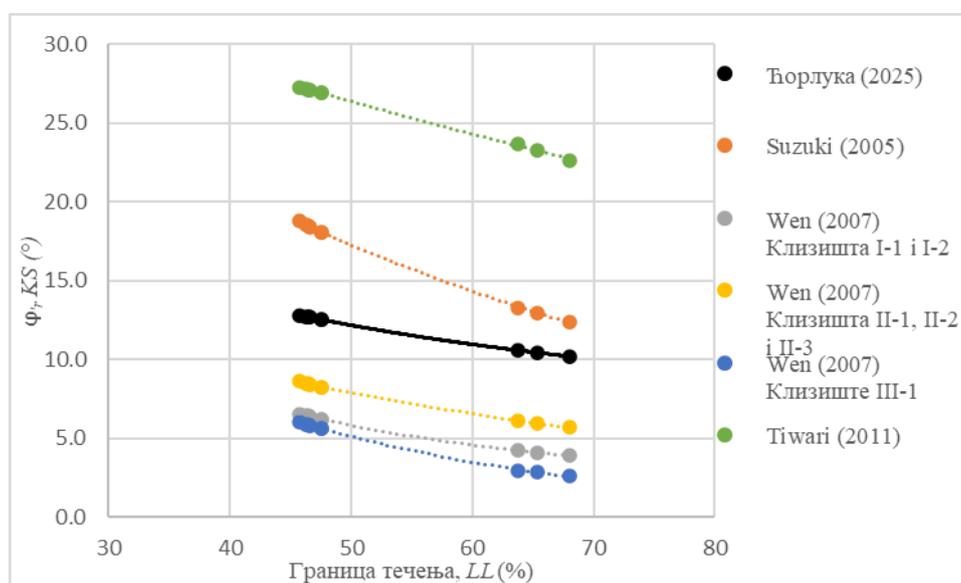
Слично томе, корелације ϕ'_r DS-LL, посебно оне у близини доње границе (сива глина), показују одређени степен усклађености са вредностима из литературе. Ови резултати квалитативно се поклапају са трендовима које су утврдили Cancelli (1977), Sridharan и Raghuvеer Rao (2004), Suzuki (2005), Rabie (2016). Укупна сагласност вредности сугерише да уочене доње границе представљају разумну процену резидуалне смичуће чврстоће под DS условима за специфичне типове тла. Међутим, укупно расипање података наглашава утицај фактора који не зависе само од границе течења као и од саме методологије испитивања резидуалне чврстоће тла.

Табела 8.2 приказује емпиријске једначине између резидуалног угла унутрашњег трења добијеног из апарата за кружно смицање у засићеним условима (ϕ'_r KS) и границе течења (LL) и коефицијенте корелације (R^2) добијене у различитим истраживањима, укључујући модел из ове дисертације.

Табела 8.2. Једначине и коефицијенти детерминације добијени из различитих корелација између параметара ϕ'_rKS - LL

Аутор и година	Једначина	Степен корелације (R^2)
Suzuki (2005)	$\phi'_rKS = 22,26 \cdot LL^{-1,094}$	0,837
Wen (2007) Клизисте I-1 и I-2	$\phi'_rKS = 979,37 \cdot LL^{-1,3096}$	0,546
Wen (2007) Клизисте II-1, II-2 и II-3	$\phi'_rKS = 455,85 \cdot LL^{-1,0384}$	0,842
Wen (2007) Клизисте III-1	$\phi'_rKS = 20140 \cdot LL^{-2,1204}$	0,749
Tiwari (2011)	$\phi'_rKS = -0,002 \cdot (LL)^2 + 0,02(LL) + 30,51$	0,905
Ђорлука (2025)	$\phi'_rKS = 115,92 \cdot LL^{-0,576}$	0,823

Слика 8.13. графички приказује корелације између резидуално угла унутрашњег трења добијеног из апарата за кружно смицање у засићеним условима (ϕ'_rKS) и границе течења (LL) за различите моделе, користећи вредности LL са ПК Дрмно.

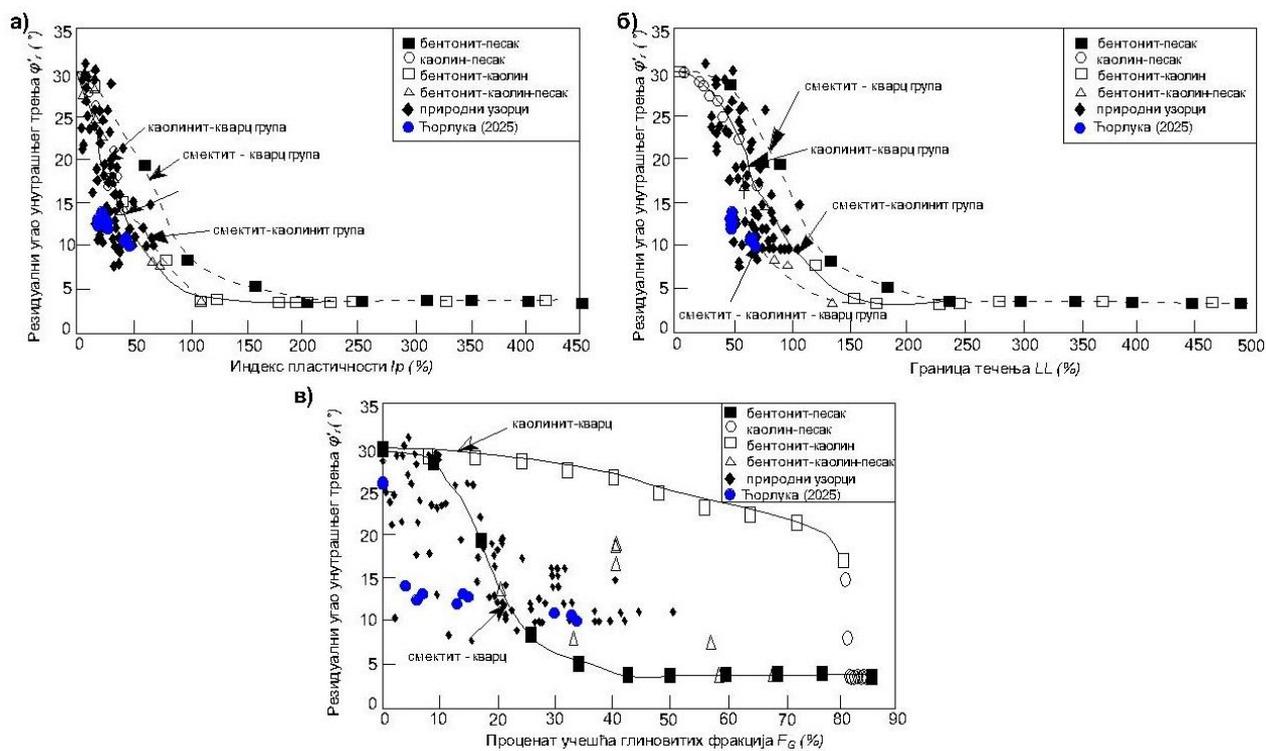


Слика 8.13. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_rKS - LL предложених у дисертацији и литературних података

Анализа дијаграма Слика 8.13. показује значајне разлике у добијеним вредностима ϕ'_rKS у зависности од коришћеног модела. Коришћењем вредности границе течења (LL) из ПК Дрмно, уочено је да једначине Wen-а (2007) генеришу ниже вредности ϕ'_rKS , док једначине Suzuki-ја (2005) дају више вредности у поређењу са моделом из ове дисертације. Модел добијен у овој дисертацији показује вредности ϕ'_rKS које се налазе између оних добијених коришћењем модела Wen-а и Suzuki-ја. Супротно томе, Tiwari-јев (2011) модел генерише знатно више вредности ϕ'_rKS , што указује на значајно прецењивање овог параметра у условима ПК Дрмно.

У поглављу 2.1 (Слика 2.6.) наведени су литературни податаци о корелационим зависностима између параметара ϕ'_rKS и вредности границе течења, индекса пластичности и садржаја глиновитих фракција за ситнозрне материјале (Tiwari, 2005). Ови подаци обухватају различите бентонитске мешавине и природне узорке.

На слици 8.14. дат је упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_rKS , LL , I_p и F_G из наведене литературе, укључујући и корелације добијене истраживањима спроведеним у оквиру ове дисертације.

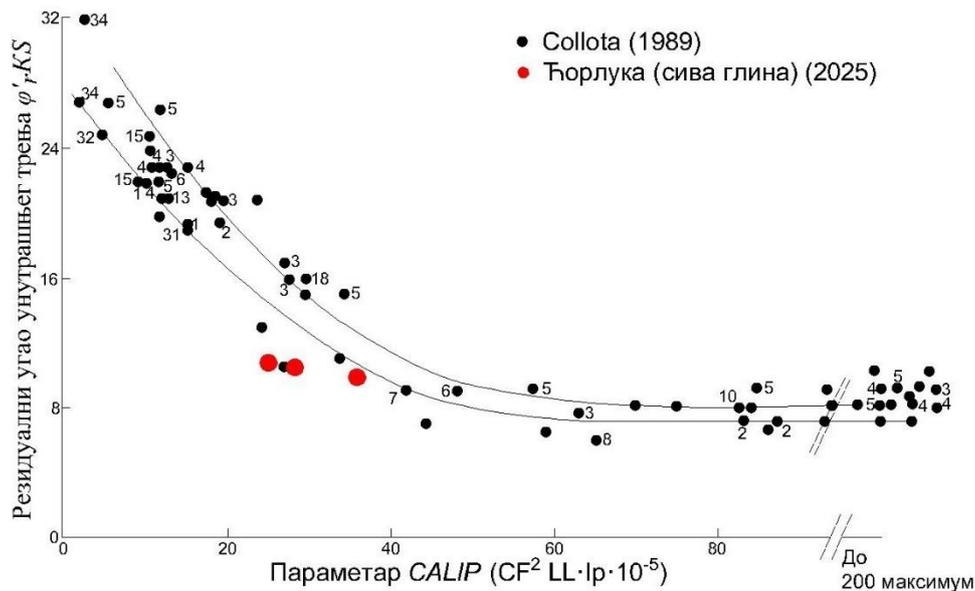


Слика 8.14. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS , LL , I_p и F_G предложених у дисертацији и литературних података (Tiwari, 2005-прилагођено)

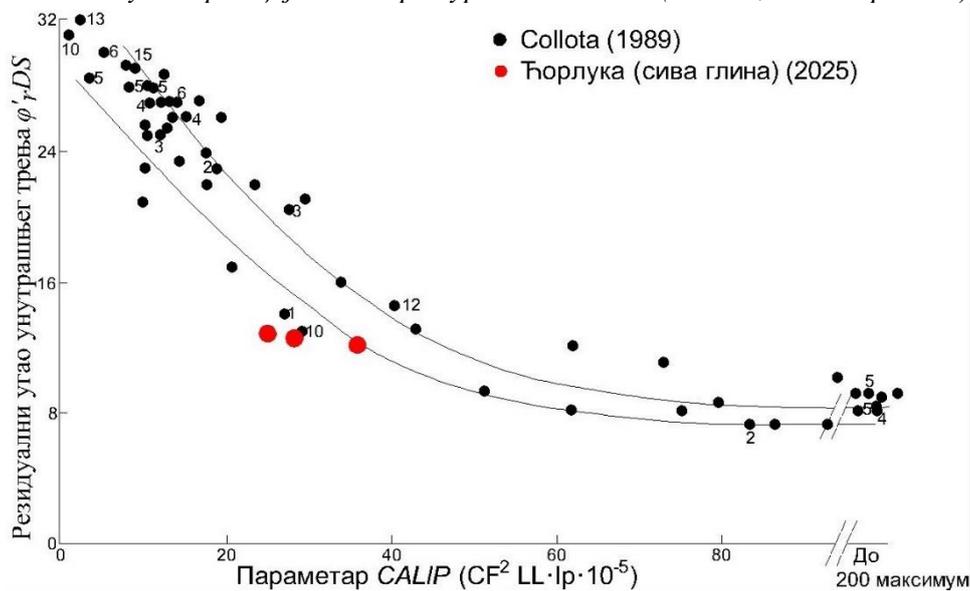
Резултати добијени у овој докторској дисертацији показују одређени степен слагања са резултатима које је објавио Tiwari (2005) за природне узорке. Ово сугерише да се понашање тла анализираних у оквиру ове дисертације поклапа са понашањем сличних типова тла испитиваних у другим истраживањима (Tiwari, 2005). Међутим, потребно је узети у обзир и расипање података, нарочито на дијаграму Слика 8.13в. Ово расипање указује на утицај фактора који нису обухваћени анализиранима корелацијама, као што су услови испитивања, минеролошки састав, структура тла, степен зби и други параметри.

У поглављу 5.4.1. (Слике 5.3. и 5.4.) наведени су литературни подаци које је објавио Collota (1989) и који се односе на корелационе зависности између параметара ϕ'_r (KS , DS) и комбинованог индексног параметра $CALIP$. Ови подаци потичу са 20 локација широм Италије, и анализирано је преко 150 узорака различитог састава.

На сликама 8.15 и 8.16 дат је упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ'_r , KS , ϕ'_r , DS , и комбинованог параметра $CALIP$ из наведене литературе, укључујући и корелације добијене истраживањима спроведеним у оквиру ове дисертације.



Слика 8.15. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ', KS и $CALIP$ предложених у дисертацији и литературних података (Collota, 1989 - прилагођено)



Слика 8.16. Упоредни приказ корелационих зависности између параметара ϕ', DS и $CALIP$ предложених у дисертацији и литературних података (Collota, 1989 - прилагођено)

Резултати приказани од стране Collota (1989) (црне тачке, слике 8.16. и 8.17.) покривају широк распон оба параметра, што указује на варијабилност у испитиваним узорцима тла. Искртане криве представљају различите распоне садржаја фракција унутар узорка које је Collota (1989) анализирао. Црвене тачке представљају резултате специфичних типова тла (сива глина), добијене у оквиру ове дисертације. Ови подаци генерално се налазе испод кривих које приказују тренд узорка анализираних од стране Collota (1989). Ова појава указује на то да типови тла са ПК Дрмно имају тенденцију да имају нижи резидуални угао унутрашњег трења у поређењу са распонем узорка које је анализирао Collota, посебно за исту вредност параметра $CALIP$.

Поређењем података приказаних у студији Collota (1989) и ове дисертације уочава се разлика у карактеристикама анализираних тла са различитим основним геомеханичким и минералošким карактеристикама. Узорци из ПК Дрмно доследно показују ниже углове

резидуалног угла унутрашњег трења у поређењу са већином Collota-иних узорака који су узети са више различитих локација у Италији. Ова разлика потиче од бројних разлика самих материјала а као најважнији фактори могу да се наведу:

- Састав тла: Различит минерални састав, гранулометријски састав и садржај органских материја;
- Геолошка историја: Различити процеси формирања и историје напона, који заједно утичу на формирање различитих структура тла;
- Климатски услови: Разлике у количини падавина, температури и другим факторима животне средине који утичу на својства тла.

9. ВЕРИФИКАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА НА ПРИМЕРУ АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ КАРАКТЕРИСТИЧНИХ ПРОФИЛА НА ПК ДРМНО

На радним и завршним косинама, упркос задовољавајућем фактору сигурности добијеном анализама стабилности на основу вршних параметара чврстоће смицања, забележене су локалне нестабилности. Ове нестабилности манифестовале су се као плитка клизања у кровинским прашинасто-глиненим материјалима, који су изразито осетљиви на промене влажности и спољне утицаје. Вишегодишњи мониторинг површинског копа евидентирао је више од стотину паралелних пукотина затезања на површини, што указује на присуство плитких клизишта. Процес клизања иницира се гравитационим дејством подземне воде, која продире кроз тензионе пукотине - било да је реч о лутајућој и капиларној води или о води која доспева из виших слојева шљунка и крупнозрних пескова. Интензивне падавине додатно повећавају количину подземне воде, што уз дејство гравитације, вибрације машина и притисак горњих слојева, доводи до кретања воде ка нижим котама и формирања нестабилних блокова прашинасто-глиненог материјала.

9.1. ИЗБОР ФИЗИЧКО - МЕХАНИЧКИХ ПАРАМЕТАРА ЗА ПОТРЕБЕ АНАЛИЗЕ СТАБИЛНОСТИ

Анализом података из документације под насловом „Технички рударски пројекат експлоатације и транспорта и одлагања откривке на ПК „Дрмно“ и „Технички рударски пројекат експлоатације и транспорта угља на ПК „Дрмно“, коју је израдио Рударско-геолошки факултет у Београду 2022. године, извршен је избор рачунских вредности параметара физичко механичких својстава квазихомогених зона у лежишту Дрмно (запреминске тежине и параметара чврстоће смицања). Приказане вредности параметара физичко-механичких својстава налазе се у Табели 9.1.

Табела 9.1. Усвојене вредности параметара физичко-механичких својстава за прорачуне стабилности косина површинског копа "Дрмно"

Квазихомогена зона	Запреминска тежина γ (kN/m ³)	Кохезија c' (kPa)	Угао унутрашњег трења ϕ' (°)
Лес	19,2	15,0	24,0
Песак	17,7	4,5	25,4
Шљунак	20,5	1,3	31,5
Алеврит	19,2	25,0	19,0
Сива глина	19,5	24,1	17,5
Песковита прашина	19,3	10,7	21,4

За потребе анализе стабилности, резидуални угао унутрашњег трења (ϕ'), одређен је као аритметичка средина резултата лабораторијских испитивања на узорцима из сваке од анализираних геотехничких средина који су приказани у оквиру ове дисертације. Овај приступ је усвојен како би се обезбедила репрезентативност модела и умањио утицај случајних варијација у резултатима појединачних испитивања.

Усвојене вредности резидуалних параметара физичко-механичких својстава добијених из апарата за кружно и директно смицање дати су у табели 9.2.

Табела 9.2. Усвојене вредности резидуалних параметара физичко-механичких својстава за прорачуне стабилности косина површинског копа "Дрмно"

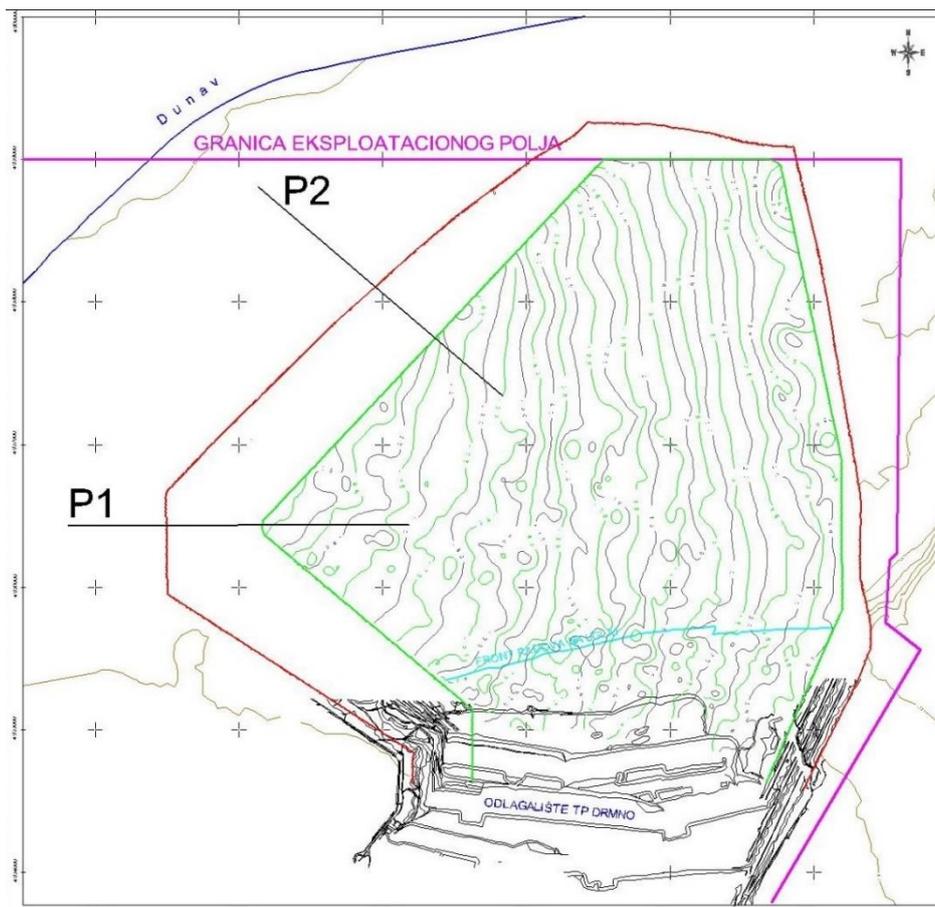
Квазихомогена зона	Запреминска тежина ρ (kN/m ³)	Апарат за кружно смицање		Апарат за директно смицање	
		Кохезија c'_r (кПа)	Угао унутрашњег трења ϕ'_r (°)	Кохезија c'_r (кПа)	Угао унутрашњег трења ϕ'_r (°)
Лес***	19,2	0,0	24,0	0,0	24,0
Песак*	17,7	0,0	25,3	0,0	25,1
Шљунак**	20,5	0,0	30,0	0,0	30,0
Алеврит*	19,2	0,0	12,4	0,0	14,1
Сива глина*	19,5	0,0	10,4	0,0	12,6
Песковита прашина*	19,3	0,0	12,9	0,0	15,1

*Геотехничке средине које су испитиване у дисертацији

**Вредности параметара за слој шљунка нису предмет ове дисертације, па су им вредности угла унутрашњег трења кориговане само за 1°

***Лес је само површински слој, вредности угла унутрашњег трења су кориговане сразмерно осталим материјалима, али није имао утицај на стабилност косине.

Анализа стабилности косина површинског копа "Дрмно" спроведена је на два карактеристична профила (у правцу фронта радова), означена као Р1 и Р2. Положај ових профила јасно је представљен на Слици 9.1. У процесу анализе, узимани су у обзир различити фактори, укључујући геометријске карактеристике профила, механичка својства тла и други.



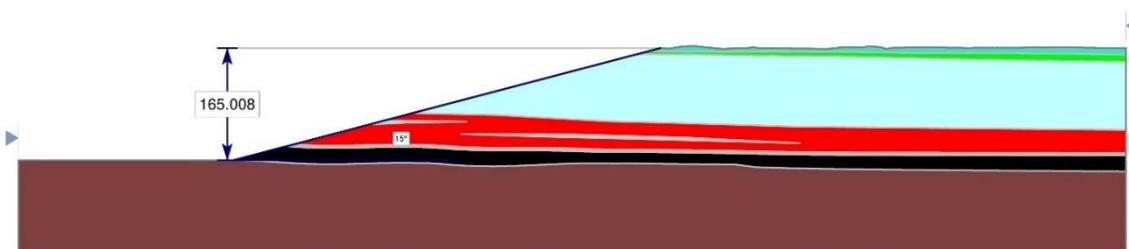
Слика 9.1. Изглед површинског копа Дрмно и положај геотехничких профила 1 и 2 (Извор: Стевановић, Д.: Студија изводљивости експлоатације угља на површинском копу „Дрмно“ – актуелизација, 2023.год.)

Прорачун стабилности завршних косина је извршен за профиле P1 и P2. Због неуједначеног нивоа подземне воде, анализирана је стабилност три различите вредности коефицијента порног притиска и то: $r_u=0; 0,15$ и $0,2$. С обзиром на то да су узорци током испитивања били у потпуности засићени, при прорачуну је усвојена вредност порног притиска $r_u= 0,2$, како би се обезбедила што прецизнија симулација стварних услова у косини. Овакав методолошки приступ омогућио је реалистичнију процену фактора сигурности, узимајући у обзир значајан утицај хидрогеолошких услова на стабилност косина. Добијени резултати указују на осетљивост анализе на избор параметара чврстоће смицања, као и на неопходност адекватног узорковања и припреме узорака како би се осигурала поузданост прорачунских модела.

9.1.1.1. Профил P1

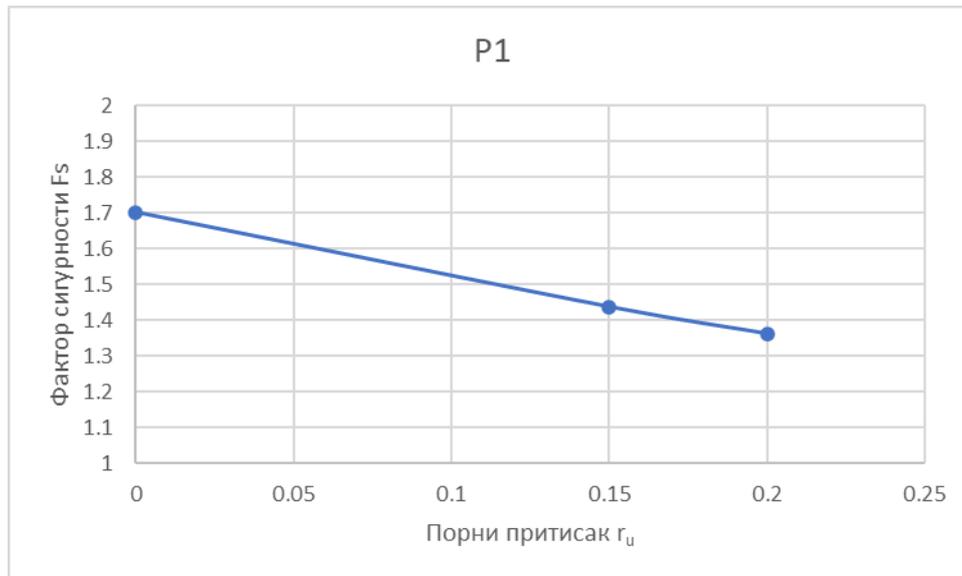
Завршну косину површинског копа Дрмно на профилу P1 изграђују подински прашинасти материјали, угаљ, повлатне сиве глине, алеврит, песак, шљунак и лес. Изглед профила P1 дат је на слици 9.2.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Water Surface	Ru Value
Les		19.2	Mohr-Coulomb	15	24	None	0.2
Alevrit		19.2	Mohr-Coulomb	25	19	None	0.2
Pesak		17.7	Mohr-Coulomb	4.5	25.4	None	0.2
Sijunak		20.5	Mohr-Coulomb	1.3	31.5	None	0.2
Siva Gлина		19.5	Mohr-Coulomb	24.1	17.5	None	0.2
Ugalj		14.9	Mohr-Coulomb	246	24.6	None	0.2
Podina		18.3	Mohr-Coulomb	24.14	17.52	None	0.2



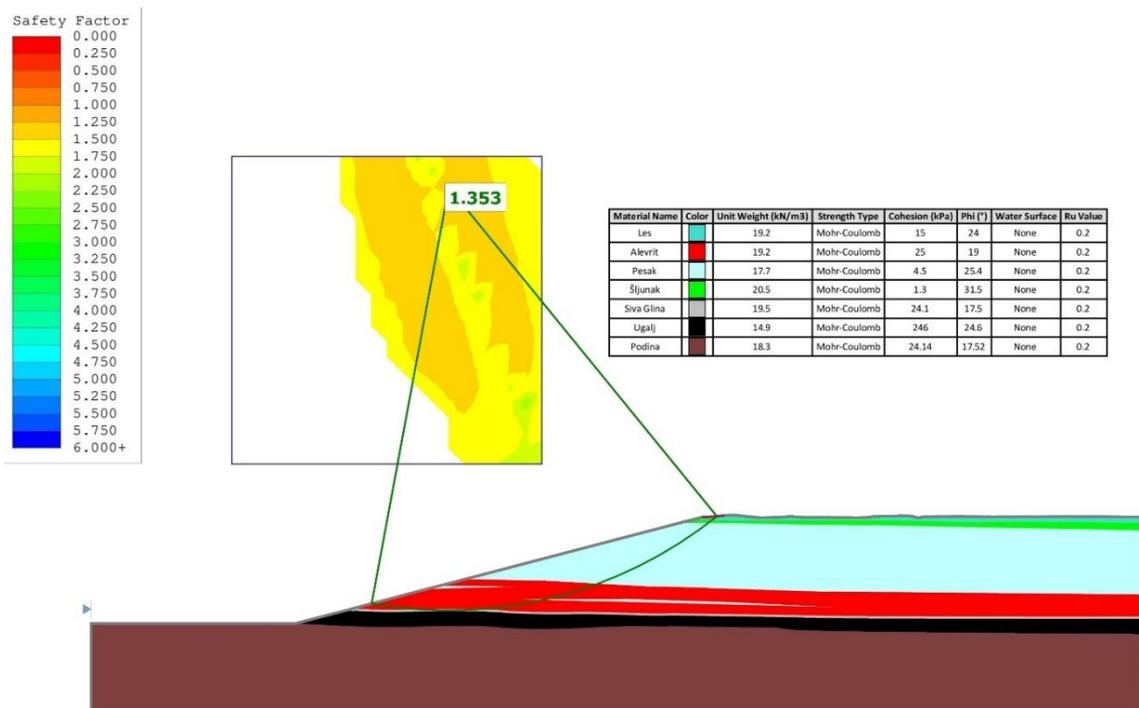
Слика 9.2. Изглед завршне косине на профилу P1

Извршена је анализа стабилности за профил P1 са различитим вредностима порног притиска. На дијаграму (Слика 9.3.) дате су вредности F_s у зависности порних притисака. Опште прихваћена тврдња да повећање порног притиска у тлу доводи до смањења ефективног напона, а тиме и до смањења стабилности косине, потврђена је анализом приказаном на слици 9.3, где су приказане вредности фактора сигурности (F_s) у зависности од различитих вредности нивоа порног притиска (r_u).



Слика 9.3. Дијаграм зависности фактора сигурности F_s од коефицијента порног притиска r_u за профил P1

Анализом стабилности завршне косине на профилу P1 за $r_u=0,2$, добијен је фактор сигурности 1,353. Графички приказ резултата анализе стабилности косине на профилу P1 дат је на слици 9.4.



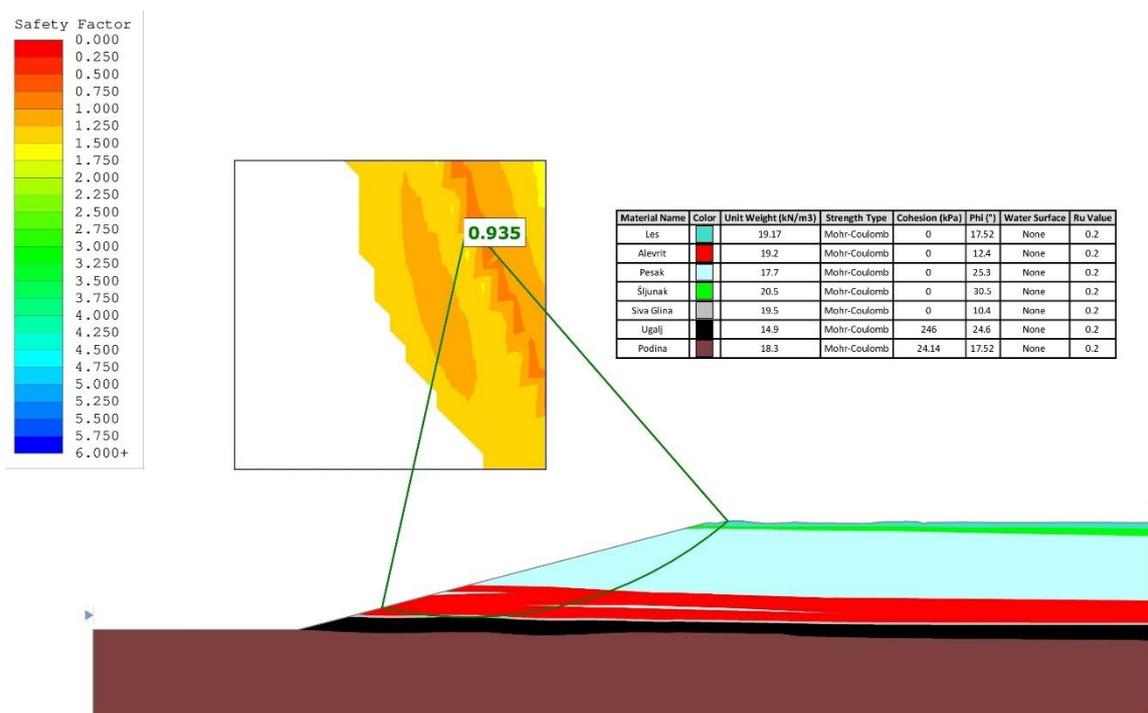
Слика 9.4. Резултати анализе стабилности косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже

У табели 9.3. дат је преглед резултата анализе стабилности завршне косине на профилу P1. У анализи су коришћени резидуални параметри добијени из апарата за кружно и директно смицање (Табела 9.2).

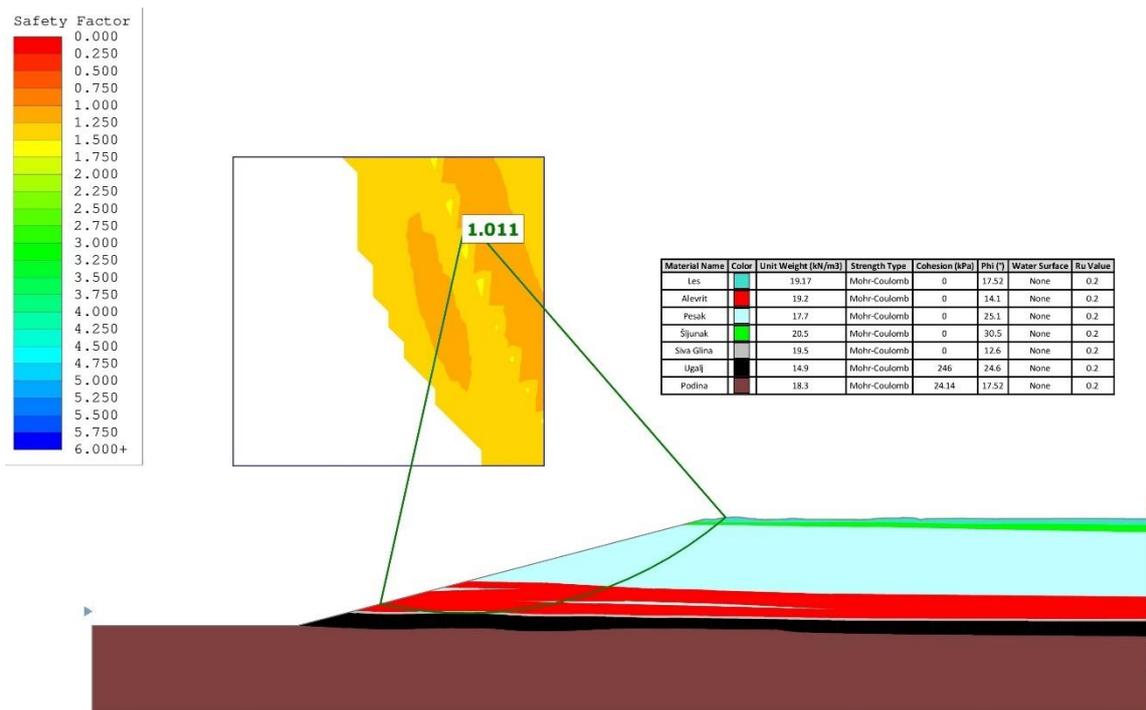
Табела 9.3. Резултати анализе стабилности завршне косине профила P1

Коришћени параметри из апарата	Фактор сигурности Fs
Кружно смицање	<1,00
Директно смицање	1,011

Графички приказ анализе стабилности косине на профилу P1 применом резидуалних параметара добијених из апарата за кружно и директно смицање дати су на сликама 9.5 и 9.6.



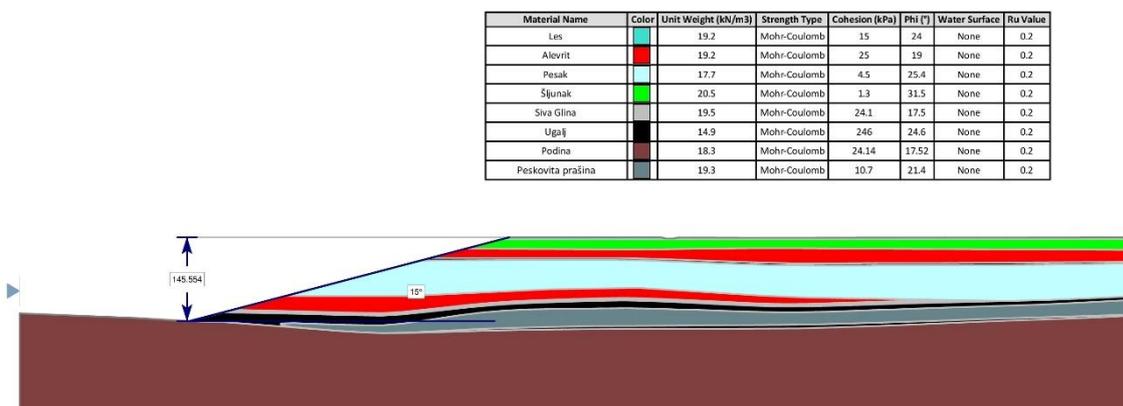
Слика 9.5. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за кружно смицање



Слика 9.6. Резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P1 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за директно смицање

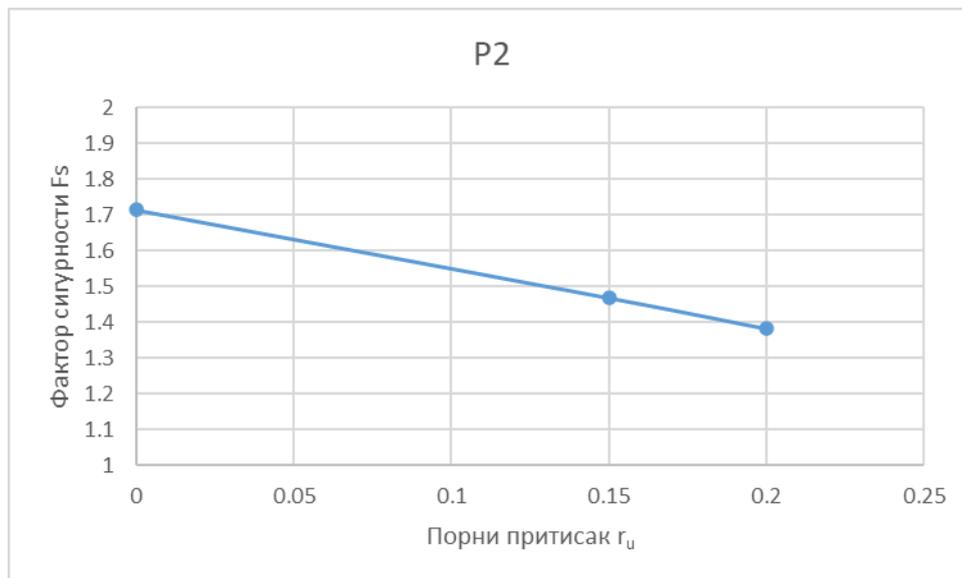
9.1.1.2. Профил P2

Завршну косину површинског копа Дрмно на профилу P2 изграђују подински прашинасти материјали, угаљ, повлатне сиве глине, прослојци прашинасто - песковитих седимената, алеврит, песак, шљунак и лес. Изглед профила P2 дат је на слици 9.7.



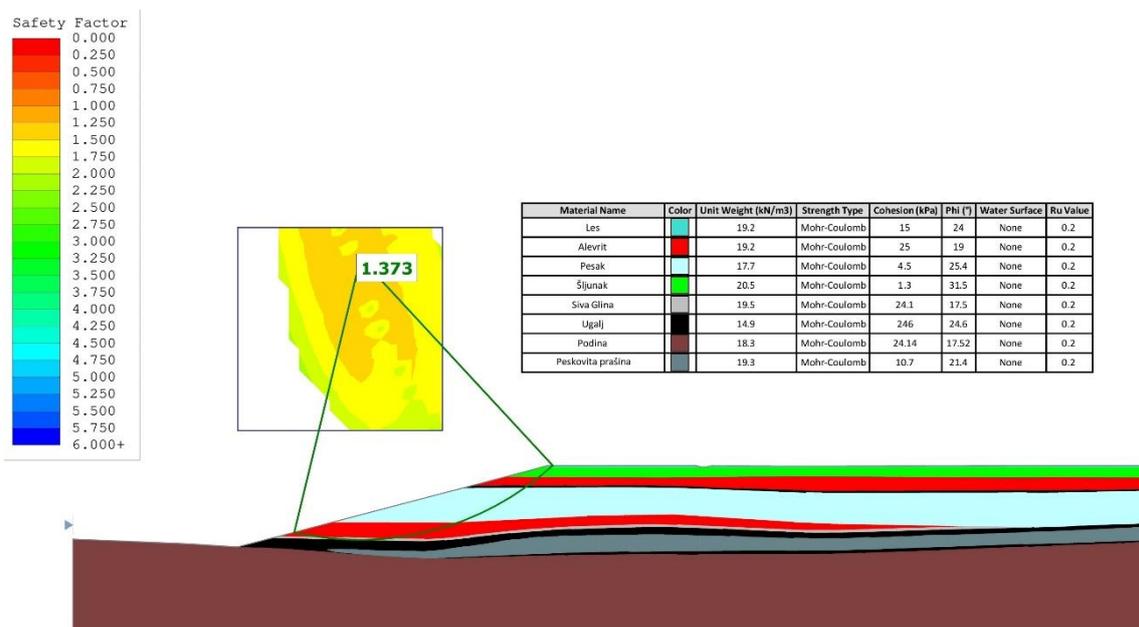
Слика 9.7. Изглед завршне косине на профилу P2

На дијаграму Слика 9.8. дате су вредности F_s у зависности од различитих вредности порних притисака. Повећање порног притиска у тлу смањује ефективни напон и, самим тим, стабилност косине.



Слика 9.8. Дијаграм зависности фактора сигурности F_s од порног притиска r_u за профил P2

Анализом стабилности косине на профилу P2 добијен је фактор сигурности 1,373. Графички приказ резултата анализе стабилности косине на профилу P2, са критичном клизном равни, дат је на слици 9.9.



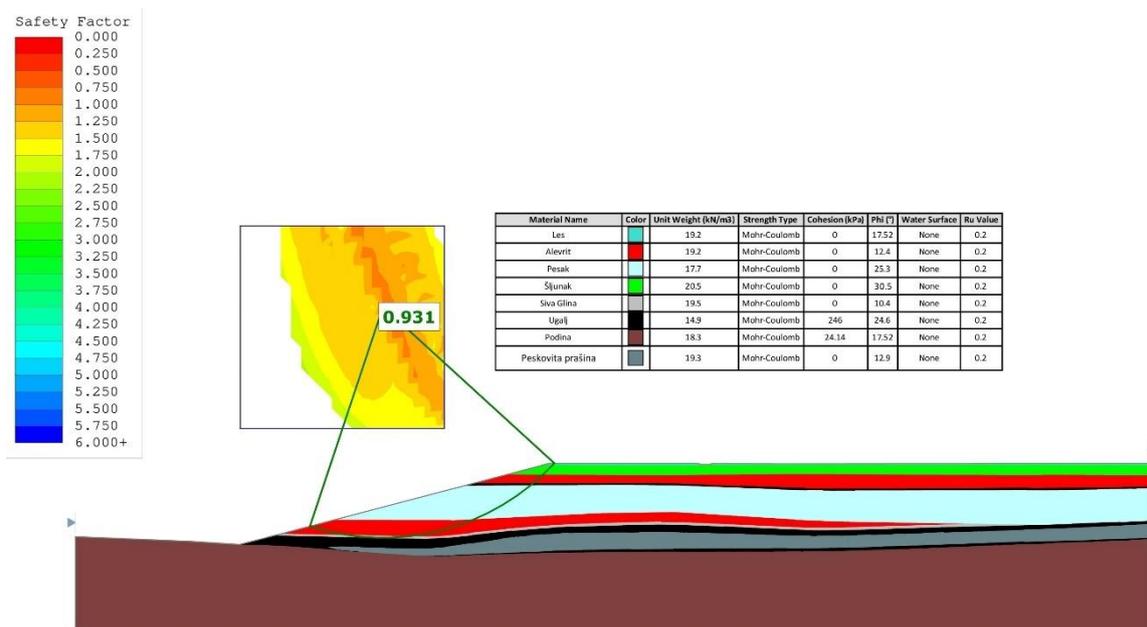
Слика 9.9. Резултати анализе стабилности косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже

У табели 9.4. приказани су резултати анализе стабилности завршне косине на профилу P2, засновани на резидуалним параметрима добијеним из испитивања директног и кружног смицања (Табела 9.2).

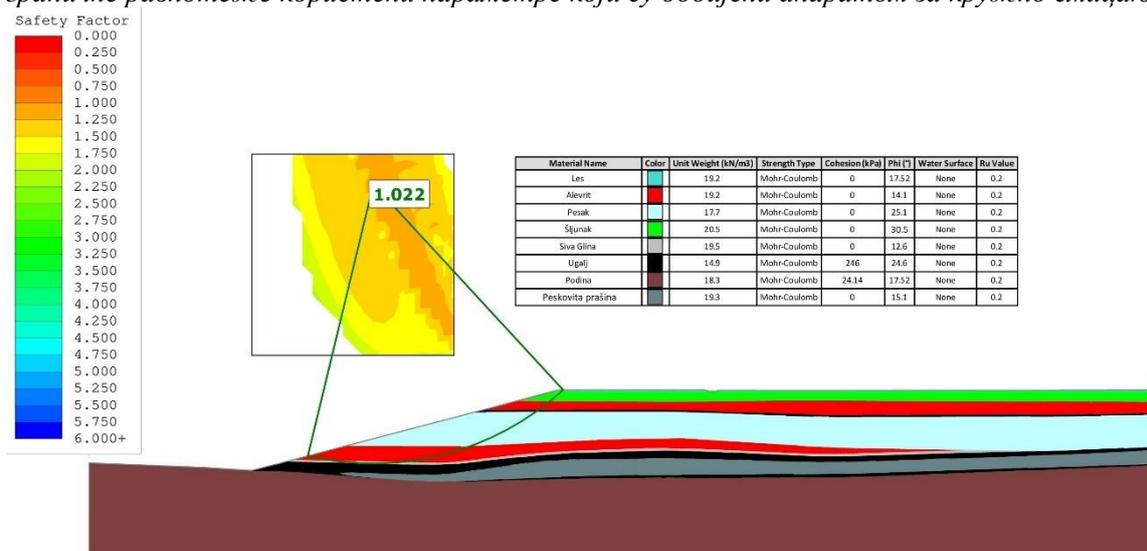
Табела 9.4. Резултати анализе стабилности завршне косине профила P2

Коришћени параметри из апарата	Фактор сигурности F_s
Кружно смицање	<1,00
Директно смицање	1,022

Приказ анализе стабилности косине на профилу P2 користећи параметре добијене из апарата за кружно и директно смицање дати су на сликама 9.10 и 9.11.



Слика 9.10. Резултати анализе стабилности завршине косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре који су добијени апаратом за кружно смицање



Слика 9.11. Резултати анализе стабилности завршине косине на профилу P2 Bishop-овом методом граничне равнотеже користећи параметре добијене из апарата за директно смицање

Анализа стабилности косина на два карактеристична профила на површинско копу Дрмно показала је добру сагласност између резултата добијених испитивањем директног и кружног смицања (Табела 9.5.).

Табела 9.5. Резултати анализе стабилности завршине косине профила P1 и P2

Коришћени параметри из апарата	Фактор сигурности Fs	
	Профил P1	Профил P2
Кружно смицање	<1,00	<1,00
Директно смицање	1,011	1,022

Анализа стабилности косина у оквиру ове дисертације, заснована на оба профила, открива значајне разлике у факторима сигурности у зависности од коришћених параметара чврстоће смицања, односно, апаратуре која је коришћена за њихово одређивање. Коришћење параметара добијених кружним смицањем у оба случаја резултовало је нижим факторима сигурности од $F_s = 1,0$, што потврђује конзервативнији приступ процени стабилности, у складу са закључцима Stark-а (1992) и Tiwari-ја (2005). Ова конзервативнија процена, са факторима сигурности испод $F_s = 1,0$, подудара се са Старковим анализама стабилности косина у јужној Калифорнији, где је коришћење параметара кружног смицања на северној и главној попречној секцији довело до нижих фактора сигурности у односу на повратну анализу и директно смицање. Слично томе, Tiwari (2005) је на шест локација у префектури Нигата у Јапану установио да су вредности углова трења добијене кружним смицањем, уз претпоставку да је кохезија једнака нули, ниже од оних добијених повратном анализом, што је такође довело до фактора сигурности мањег од $F_s = 1,0$. Због тога, параметри добијени испитивањем кружног смицања, који су резултовали нижим факторима сигурности, оправдавају своју примену у анализама стабилности косина, јер ова метода верније симулира расподелу напона дуж клизне равни, посебно у случајевима кружно - цилиндричних равни клизања или пластичних деформација у дубљим слојевима тла.

10. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

10.1. ЗАКЉУЧАК

Стабилност косина на површинским коповима је од суштинског значаја за безбедну експлоатацију, а прецизно дефинисање параметара чврстоће на смицање представља један од кључних предуслова за успешно решавање проблема стабилности. Дисертација се бави анализом резидуалне чврстоће смицања непродуктивних средина на површинском копу Дрмно. Истраживање се фокусира на резидуалне параметре чврстоће смицања различитих геолошких средина, искључујући динамичке ефекте, користећи опите директног и кружног смицања. Посебан акценат је стављен на упоређивању резултата добијених овим два методама, с обзиром да опит кружним смицањем омогућава неограничена померања и сматра се поузданијим у одређивању резидуалних параметара, док се у геотехничкој пракси чешће користи реверсни опит директног смицања. Разумевање резидуалне чврстоће на смицање при великим померањима представља кључни елемент за објашњавање механизма клизања а одређивање резидуалних параметара чврстоће смицања је кључно за избор и пројектовање санационих мера за стабилизацију нестабилних терена (клизишта).

На основу спроведених лабораторијских и експерименталних испитивања, као и нумеричких анализа, можемо извести следеће закључке:

- Истраживање је показало да се упоредивост резултата може постићи коришћењем Bromhead-овог апарата за кружно смицање и конвенционалне методе реверсног смицања у апарату за директно смицање. Ово потврђује поузданост оба приступа у одређивању резидуалне чврстоће, под условом да се испитивања спроводе са пажњом и прецизношћу.
- У дисертацији је детаљно истражена резидуална чврстоћа смицања различитих геолошких средина на површинском копу Дрмно. Коришћењем апарата за директно и кружно смицање, извршена су експериментална испитивања на узорцима различитих типова тла (песак, алеврит, сива глина, песковита прашина) како би се одредила резидуална чврстоћа смицања. Укупно је испитано 12 узорака, а за сваки узорак, испитивања су извршена применом четири различита нивоа нормалног напона (50, 100, 200 и 400 kPa), уз константну брзину смицања од 0,02 mm/min, у складу са стандардном праксом.
- Криве напон-хоризонтално померање су показале значајне разлике у понашању различитих типова тла током резидуалног смицања. Код песковитих узорака, резидуална чврстоћа је достигнута након релативно малих померања, док су глиновита тла захтевала значајно већа померања пре достизања резидуалног стања. Ова разлика је углавном последица поновног померања и поновног уређивања честица тла током реверсних смичућих оптерећења у директном смицању. Брзина достизања резидуалног стања у кохерентним материјалима у апарату за кружно смицање била је значајно бржа, што ову методу чини ефикаснијом. Супротно томе, за некохезивне узорке и узорке са више процентуалног учешћа песковитих фракција, брже је достизано резидуално стање у апарату за директно смицање.
- Поређење резултата добијених из ова два апарата за узорке сиве глине резидуални углови унутрашњег трења добијени из апарата за кружно смицање су се кретали у распону $\varphi', KS = 9,9^\circ - 10,8^\circ$, док је директним смицањем добијени резултати у распону од $\varphi', DS = 12,2^\circ$ до $12,9^\circ$. Код алеврита, кружним смицањем добијени су

резидуални углови од $\varphi',KS = 11,8^\circ$ до $12,9^\circ$, за разлику од $\varphi',DS = 13,7^\circ$ до $14,5^\circ$ добијених директним смицањем. На узорцима песка, разлика је била мања, са распоном од $\varphi',KS = 25,1^\circ$ до $25,5^\circ$ (кружно) и $\varphi',DS = 24,8^\circ$ до $25,4^\circ$ (директно). За песковиту прашину, резидуални углови су се кретали од $\varphi',KS = 12,2^\circ - 13,7^\circ$ (кружно) наспрам $\varphi',DS = 14,8^\circ - 15,3^\circ$ (директно). Код свих испитаних узорака, кохезија је била занемарљива и стога је усвојена вредност од 0 kPa.

- Резултати су показали значајне разлике у вредностима резидуалних параметара чврстоће смицања (угао унутрашњег трења) добијених два метода. Код сиве глине, резидуални угао унутрашњег трења одређен апаратом за кружно смицање био је у просеку $1,7 - 2,3^\circ$ нижи него код директног смицања. Слично, код алеврита су разлике биле мање изражене ($1,2 - 1,9^\circ$). За песковите прашине разлика је била од $1,6 - 2,6^\circ$ између резултата добијених ова два апарата. Опит кружним смицањем, који омогућава већа померања, дао је нижу резидуалну чврстоћу у поређењу са опитом директног смицања. Ова разлика је посебно изражена код глиновитих тла, што истиче важност употребе апарата за кружно смицање при дефинисању резидуалних параметара.
- Испитивања апаратом за директно смицање су обухватила и непоремећене узорке, показујући разлике у понашању у односу на прерађене (поремећене) узорке. За сиву глину и алеврит, упоређене су вредности резидуалних параметара добијене на поремећеним (прерађеним) и непоремећеним узорцима. Резултати су показали да поремећај структуре тла доводи до смањења резидуалне чврстоће, што је у складу са очекивањима. Због саме конструкције апарата за кружно смицање (прстенастог облика, величине пречника и висине кутије за смицање), није било могуће правилно уградити непоремећен узорак, те су испитивања изведена само на прерађеним узорцима.
- Спроведена је опсежна корелациона анализа са циљем успостављања зависности између параметара резидуалне чврстоће смицања (добијених из апарата за директно и кружно смицање) и физичких карактеристика тла (гранулометријски састав, Атербергове границе, пластичне карактеристике). Анализа корелационих зависности између резидуалног угла унутрашњег трења (φ',KS) и различитих фракција тла (глиновите, прашинасте и песковите) показала је различит степен корелације у зависности од типа фракције. Корелација са процентуалним учешћем глиновитих фракција (F_G) је показала јаку негативну корелацију ($R^2 = 0,755-0,898$), што потврђује очекивано смањење резидуалне чврстоће са порастом садржаја глине. Корелација са процентуалним учешћем прашинасте фракције (FS) је била умерена, са R^2 вредностима око $0,602-0,730$, указујући на тенденцију пораста резидуалног угла са повећањем садржаја прашине. Корелација са процентуалним учешћем песковитих фракција (FP) је показала најјачу позитивну корелацију ($R^2 > 0,9$), што је у складу са очекивањем да повећање садржаја песка доводи до повећања резидуалне чврстоће.
- Поређење резултата корелационих анализа између резидуалног угла унутрашњег трења и индекса пластичности (I_p), као и границе течења, показала је јаке корелационе односе ($R^2 > 0,76$). Ово указује да повећање пластичности тла доводи до смањења резидуалне чврстоће, што је у складу са очекивањима. Анализа је обухватила и комбиновани индексни параметар *CALIP*, који је иако показујући јаку корелациону везу са резидуалним углом унутрашњег трења у овој дисертацији, са резултатима Collota (1989) указује на ограничену применљивост овог модела на материјале са ПК Дрмно.

- Међутим, неопходно је истаћи ограничења ових анализа. Добијене корелације су специфичне за испитивани материјал и локацију. Примена ових корелација на друга тла може дати различите резултате, с обзиром на варијабилност физичко-механичких својстава тла у зависности од различитих фактора (минеролошки састав, облик крупнозрних фракција, историја напона и др.). Због тога, екстраполација ових резултата на друга подручја треба да се изводи са опрезом и уз додатну верификацију.
- Анализа стабилности косина (профили P1 и P2) спроведена је коришћењем Бишопове методе граничне равнотеже. Резултати су показали да се коришћењем параметара добијених из апарата за кружно смицање добијају конзервативније (ниже) вредности фактора сигурности, док параметри добијени из апарата за директно смицање дају благо виши фактор сигурности. Ово је значајно јер показује да избор методе испитивања (кружно наспрам директног смицања) утиче на процену стабилности косина. Коришћење конзервативнијих, односно, нижих вредности фактора сигурности, добијених кружним смицањем, доприноси безбеднијем пројектовању, смањујући ризик од нестабилности и потенцијалних катастрофа.
- Кроз анализу параметара резидуалне чврстоће тла непродуктивних средина на површинским коповима, може се значајно допринети оптимизацији угла нагиба радних и завршних косина површинских копова. Узимајући у обзир геомеханичке карактеристике седимента, рудници могу ефикасније управљати стабилношћу косина и смањити ризик од клизишта. Иако повећање угла радних косина, уз правилну примену параметара чврстоће тла, може довести до уштеда трошкова, анализа стабилности косина у овој дисертацији, користећи параметре добијене из апарата за кружно и директно смицање, наглашавају да су вредности резидуалног угла унутрашњег трења добијене кружним смицањем конзервативније и пружају већу сигурност. Зато, при пројектовању завршних косина, треба користити ове ниже вредности, што имплицира блажи угао нагиба како би се повећала стабилност и смањено ризик од потенцијалних нестабилности. Одређивање параметара резидуалне чврстоће (резидуалног угла унутрашњег трења), од суштинске важности за правилно планирање и пројектовање евентуалних мера санације.

На основу изнетих закључака потврђене су постављене хипотезе:

- **„Напонско-деформацијско понашање материјала зависи од збијености, облика и величине доминантних честица, односно од врсте материјала (ситнозрно или крупнозрно тло)“** Испитивања спроведена у оквиру ове дисертације потврђују ову хипотезу, указујући на разлике у понашању различитих типова тла (песак, алеврит, глина, песковита прашина). Ове разлике произилазе из варијација у гранулометријским и пластичним карактеристикама, што је резултирало различитим механизмима клизања;
- **„Резидуална чврстоћа представља минималну чврстоћу смицања којом се дефинише стање када нема промене запремине при даљим померањима, на према томе ни промене ефективних напона“** Ова хипотеза је потврђена експерименталним резултатима, који показују да се минимална чврстоћа смицања постиже након значајних померања, што је евидентно из добијених графикана.
- **„Резидуална чврстоћа тла може се дефинисати на непоремећеним и на поремећеним узорцима тла, али и на засићеним узорцима у консолидованим дренараним условима“** Резултати испитивања, спроведених на прерађеним и

непоремећеним узорцима тла у засићеним условима под различитим вертикалним оптерећењима, показали су значајне разлике, при чему је утврђено да поремећај структуре тла доводи до смањења резидуалне чврстоће. Резидуална чврстоћа тла може се дефинисати за непоремећене и поремећене узорке, као и за засићене узорке под консолидованим дренажним условима;

- **„Чврстоћа смицања директно зависи од водно-физичких карактеристика (пластичности) испитиваних материјала, тако да стање конзистенције значајно утиче и на вредности резидуалних параметара чврстоће смицања”** Резултати испитивања потврђују ову хипотезу, јер је утврђена значајна корелација између пластичних карактеристика тла и његове резидуалне чврстоће, што указује на то да повећање пластичности доводи до смањења резидуалне чврстоће смицања;
- **„За дефинисање резидуалних параметара чврстоће тла могу се користити различити лабораторијски опити (опит кружним смицањем, реверсни опит у апарату за директно смицање), као и корелационе зависности на основу бројних литературних података. Постоје и бројне корелационе зависности представљене у облику дијаграма који повезују, у првом реду, пластичне карактеристике и резидуални угао унутрашњег трења”** Дисертација приказује резултате добијене из опита кружним и директним смицањем, потврђујући да се оба могу користити за одређивање резидуалног угла унутрашњег трења. Анализиране су бројне корелационе зависности између резидуалног угла унутрашњег трења и различитих параметара тла (индекс пластичности, граница течења, садржај фракција глине, прашине и песка). Ове зависности, потврђују да се резидуални угао може проценити коришћењем ових параметара. Поређење са моделима из литературе омогућило је утврђивање предности и недостатака модела из ове дисертације у односу на постојеће моделе. Резултати овог поређења су потврдили валидност модела под одређеним условима;
- **„Резидуални параметри чврстоће смицања добијени реверсним опитом директног смицања се разликују од параметара добијених извођењем опита кружним смицањем”** Резултати показују квантитативне разлике између вредности добијених овим два метода, што потврђује хипотезу о томе да методе генеришу различите резултате у анализи резидуалне чврстоће;
- **„Лабораторијски опит кружног смицања даје најприближнију вредност теренској резидуалној чврстоћи”** На основу резултата анализе стабилности косина и поређења са литературом, хипотеза да лабораторијски опит кружним смицањем даје најприближнију вредност теренској резидуалној чврстоћи може се сматрати делимично потврђеном. Поређење са постојећим истраживањима указује на одређену подударност резултата, посебно у одређеним условима и типовима тла. Међутим, недостатак документованих примера клизишта на косинама копа и резултата повратне анализе онемогућава потпуну верификацију хипотезе, те се она може сматрати само делимично потврђеном.

10.2. ПРЕДЛОГ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Будућа истраживања треба да се фокусирају на:

- **Повећање базе података:** Испитивање већег броја узорака из различитих локација и геолошких средина ће побољшати генерализацију добијених корелација чиме ће се осигурати већа поузданост резултата и њихова применљивост у различитим условима. Ово ће омогућити детаљније разумевање утицаја физичких, механичких и хемијских карактеристика тла на резидуалну чврстоћу, што је кључно за тачнију оцену стабилности;
- **Комбинација лабораторијских и теренских испитивања:** Будућа истраживања требало би да комбинују резултате лабораторијских испитивања са теренским испитивањима како би се потврдила тачност и применљивост добијених параметара. Ова интеграција ће омогућити објективнију процену физичко-механичких карактеристика тла, чиме ће се допринети развоју прецизнијих модела за анализу стабилности косина;
- **Укључивање додатних фактора:** Треба узети у обзир и друге факторе који могу утицати на резидуалну чврстоћу смицања, као што су температура, минералоски састав ситнозрних тла, збијеност крупнозрних тла, брзина смицања и временски услови. Ови фактори могу значајно променити механичка својства тла и, као последица, утицати на тачност добијених резултата. Укључивање ових варијабли у будућа истраживања ће допринети прецизнијем разумевању резидуалне чврстоће и њених промена под различитим условима;
- **Развијање сложенијих модела:** Уместо линеарних модела, могу се користити сложенији модели, као што су мултиваријантни, како би се боље описале комплексне зависности између параметара. Овај приступ омогућава прецизније моделирање интеракција различитих варијабли, чиме се побољшава разумевање фактора који утичу на резидуалну чврстоћу смицања;
- **3D анализа:** Дводимензионална анализа стабилности косина (2D) може дати конзервативне резултате, док тродимензионална анализа (3D) може пружити прецизније и реалније резултате, посебно у случају сложених геолошких услова.

11. ЛИТЕРАТУРА

1. Akhtar, S., Li, B. (2022): A Structural State Model Interpreting the Residual Strength Transition Behavior of Clay Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. 41, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02436-2>
2. 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*, 7–10 June, Amsterdam, Austria, 1053–1057.
3. 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: 327 – 334, <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.11.004>
4. Anaii, J.T., Boyce, J.R., Rodgers, C.D. (1988): Comparison of alternative methods of measuring the residual strength of a clay. In *Transportation Research Record; Transportation Research Board (TRB): Washington, DC, USA, Volume 1192*, pp. 16–26.
5. ASTM Standard D7608-10 (2010): Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Fully Softened Shear Strength and Nonlinear Strength Envelope of Cohesive Soils (Using Normally Consolidated Specimen) for Slopes with no Preexisting Shear Surfaces. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
6. ASTM Standard D6467-13 (2013): Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils. *Annual Book of Standards; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, Volume 4*.
7. Binnie, M. A., Clark, J. F. F., Skempton, A. W. (1967): The effect of discontinuities in clay bedrock on the design of dams in the Mangla project. *Trans. 9th Int. Congr. Large Dams, Istanbul 1*, 165-183.
8. Binger, W. V., Thompson, T. F. (1949): Excavation slopes. *Transactions A.S.C.E., Vol. 114*, 734-754.
9. Bishop, A.W. (1955): The use of slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique, Vol.5, No.1*.
10. Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A., Brown, J.D. (1971): A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Geotechnique* 21, 273–328.
11. Blondeau, F., Josseume, H. (1976): Mesure de la resistance au cisaillement residuelle en laboratoire. *Stabilite de talus 1, versant naturels, numero special Bull. Liaison des Lab. Ponts et Chaussees* 11, 90-106.
12. Borowicka, H. (1965): The influence of the colloidal content. on the shear strength of clay. *Proc. 6th Int. Conf Soil Mech. Montreal, 1965, 1*, 175-178.
13. Bromhead, E.N. (1979): A simple ring shear apparatus. *Ground Eng.* 12, 40–44.
14. Bromhead, E.N., Curtis, R.D. (1983): A Comparison of Alternative Methods of Measuring the Residual Strength of London Clay. *Ground Eng.* 16, 39–41.
15. Bromhead, E. N. (1986): *The Stability of Slopes*, Surrey University Press, London
16. Bromhead, E.N. (1992): *The Stability of Slopes; Blackie Academic & Professional: Glasgow, UK*.
17. Bucher, F. (1975): Die Restscherfestigkeit naturhcher Bodden, ihre Einfussgrossen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen. Report 103. Zurich: Institut fur Grundbau und Boden mechanik Eidgenossische Technische Hochschule.
18. Cancelli A. (1977): Residual shear strength and stability analysis of a landslide in fissured overconsolidated clays. *Bull Int Assoc Eng Geol.* 16, 193-197.

19. Casagli, N., Dapporto, S., Ibsen, M.L., Tofani, V., Vannocci, P. (2006): Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th–21st November 2000, in Northern Tuscany. *Landslides* 3, 13–21.
20. Casagrande, A., Albert, S.G. (1932): Research on the Shearing Resistance of Soils, MIT Report, MIT: Cambridge, MA, USA.
21. Casagrande, A. (1948) Classification and Identification of Soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, 901-930.
22. Chandler, R. J. (1969): The effect of weathering on the shear strength properties of Keuper Marl. *Géotechnique*, 19(3), 321–334.
23. Coulomb, C.A. (1776): Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mém. acad. roy. prés. divers savants*, Vol. 7, Paris.
24. Culmann, C. (1866): *Die Graphische Statik*, Zurich
25. Chen, X.P.; Liu, D. (2013): Residual strength of slip zone soils. *Landslides* 11, 305–314.
26. Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, E., Moretti, P.C. (1989): A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils. *Géotechnique* 39, 343–346.
27. Cooling, L.F. and Smith, D.B. (1935): The shearing resistance of soils. *Journal Institution Civil Engineers*, Vol. 3, 333-343.
28. Cooling, L.F., Smith, D.B. (1936): The shearing resistance of soils. *Proc. 1st I.C.S.M.F.E.*, Boston, Vol. 1, 37-41.
29. Ćorluka, S., Rakić, D., Živanović, N., Djoković, K., Đurić, T. (2024): A Correlation Relating the Residual Strength Parameters to the Proportions of Clay Fractions and Plasticity Characteristics of Overburden Sediments from the Open - Pit Mine Drmno. *Appl. Sci.* 14, 10325. <https://doi.org/10.3390/app142210325>
30. Eberhardt, E. (2003): *Rock Slope Stability Analysis - Utilization of Advanced Numerical Techniques*, Vancouver, Canada: Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.
31. EN 1997-1:2007 (2007): Eurocode 7: Geotechnical Design—Part 2: Ground Investigation and Testing. CEN: Brussels, Belgium.
32. Stevanović, D. (2023): *Studija izvodljivosti eksploatacije uglja na površinskom kopu „Drmno“ – aktuelizacija*, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd
33. Fang, C., Li, Y., Gu, C., Xing, B. (2024): Effect of Fine-Grained Particles and Sensitivity Analysis of Physical Indexes on Residual Strength of Granite Residual Soils. *Coatings* 14, 105. <https://doi.org/10.3390/coatings14010105>
34. Fleischer, S. (1972): Scherbruch-und Schergleitfestigkeit von Bindigen Erdstoffen. Freiburg: Mining Academy. *Neue Bergbautechnik* 2, No. 2, 98-99.
35. Fukuoka, H., Sassa, K., Wang, G. (2007): Influence of shear speed and normal stress on the shear behavior and shear zone structure of granular materials in naturally drained ring shear tests. *Landslides* 4, 63–74.
36. Garga, V.K. (1970): Residual shear strength under large strains and the effect of sample size on the consolidation of fissured clay. PhD Thesis, University of London.
37. Garga, V.K., Sedano, J.A. (2002): Steady state strength of sands in a constant volume ring shear apparatus. *Geotech. Test. J.* 25, 414–421.
38. Gibo, S., Gashira, K., Ohtsubo, M. (1987): Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Can. Geotech. J.*, 24, 456–462.
39. Gruner, H.E., Haefeli, R. (1934): Beitrag zur Untersuchung des physikalischen und statischen Verhaltens Kohlenreicher Boden. *Schweizer. Bauzeitung*, Vol. 103, 171-174.
40. Guyer, J.P., (2010): Introduction to Laboratory Testing of Soils. Lecture notes.

41. Head, K.H. (1992): Manual of soil laboratory testing, Vol. 3, Effective stress tests, Pentech Press Ltd., p.425
42. Haefeli, R. (1938): Mechanische Eigenschaften von Lockergestein. Schweizerische Bauzeitung Vol. III, 299-303, 321-325.
43. Haefeli, R. (1951): Investigation and measurements of the shear strength of saturated cohesive soils. *Geotechnique* 2, No. 3, 186-207.
44. Hawkins A.B., Privett K.D. (1985): Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils, *Ground Engineering*, Vol.18, 22-27.
45. Heidemann, M.; Bressani, L.A.; Flores, J.A. (2020): Residual Shear Strength of a Residual Soil of Granulite. *Soil Rocks* 43, 31–41. <https://doi.org/10.28927/SR.431031>
46. Hayden, C.P., Purchase-Sanborn, K., Dewoolkar, M. (2018): Comparison of site-specific and empirical correlations for drained residual shear strength, *Geotechnique* 68, 1099–1108. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.200>
47. Herrmann, H.G. and Wolfskill, L.A. (1966): Residual shear strength of weak shales, Technical Report No. 3-699, Engineering properties of nuclear craters, Report 5, Massachusetts Institute of Technology, 203 pages.
48. Hoyos, L.R., Velosa, C.L., Puppala, A.J. (2014): Residual shear strength of unsaturated soils via suction-controlled ring shear testing. *Eng. Geol.* 172, 1–12.
49. Hungr, O., Morgenstern, N.R. (1984): High Velocity Ring Shear Tests on Sand. *Geotechnique* 1984, 34, 415–421.
50. Hutchinson, J.N. (1969): A reconsideration of the coastal landslides at Folkestone Warren, Kent, *Geotechnique*, Vol. 19, No. 1, 6-38.
51. Hutchinson, J. N., Bromhead, E. N., Lupini, J. F. (1980): Additional observations on the Folkesone Warren landslides, *Q. Jl. Engng. Geology*, Vol. 13, 1-31.
52. Hvorslev, M.J. (1936): A ring shearing apparatus for the determination of the shearing resistance and plastic flow of soils. In *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boston, MA, USA, 22–26 June, Volume 2, pp. 125–129.
53. Hvorslev, M.J. (1937): *Über die Festigkeitseigenschaften gestorter bindiger Boden (On the strength properties of remoulded cohesive soils)*, Thesis, published by Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Ingeniorvidenskabelige Skrifter, Series A, No. 45, Copenhagen. Translated June 1969 by USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, pp.159
54. Hvorslev, M. J. (1939): Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.* 39, 999–1022.
55. Hvorslev, M.J., Kaufman, R.I. (1952): Torsion shear apparatus and testing procedures. *Bulletin No. 38. US Army Waterways Experimental Station Corps of Engineers*, Vicksburgh, Mississippi.
56. Hvorslev, M. J. (1960): Physical components of the shear strength of saturated clays. *Proc. Shear Strength of Cohesive Soils Conf. Colorado, A.S.C.E*, 169-273.
57. Iyisan, R., Cevikbilen, G., Hatipoglu, M. (2011): Rapid estimation of residual shear strength by ring shear test, *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 197 – 202, <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-801-4-197>
58. Janbu, N. (1954): Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. In: *Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes*, Sweden, 43-49.
59. Japanese Geotechnical Society (2010) :*The Soil Testing Standards, Guidelines and Methods*; Japanese Geotechnical Society: Tokyo, Japan, ISBN 978-4-88644-084-6
60. Juričić, K. (2017): *Prikaz mjera sanacija klizišta. Završni rad. Osijek: Građevinski fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera*

61. Kang, D., Choo, J., Yun, T. S. (2013): Evolution of pore characteristics in the 3D numerical direct shear test, *Computers and Geotechnics* 49: 53–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.10.009>
62. Kanji M.A. (1974a): Unconventional laboratory tests for the characterization of the shear strength of soil-rock contacts, *Proc. 3rd Congress of the Int. Soc. Rock Mechanics, Denver, Vol. 2A*, 241-247.
63. Kanji M.A. (1974b): The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils, *Geotechnique*, Vol. 24, No. 4, 671-674.
64. Kanji, M. A. and Wolle, C. M. (1977): Residual strength - new testing and microstructure, *Proc. 9th I.C.S.M.F.E., Tokyo, Vol. 1*, 153-154.
65. Kimura, S., Nakamura, S., Vithana, S.B., Sakai, K. (2014): Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range. *Landslides* 11, 969–979.
66. Kenney, T. C. (1967): The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils, *Proc. Geotech. Conf., Oslo, Vol. 1*, 123-129
67. Kenney, T. G. (1977): Residual strengths of mineral mixtures. *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. 1*, 155-160.
68. Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1969): *Soil Mechanics*; John Wiley and sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, p. 559.
69. Lambe, T. W. (1985): Amuay landslides. *Proc. XI. Int. Conf Soil Mech. Fdn Engng., San Francisco*.
70. La Gatta, D.P. (1970): *Residual Strength of Clay and Clay-Shales by Rotation Shear Tests*; Harvard Soil Mechanics Series; Harvard University Press: Cambridge, MA, USA, Volume 86.
71. Lai, J. (2004): *Direct shear testing*, Chaoyang University of technology. 14 p.
72. Leninger, I. (2016): *Analiza stabilnosti pokosa obale pod utjecajem potresnog opterećenja. Završni rad. Osijek: Građevinski fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera*
73. Li, Y.R., Wen, B.P., Aydin, N.S., Lu, N.P. (2013): Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges, Project area. *Eng. Geol.* 154, 106–115.
74. Li W.K. (2016): Experiments of shear strength characteristics in ring shear tests of loess from South Jingyang Plateau. *J Water Resour Archit Eng*, 14(1), 184–187 (in Chinese)
75. Lian, B., Wang, X., Peng, J., Huang, Q. (2020): Shear rate effect on the residual strength characteristics of saturated loess in naturally drained ring shear tests, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 2843–2856, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2843-2020>
76. Littleton, I. (1976): An experimental study of the adhesion between clay and steel. *Journal of Terramechanics*, Vol. 13, No. 3, pp 141-152.
77. Liu, C., Ho, Y., Huang, J. (2009): Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces, *Geotextiles and Geomembranes* 27(1): 19–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.03.002>
78. Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R. (1981): The Drained Residual Strength of Cohesive Soils. *Geotechnique* 31, 181–213.
79. Matthews, M.C., Clayton, C.R.I., Own, Y. (2000): The use of field geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters. *Geotech. Eng.* 143, 31–42.
80. Maksimović, M. (1989): On the residual shearing strength of clays. *Géotechnique* 39, 347–351 <https://doi.org/10.1680/geot.1989.39.2.347>
81. Meehan C.L., Brandon T.L., Duncan J.M. (2007): Measuring drained residual strengths in the Bromhead ring shear. *Geotech Test J*, 30(6):466–73
82. Mesri, G. and Cepeda-Diaz, F. (1986): Residual shear strength of clays and shales. *Géotechnique*, 36(2), 269–274.
83. Mesri, G., Shahien, M. (2003): Residual shear strength mobilized in first-time slope failures. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 129(1), 12–31.

84. Mesri G, Huvaj-Sarihan N. (2012): Residual shear strength measured by laboratory tests and mobilized in landslides. *J Geotech Geoenviron Eng*, 138, 585–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000624)
85. Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965): The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, Vol.15, No.1.
86. Najjar, S., Gilbert, B., Liedtke, E., McCarron, B., Young, A. (2007): Residual Shear Strength for Interfaces between Pipelines and Clays at Low Effective Normal Stresses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J Geotech Geoenviron Eng*. 133. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(695\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(695))
87. Nelson J.L. (1992): Clay mineralogy and residual shear strength of the Santa Clara formation claystone, Saratoga Foothills, California. *Bull Assoc Eng Geol*, 29, 299–310.
88. Petley, D. J. (1966): The shear strength of soils at large strains, PhD Thesis, University of London
89. Ohja, S., Trivedi, A. (2013): Shear strength parameters for silty-sand using relative compaction, *EJGE* 18: 81–99
90. Okada, Y., Ochiai, H., Okamoto, T., Sassa, K., Fukuoka, H., Igwe, O. (2007): A complex earth slide- Earth flow induction by the heavy rainfall in July 2006, Okaya City, Nakagano Prefecture, Japan. *Landslides* 4, 197–203.
91. Rabie K.H. (2016): Drained residual shear strength of fine-grained soils and soil-solid interfaces at low to medium effective normal stresses: analyses and applications. Qatar University College of Engineering.
92. Radu, R., Petru, C., Loan, T. (2014): Assesment of a traction model for agricultural tires based on a variable shear area model and experimental data, *Advanced Materials Research* 837: 458 - 463.
93. Randolph, M.F. & Wroth, C.P. (1981): Application of the failure state in undrained simple shear shaft capacity of driven piles. *Géotechnique*, 31(1):143-157.
94. Rakić, M. (1978): Osnovna geoloska karta SFRJ 1:100.000, list Bela Crkva (K34-115) Zavod za geološka, hidrogeološka, geofizička i geomehanička istraživanja, OOUR Geološki institut, Beograd
95. Rakić D. (1996): Prilog problemu istraživanja čvrstoće i stabilnosti: glina i glineno tlo; XI Jugoslovenski simpozijum o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji, knjiga II, str. 13 - 25.
96. Rakić, D., Čaki, L., Čorić, S., Ljubojev, M. (2011): Residual strength parameters of high plasticity clays and alevrites from open/pit mine “Tamnava—West field”. *Min. Eng.* 1, 39–48.
97. Ramiah, B.K., Dayalu, N.K., Purushothamaraj, P. (1970): Influence of chemicals on residual strength of silty clay. *Soils Found.* 10, 25–36.
98. Reyes, A., Parra, D. (2014): 3D slope stability analysis by the using limit equilibrium method analysis of a mine waste dump. *Keystone, Colorado: Proceedings Tailings and Mine Waste 2014.* October 5 - 8.
99. Savage, S.B., Sayed, M. (1984): Stresses Developed by Dry Cohesionless Granular Materials Sheared in an Annular Shear Cell, *J. Fluid Mech.* 142, 391–430.
100. Seycek, J. (1979) Residual shear strength of soils, *Bull. Int. Ass. Engng Geol.* 17, 73-75.
101. Sadrekarimi A., Olson S.M. (2010): Shear band formation observed in ring shear tests on sandy soils. *J Geotech Geoenviron Eng.* 136(2), 366 - 375
102. Sassa, K.; Fukuoka, H.; Wang, G.; Ishikawa, N. (2004): Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides* 1, 7–19.
103. Shimobe, S., Karakan, E., Sezer, A. (2025): Empirical and soft computing approaches for estimation of residual friction angle of clays using toughness limit, *Transportation Geotechnics*, Volume 50, 101467, ISSN 2214-3912, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101467>

104. Skempton, A.W. (1958): Bell A. L. (1874–1956) and his contribution to soil mechanics. *Geotechnique* 8, 143–157. <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.4.143>
105. Skempton, A.W. (1956): Alexandre Collin (1808-1890) and his Pioneer Work in Soil Mechanis, Preface to the translation by W. R. Schriever of Alexandre Collin (1846) book. University of Toronto Press.
106. Skempton, A.W. (1964): Long-term stability of clay slopes: Fourth Rankine Lecture. *Geotechnique*, Vol. 14, No. 2, 77-102
107. Skempton, A. W. and Petley, D. J. (1967) The strength along structural discontinuities in stiff clays, *Proc. Geotech. Conf., Oslo*, Vol. 2, 29-46.
108. Skempton, A.W. (1985): Residual strength of clays in landslides, Folded Strata and the Laboratory. *Geotechnique* 35, 3–18.
109. Sridharan A., Raghuvver R. P. (2004): Discussion: Residual strength of clays and correlation using Atterberg limits, *Geotechnique* 54, 503-504. <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.7.503>
110. SRPS EN ISO 14688-2, (2018): Геотехничко истраживање и испитивање – Идентификација и класификација тла – Део 2: Принципи класификације
111. SRPS EN ISO 17892-1, (2015): Геотехничко истраживање и испитивање - Лабораторијско испитивање тла - Део 1: Одређивање влажности
112. SRPS EN ISO 17892-2, (2015): Геотехничко истраживање и испитивање - Лабораторијско испитивање тла - Део 2: Одређивање запреминске масе
113. SRPS EN ISO 17892-4, (2017): Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 4: Одређивање гранулометријског састава
114. SRPS EN ISO 17892-5, (2017): Геотехничко истраживање и испитивање - Лабораторијско испитивање тла - Део 5: Едометарско испитивање степенастим оптерећењем
115. SRPS EN ISO 17892-10, (2019): Геотехничко истраживање и испитивање - Лабораторијско испитивање тла - Део 10: Испитивање директног смицања
116. SRPS EN ISO 17892-12, (2018): Геотехничко истраживање и испитивање - Лабораторијско испитивање тла - Део 12: Одређивање течења и пластичности тла
117. SRPS ISO 3310-1 (2018) Laboratorijska sita – Tehnički zahtevi i ispitivanje – Deo 1: Laboratorijska sita od tkane metalne žice
118. SRPS ISO 3310-2 (1994) Laboratorijska sita – Tehnički zahtevi i ispitivanje – Deo 2: Laboratorijska sita od izbušene metalne ploče
119. Stark, T. D. and Vettel, J. J. (1992): Bromhead Ring Shear Test Procedure, *Geotech. Test. J., ASTM*, Vol. 15, No. 1, 24-32
120. Stark, T. D., Eid, H. T. (1994): Drained residual strength of cohesive soils. *J. Geotech. Eng. Div.* 120(5), 856–871
121. Stark, T.D., Choi, H., McCone, S. (2005): Drained shear strength parameters for analysis of landslides. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131, 575–588.
122. Stark, T.D., Hussain, M. (2012): Empirical correlations: drained shear strength for slope stability analyses. *J. Geotech. Geoenviron.* 139 (6), 853–862, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000824](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000824)
123. Suzuki, M., Tsuzuki, S., Yamamoto, T. (2005): Physical and chemical index properties of residual strength of various soils.
124. Terzaghi, K., Peck, R.B. (1996): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Third edition; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA.
125. Технички рударски пројекат експлоатације и транспорта и одлагања откривке на ПК „Дрмно“, (2022), Рударско-геолошки факултет, Београд.
126. Технички рударски пројекат експлоатације и транспорта угља на ПК „Дрмно“, (2022) Рударско-геолошки факултет, Београд.

127. Tiedemann, B. (1937): *Über die Schubfestigkeit bindiger Boden*. Bautechnik. Vol. 15, Nos. 30 and 33, 400-403 and 433-435.
128. Tika, T. (1989). The effect of fast shearing on the residual strength of soils. PhD thesis, University of London.
129. Tika, T. E.; Hutchison, J. N. (1999): Ring shear tests on soil from the Viont landslide slip surface. *Geotechnique* 49, 59–74.
130. Tiwari, B., Tuladhar, G. R., Marui, H. (2005): Variation in residual shear strength of the soil with the salinity of pore fluid. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131(12), 1445–1456.
131. Tiwari, B., Thomas L. Brandon, T.L., Marui, H., Tuladhar, G.R., (2005): Comparison of Residual Shear Strengths from Back Analysis and Ring Shear Tests on Undisturbed and Remolded Specimens, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 131, 1071-1079, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(10)
132. Tiwari, B., Ajmera, B. (2011): A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics, *Applied Clay Science*, Volume 53, Issue 1, 48-57, ISSN 0169-1317, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.021>
133. Townsend, F. C., Gilbert, P. A. (1973): Tests to measure residual strengths of some clay shales, *Geotechnique*, Vol. 23, No. 2, 267-271.
134. Townsend, F. C., Gilbert, P. A. (1974): Engineering properties of clay shales. Report 2. Residual shear strength and classification indexes of clay shales. Technical report S-71-6. Soils and Pavements Laboratory US Army Engineers Waterways, Experiment Station, Vicksburgh, 118 pages.
135. Townsend, F.C., Gilbert, P.A. (1976): Effects of specimen type on the residual strength of clays and clay shales, *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*, American Society Testing Materials, STP 599, 43-65.
136. UNIRI (2018): Analize stabilnosti kosina. Rijeka: Sveučilište u Rijeci. URL: https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/009/135/original/Stab_kosina_P5_15_16.pdf?1485352884
137. Van Asch, T.W.; Van Beek, L.P.H.; Bogaard, T.A. (2007): Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Eng. Geol.* 91, 46–55.
138. Vickers, B. (1984): *Laboratory Work in Soil Mechanics*, Granada Publishing Ltd., London.
139. Vithana, S. B., Nakamura, S., Gibo, S., Yoshinaga, A., Kimura, S. (2012): Correlation of large displacement drained shear strength of landslide soils measured by direct shear and ring shear devices. *Landslides* 9, 305–314. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0301-9>
140. Vaughan, P. R., Hight, D. W., Sodha, V. G., Walbancke, H. J. (1979) Factors controlling the stability of clay fills in Britain. In *Clay Fills*, London: Institution of Civil Engineers, 203-217.
141. Voight B. (1973): Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils. *Geotechnique* 23, 265 - 267. <https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.2.265>
142. Vujić, S., Ivić, A. (1991): *Matematičke metode u rudarstvu i geologiji, teorija i primena*, Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet
143. Wang, G., Suemine, A., Furuya, G., Kaibori, M., Sassa, K. (2004): Rainstorm-induced landslides at Kisawa village, Tokushima Prefecture, Japan, *Landslides* 2, 235–242.
144. Wen, B. P., Aydin, A., Duzgoren-Aydin, N.S., Li, Y. R., Chen, H. Y., Xiao, S. D. (2007): Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China, *Engineering Geology*, Volume 93, Issues 3–4, 82-98, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.05.006>
145. Wesley L. D. (2003): Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits. *Geotechnique* 53, 669–672. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.669>
146. Wykeham Farrance (2019) *Instruction manual for the Torshear EmS 27 -WF22E02*, Italy, p.67.

147. Xu, C., Wang, X., Lu, X., Dai, F., Jiao, S. (2017): Experimental study of residual strength and the index of shear strength characteristics of clay soil. *Eng. Geol.* 233, 183–190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.004>
148. Xu, Y. (2020): Residual Strength of Franciscan-Derived Clay (M.Sc. Thesis). California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
149. Yatabe, R., Yagi, N., Enoki M. (1991): Ring shear characteristics of clays in fractured - zone-landslide, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, 436 (III-16), 93-101, (In Japanese)
150. Yatabe, R., Yagi, N., Mukaitani, M., Enoki M. (1996): Influence of shear test method and restraint condition on residual strength of soil. *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, 554 (III-37), 139-146 (in Japanese).
151. Yuan, J., Fang, Y., Gu, R., Hu, G., Peng, X. (2013): Experimental research on influence of granulometric composition on sandy soil strength and reological properties, *EJGE* 18: 4081–4091.
152. Zhang, B., Zhao, Q. G., Horn, R., Baumgartl, T. (2001): Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content, *Soil and Tillage Research* 59 (3–4): 97–106. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00163-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00163-5)

12. БИОГРАФИЈА

Стеван Ђорлука је рођен 08.11.1992. у Кикинди. Основну школу завршио у Руском Селу, а гимназију „Душан Васиљев" у Кикинди. Основне студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Смер геотехника, завршио 2015. Мастер студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Смер геотехника, завршио 2016. Школске 2016/17. уписао докторске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Научна област геотехника.

Након завршених мастер студија, од 2016. до 2023. године радио је у Рударском институту у Земуну, на обради лабораторијских геомеханичких испитивања, на изради рударских и геолошких пројеката, документације, елабората и студија, са акцентом на област инжењерске геологије и геотехнике, израде геолошких подлога за потребе изградње објеката и планова детаљне регулације, картирања истражних бушотина. Од 2018. као заменик лица одговорног за квалитет учествује у увођењу система квалитета SRPS 17025:2017 и припреми материјала за добијање акредитације лабораторије за геомеханичка испитивања из серије стандарда SRPS EN ISO, од стране Акредитационог тела Србије - АТС-а.

Од новембра 2023. године заснива радни однос у Институту за испитивање материјала у Београду, Центру за путеве и геотехнику. У Институту ИМС, као водећи инжењер за лабораторијска испитивања, бави се лабораторијским геомеханичким испитивањима за различите врсте објеката, учествује у изради елабората и студија.

Поседује пројектантску и извођачку лиценцу. Учесник је бројних научних и стручних скупова и семинара из геолошког инжењерства. До сада као аутор и коаутор објавио је више научних и стручних радова и техничких решења.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Стеван Ђ. Ђорлука

Број индекса Г806/16

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

РЕЗИДУАЛНА ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА НЕПРОДУКТИВНИХ СРЕДИНА СА

ПК ДРМНО

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 31.03.2025.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Стеван Ђ. Ђорлука

Број индекса Г806/16

Студијски програм Геотехника

Наслов рада РЕЗИДУАЛНА ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА НЕПРОДУКТИВНИХ
СРЕДИНА СА ПК ДРМНО

Ментор др Драгослав Ракић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањена у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 31.03.2025.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

РЕЗИДУАЛНА ЧВРСТОЋА СМИЦАЊА НЕПРОДУКТИВНИХ СРЕДИНА СА ПК

ДРМНО

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 31.03.2025.
