

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Tina D. Đurić

**GEOTEHNIČKO MODELIRANJE  
NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO  
PREKONSOLIDOVANOG TLA PRIMENOM  
NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE**

doktorska disertacija

Beograd, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Tina D. Đurić

**GEOTECHNICAL MODELLING OF NORMALLY  
CONSOLIDATED AND SLIGHTLY OVERCONSOLIDATED  
SOIL USING UNDRAINED SHEAR STRENGTH**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

Tina D. Đurić

**GEOTEHNIČKO MODELIRANJE NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO  
PREKONSOLIDOVANOG TLA PRIMENOM NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE**

**Mentor:**

Prof. dr Dragoslav Rakić, redovni profesor

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo  
*Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*

**Članovi komisije:**

Prof. dr Dušan Berisavljević, vanredni profesor

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo  
*Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*

Prof. dr Irena Basarić Ikodinović, docent

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo  
*Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*

Dr Ksenija Đoković, naučni saradnik

Uža naučna oblast: Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo  
*Institut za ispitivanje materijala Srbije-IMS*

Datum odbrane:

---

## ZAHVALNICA

Ovim putem želim da izrazim posebnu zahvalnost svom mentoru, prof. dr Dragoslavu Rakiću, na nesebičnoj podršci i razumevanju, kao i na izuzetno dragocenim savetima i smernicama koje su u velikoj meri doprinele izradi ove doktorske disertacije.

Posebnu zahvalnost izražavam članovima komisije: prof. dr Dušanu Berisavljeviću na izdvojenom vremenu, prijateljskoj atmosferi i konstruktivnim savetima koji su učinili rad boljim; prof. dr Ireni Basarać Ikodinović na prijateljskim savetima, stručnim sugestijama, motivaciji i prelepim idejama; dr Kseniji Đoković na korisnim savetima, iskrenoj pomoći, izdvojenom vremenu i doprinosima prilikom realizacije doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Gordani Hadži-Niković i prof. dr Biljani Albomasov koje su mi uvek davale lepe savete i konstruktivne motivacione govore. Takođe, posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Dragutinu Jevremoviću na dragocenim sugestijama i podršci na samom početku mog istraživačkog rada.

Zahvaljujem se firmi Saobraćajni Institut CIP d.o.o. i kolegi Mihajlu Laziću na ustupljenim podacima i prikupljenim uzorcima pomoću kojih su realizovana ova istraživanja.

Iskreno se zahvaljujem dragim kolegincama i prijateljicama Jovani, Sneži, Jelki i Mariji na безусловnoj podršci tokom realizacije laboratorijskih istraživanja, korisnim smernicama, lepoj atmosferi i saradnji tokom proteklih godina.

Duboku zahvalnost dugujem svim svojim prijateljima koji su uvek tu za mene, pružajući podršku i ohrabrenje.

Na kraju, posebno mesto u ovoj zahvalnici zauzima moja porodica, bez čije pomoći, razumevanja, podrške, strpljenja i ljubavi ne bih uspela. Hvala vam na svemu što ste učinili za mene.

# GEOTEHNIČKO MODELIRANJE NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO PREKONSOLIDOVANOG TLA PRIMENOM NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE

## Rezime

U disertaciji je prikazana analiza i geotehničko modeliranje nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) na normalno konsolidovanim i slabo prekonsolidovanim sitnozrnim materijalima šireg područja Beograda. Osnovni cilj istraživanja bio je određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće primenom različitih laboratorijskih i terenskih metoda, kao i uspostavljanje korelacionih zavisnosti između nedrenirane smičuće čvrstoće i relevantnih fizičko-mehaničkih parametara tla.

Eksperimentalni deo istraživanja obuhvatio je laboratorijska ispitivanja osnovnih fizičkih i mehaničkih karakteristika tla i određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće primenom više metoda. Nedrenirana smičuća čvrstoća analizirana je laboratorijskim opitima, uključujući jednoaksijalni opit, opit padajućeg konusa, opit džepne krilne sonde i opit džepnog penetrometra, dok su terenski podaci dobijeni statičkim penetracionim opitom. Laboratorijska istraživanja su obavljena na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla, i izvršena je analiza senzitivnosti tla.

Na osnovu prikupljenih rezultata urađena je statistička obrada podataka kao i međusobna analiza odnosa između nedrenirane smičuće čvrstoće i pojedinih parametara tla. Primenom korelacione analize ispitana je povezanost nedrenirane smičuće čvrstoće sa parametrima kao što su vlažnost tla, granica tečenja, indeks plastičnosti, indeks tečenja, stepena prekonsolidacije i zapreminske težine tla. Daljom analizom razvijeni su prediktivni modeli za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće korišćenjem linearne regresije i empirijskog modela.

Dobijene korelacione zavisnosti i prediktivni modeli verifikovani su poređenjem sa postojećim empirijskim relacijama iz savremene literature. Dodatna verifikacija sprovedena je numeričkom analizom primenom programskog jezika Python, čime je izvršena procena pouzdanosti razvijenih modela i njihove primenljivosti.

Rezultati istraživanja omogućavaju bolje razumevanje uticaja fizičko-mehaničkih parametara tla na nedreniranu smičuću čvrstoću i predstavljaju osnovu za razvoj pouzdanih geotehničkih modela za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće u inženjerskim analizama.

**Ključne reči:** nedrenirana smičuća čvrstoća, laboratorijske metode, korelacione zavisnosti, prediktivni modeli

**Naučna oblast:** Geološko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo

**UDK:** 624.13:004.41(043.3)

# GEOTECHNICAL MODELLING OF NORMALLY CONSOLIDATED AND SLIGHTLY OVERCONSOLIDATED SOIL USING UNDRAINED SHEAR STRENGTH

## Abstract

This dissertation presents an analysis and geotechnical modelling of the undrained shear strength ( $c_u$ ) of normally consolidated and slightly overconsolidated fine-grained soils from the wider Belgrade area. The main objective of the research was to determine undrained shear strength using various laboratory and in-situ testing methods, as well as to establish correlation relationships between undrained shear strength and relevant physical and mechanical soil parameters.

The experimental part of the research included laboratory testing of the basic physical and mechanical properties of soils and the determination of undrained shear strength using several methods. Undrained shear strength was determined through laboratory tests including the unconfined compression test, fall cone test, pocket vane test and pocket penetrometer test, while in-situ data were obtained from the Cone Penetration Test. Laboratory investigations were carried out on both undisturbed and remoulded soil samples, and soil sensitivity was also analyzed.

Based on the obtained results, statistical data processing and analysis of the relationships between undrained shear strength and selected soil parameters were performed. Correlation analysis was applied to examine the relationship between undrained shear strength and parameters such as water content, liquid limit, plasticity index, liquidity index, overconsolidation ratio and soil unit weight. Through further analysis, predictive models were developed to estimate undrained shear strength using linear regression and an empirical model.

The obtained correlation relationships and predictive models were verified through comparison with existing empirical relationships reported in the literature. Additional verification was carried out through numerical analysis using the Python programming language, enabling an assessment of the reliability and applicability of the developed models.

The results of this research contribute to a better understanding of the influence of physical and mechanical soil parameters on undrained shear strength and provide a basis for the development of reliable geotechnical models for estimating this parameter in engineering analyses.

**Keywords:** undrained shear strength, laboratory testing methods, correlation relationships, predictive models

**Scientific field:** Geological engineering

**Scientific subfield:** Engineering geology, geomechanics and geotechnical engineering

**UDK:** 624.13:004.41(043.3)

# SADRŽAJ

SPISAK SLIKA .....	v
SPISAK TABELA .....	xv
1. UVOD .....	1
1.1. Predmet i cilj istraživanja .....	2
1.2. Polazne hipoteze .....	3
1.3. Metode istraživanja .....	3
1.4. Organizacija doktorske disertacije .....	4
2. PREGLED LITERATURE I TEORIJSKIH OSNOVA NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE .....	6
2.1. Opšte o nedreniranoj smičućoj čvrstoći .....	6
2.2. Korelacione zavisnosti i modeli .....	9
2.2.1. Korelacije u funkciji od vlažnosti i granice tečenja .....	10
2.2.2. Korelacije u funkciji od indeksa plastičnosti .....	14
2.2.3. Korelacije u funkciji od indeksa tečenja .....	16
2.2.4. Korelacije u funkciji od napona prekonsolidacije i stepena prekonsolidacije .....	21
2.3. SHANSEP metoda .....	23
3. STRUKTURA I MINERALOŠKI SASTAV TLA .....	26
3.1. Struktura tla .....	26
3.2. Mineralni sastav .....	28
4. ISTORIJA OPTEREĆENJA, STEPEN PREKONSOLIDACIJE I NAPON PREKONSOLIDACIJE .....	31
4.1. Istorija opterećenja .....	31
4.2. Stepen prekonsolidacije i napon prekonsolidacije .....	32
5. METODE I PROGRAM ISPITIVANJA .....	37
5.1. Laboratorijska ispitivanja osnovnih fizičko – mehaničkih karakteristika tla .....	37

5.1.1.	Određivanje granulometrijskog sastava .....	37
5.1.2.	Određivanje zapreminske mase čvrstih čestica i zapeminske mase tla .....	37
5.1.3.	Određivanje vlažnosti tla .....	38
5.1.4.	Aterbergove granice – plastičnost i konzistencija .....	38
5.1.5.	Senzitivnost glina.....	43
5.1.6.	Edometarski opit .....	47
5.2.	Laboratorijska ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće tla.....	49
5.2.1.	Opit padajućeg konusa .....	49
5.2.2.	Jednoaksijalni opit .....	54
5.2.3.	Džepni penetrometar .....	56
5.2.4.	Džepna krilna sonda.....	57
5.3.	Terenska ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće .....	59
5.3.1.	Statički penetracioni opit (CPT i CPTu).....	59
5.3.2.	Standardni penetracioni opit (SPT).....	63
5.3.3.	Terenska krilna sonda (FVT) .....	64
5.3.4.	Presiometarski opit (PMT).....	65
5.3.5.	Dilatometarski opit (DMT i SDMT).....	66
5.4.	METODE STATISTIČKE OBRADE .....	67
5.4.1.	Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) .....	67
5.4.2.	Srednja kvadratna greška (RMSE).....	67
5.4.3.	Srednja apsolutna greška (MAE) .....	68
5.4.4.	Srednja apsolutna procentualna greška (MAPE) .....	68
5.4.5.	Koeficijent korelacije – Pirsonov koeficijent .....	68
5.4.6.	Prediktivni modeli.....	69
6.	INTERPRETACIJA DOBIJENIH REZULTATA .....	71

6.1. Opšti prikaz područja ispitivanja.....	71
6.2. Identifikaciono-klasifikacione karakteristike tla.....	74
6.3. Stišljivosti tla i naponsko-deformacijske karakteristike tla.....	78
6.4. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla.....	84
6.4.1. Opit padajućeg konusa.....	84
6.4.2. Jednoaksijalni opit.....	103
6.4.3. Džepna krilna sonda.....	114
6.4.4. Džepni penetrometar.....	120
6.4.5. Statički penetracioni opit – CPT.....	128
7. USPOSTAVLJANJE KORELACIONIH ZAVISNOSTI.....	132
7.1. Pirsonov koeficijent.....	132
7.2. Korelacione zavisnosti između vlažnosti tla i nedrenirane smičuće čvrstoće.....	134
7.2.1. Zavisnost penetracije i vlažnosti tla kod opita padajućeg konusa.....	134
7.2.2. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na penetraciju.....	137
7.2.3. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti.....	138
7.3. Korelacione zavisnosti između indeksa tečenja i nedrenirane smičuće čvrstoće.....	143
7.4. Korelacione zavisnosti između indeksa plastičnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće.....	144
8. RAZVOJ PREDIKTIVNIH MODELA ZA NEDRENIRANU SMIČUĆU ČVRSTOĆU.....	148
8.1. Jednostavna linearna regresija unutar uzoraka.....	148
8.2. Višestruka linearna regresija.....	151
8.2.1. Uticaj stepena prekonsolidacije i zapreminske težine dobijenih iz CPT opita.....	154
8.3. Primena SHANSEP modela.....	155
9. VERIFIKACIJA DOBIJENIH REZULTATA.....	159
9.1. Verifikacija dobijenih korelacija u zavisnosti od vlažnosti.....	159
9.1.1. Verifikacija rezultata primenom programskog jezika Python.....	166

9.2. Verifikacija uspostavljenih korelacija između indeksa tečenja i nedrenirane smičuće čvrstoće .....	168
9.2.1. Verifikacija rezultata primenom programskog jezika Python .....	171
10. POREĐENJE DOBIJENIH VREDNOSTI NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE RAZLIČITIM OPITIMA.....	173
11. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA, PREPORUKE I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA	179
LITERATURA .....	182
DODATAK.....	194
D.1. Uvod.....	195
D.2. Alternativne metode za dobijanje granice plastičnosti.....	196
BIOGRAFIJA .....	201

## SPISAK SLIKA

Slika 2.1. Ilustracija nedrenirane smičuće čvrstoće Mohr-Coulombovom anvelopom loma.....	7
Slika 2.2. Šematski prikaz nedrenirane čvrstoće prema teorijskim osnovama .....	8
Slika 2.3. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja .....	10
Slika 2.4. a.) Logaritamski odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti tla b.) Zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti (Koumoto i Houlsby, 2001) .....	11
Slika 2.5. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće određene različitim opitima i vlažnosti (O'Kelly, 2011) .....	12
Slika 2.6. Odnos normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja (Vaherdifard i sar., 2016). .....	13
Slika 2.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i WCR (Sharma i Sridharan, 2018).....	13
Slika 2.8. Zavisnost nedrenirane čvrstoće tla, vertikalnog napona i indeksa plastičnosti (Skempton, 1957) .....	14
Slika 2.9. Korekcionni faktor $\mu$ za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće (Terzaghi i sar., 1996) .....	15
Slika 2.10. Korekcionni faktor $\mu$ prema Aas i sar. (1986) .....	16
Slika 2.11. a.) Grafički prikaz jednačine 2.15, b.) Raspored tla prema istoriji opterećenja (Wood, 1990) .....	17
Slika 2.12. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenog tla i indeksa tečenja (Terzaghi i sar. 1996) .....	18
Slika 2.13. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja, i novodefinisanog indeksa tečenja (Koumoto i Houlsby, 2001) .....	19
Slika 2.14. Odnos između indeksa tečenja i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće (Tanaka i sar., 2012).....	19
Slika 2.15. Zavisnost indeksa tečenja i nedrenirane čvrstoće smicanja (Vardanega i Haigh, 2014).20	
Slika 2.16. Prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ u zavisnosti od indeksa tečenja $I_L$ (Shimobe i Spagnoli, 2020a). .....	20
Slika 2.17. Zavisnost indeksa plastičnosti i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće (Mesri, 1975) .....	22
Slika 2.18. Odnos normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i OCR-a (Amin i sar., 1992).....	25

Slika 3.1. Tipovi strukture tla (Soil Survey Staff, 2004) .....	26
Slika 3.2. Prostorni izgled a.) Silicijumski tetraedar i njegov sloj i b.) Aluminijski ili magnezijumski oktaedar i njegov sloj.....	28
Slika 3.3. Pojednostavljeni prikaz četiri vrste minerala glina.....	28
Slika 3.4. Difuzni dvostruki sloj .....	30
Slika 3.5. a.) Struktura minerala glina sa različitim stepenom orijentacije (Kezdi, 1974) b.) Uticaj smanjenja koeficijenta poroznosti na deformabilnost tla.....	30
Slika 4.1. Uticaj presušivanja tla na napon prekonsolidacije.....	31
Slika 4.2. Uticaj stepena prekonsolidacije na kompresionu krivu .....	32
Slika 4.3. Određivanje napona prekonsolidacije metodom Kasagrandea.....	33
Slika 4.4. Određivanje napona prekonsolidacije Ohde-ovom metodom .....	34
Slika 4.5. Određivanja napona prekonsolidacije a.) Burmister, b.) Schmertmann.....	34
Slika 4.6. a.) Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i efektivnog vertikalnog napona u zavisnosti od indeksa plastičnosti i b.) Odnos napona prekonsolidacije i vertikalnog napona u funkciji od indeksa plastičnosti. (Bjerrum, 1973) .....	36
Slika 5.1. Dijagram plastičnosti .....	39
Slika 5.2. Podela tla na osnovu stanja konzistencije prema Aterbergu .....	40
Slika 5.3. Dijagram aktivnosti glina .....	42
Slika 5.4. Šematski prikaz rezultata jednoaksijalnog opita na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	44
Slika 5.5. Podela tla prema senzitivnosti glina .....	45
Slika 5.6. Šematski prikaz tiksotropije tla .....	45
Slika 5.7. Senzitivnost u odnosu na indeks tečenja (Wood, 1990).....	46
Slika 5.8. Odnos indeksa tečenja i senzitivnosti (Carter i Bently, 1990).....	46
Slika 5.9. Izgled korišćenog edometarskog aparata (Izvor: Laboratorija RGF-a).....	48
Slika 5.10. Padajući konus - „fall cone test“ (Izvor: Laboratorija RGF-a).....	50
Slika 5.11. Šematski prikaz konusa i kliznih linija (Koumoto i Houlsby, 2001) .....	52

Slika 5.12. Odnos faktora $\mu$ i granice tečenja $w_L$ (Larsson i sar., 1984).....	53
Slika 5.13. Jednoaksijalni opit - ćelija i uzorak pre i posle izvođenja opita (Izvor: Laboratorija RGF-a) .....	54
Slika 5.14. Anvelope loma iz jednoaksijalnog opita i dijagram relativnih deformacija.....	55
Slika 5.15. Karakteristićni lomovi a.) Uzorak pre testiranja b.) krti lom c.) plastićni lom d.) plastićno tećenje – meki lom (Kezdi, 1974).....	56
Slika 5.16. Džepni penetrometar (Izvor: Laboratorija RGF-a).....	57
Slika 5.17. Džepna krilna sonda (Izvor: Laboratorija RGF-a).....	58
Slika 5.18. Statićki penetracioni opit – uređaj i izgled konusa.....	60
Slika 5.19. Osnovni delovi opreme i princip izvođenja SPT opita.....	63
Slika 5.20. Izgled terenske krilne sonde .....	64
Slika 5.21. Izgled presiometarskog aparata – kontrolna jedinica .....	65
Slika 5.22. Šematski prikaz dilatometarskog opita (Berisavljević, 2017) .....	66
Slika 6.1. Šire istražno područje .....	71
Slika 6.2. Inženjersko-geološka karta Srbije 1:300000 (Geološki informacioni sistem Srbije).....	72
Slika 6.3. Osnovna geološka karta šire zone istraživanja (Saobraćajni Institut CIP (grupa autora) – prilagođeno) .....	73
Slika 6.4. Dijagram granulometrijskog sastava lesoidnih glina.....	74
Slika 6.5. Dijagram granulometrijskog sastava aluvijalnih glina .....	75
Slika 6.6. Zbirni prikaz granulometrijskog sastava .....	75
Slika 6.7. Dijagram plastićnosti za lesoidne gline .....	76
Slika 6.8. Dijagram plastićnosti za aluvijalne gline.....	76
Slika 6.9. Zbirni dijagram plastićnosti.....	77
Slika 6.10. Zbirni prikaz osnovnih faznih pokazatelja tla prema dubini .....	78
Slika 6.11. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak PB-27 (1.10-1.50 m) .....	79
Slika 6.12. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-23 (2.50-2.80 m).....	79

Slika 6.13. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-41 (7.60-7.9 0m).....	80
Slika 6.14. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak MB-25 (1.30-1.60 m).....	80
Slika 6.15. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak MB-13 (1.50-1.80 m).....	81
Slika 6.16. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak D-2 (2.00-2.20 m) .....	81
Slika 6.17. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak PB-27 (4.30-4.60 m) .....	82
Slika 6.18. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-41 (12.70-13.00 m).....	82
Slika 6.19. Modul stišljivosti za različit stepen opterećenja .....	83
Slika 6.20. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	84
Slika 6.21. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	85
Slika 6.22. Neporemećen i prerađen uzorak PB-21 (1.1-1.5 m) za konus 30°/100g .....	85
Slika 6.23. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	86
Slika 6.24. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	87
Slika 6.25. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	87
Slika 6.26. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) za konus 60°/80g .....	88
Slika 6.27. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	88
Slika 6.28. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	89
Slika 6.29. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	89
Slika 6.30. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-41(7.6-7.9 m) za konus 30°/100g .....	90
Slika 6.31. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	90
Slika 6.32. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	91
Slika 6.33. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	91
Slika 6.34. Neporemećen i prerađen uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) za konus 60°/60g.....	92
Slika 6.35. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	93

Slika 6.36. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	93
Slika 6.37. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	94
Slika 6.38. Neporemećen i prerađen uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) za konus 30°/80g.....	94
Slika 6.39. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	95
Slika 6.40. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	95
Slika 6.41. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	96
Slika 6.42. Neporemećen i prerađen uzorak D-1 (2.0-2.2 m) za konus 30°/400g.....	96
Slika 6.43. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	97
Slika 6.44. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	97
Slika 6.45. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	98
Slika 6.46. Neporemećen i prerađen uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) za konus 60°/60g.....	98
Slika 6.47. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	99
Slika 6.48. Dijagram zavisnosti dubine penetracije (h) od vlažnosti (w) .....	99
Slika 6.49. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti w .....	100
Slika 6.50. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-41(12.7-13 m) za konus 30°/400g .....	100
Slika 6.51. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	101
Slika 6.52. Senzitivnost ispitivanih uzoraka .....	102
Slika 6.53. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku PB-27 (1.1-1.5 m) .....	103
Slika 6.54. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak PB-27 (1.1-1.5 m) .....	104
Slika 6.55. Grafička interpretacija rezultata određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ .....	105
Slika 6.56. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-23 (2.5-2.8 m).....	105

Slika 6.57. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)	106
Slika 6.58. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-41 (7.6-7.9 m)	107
Slika 6.59. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)	107
Slika 6.60. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku MB-25 (1.3-1.6 m)	108
Slika 6.61. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)	108
Slika 6.62. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku MB-13 (1.5-1.8 m)	109
Slika 6.63. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)	109
Slika 6.64. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku D-1 (2.0-2.2 m)	110
Slika 6.65. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak D-1 (2.0-2.2 m) ....	111
Slika 6.66. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku PB-27 (4.3-4.6m)	112
Slika 6.67. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)	112
Slika 6.68. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-41 (12.7-13.0 m)	113
Slika 6.69. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-41 (12.7-13.0 m)	113
Slika 6.70. Dijagram konverzije (prema uputstvu proizvođača CONTROLS Group)	114
Slika 6.71. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)	115
Slika 6.72. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)	116
Slika 6.73. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)	116
Slika 6.74. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)	117

Slika 6.75. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) .....	118
Slika 6.76. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak D-1 (2.0-2.2 m) .....	118
Slika 6.77. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) .....	119
Slika 6.78. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-41 (12.7-13 m) .....	120
Slika 6.79. Dijagram konverzije (Prema upustu CONTROLS Group – Geotester Model 16-T0161) .....	121
Slika 6.80. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m) .....	121
Slika 6.81. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-23 (2.5-2.8) .....	122
Slika 6.82. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m) .....	123
Slika 6.83. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) .....	124
Slika 6.84. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) .....	124
Slika 6.85. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak D-1 (2.0-2.2 m) .....	125
Slika 6.86. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) .....	126
Slika 6.87. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ od vlažnosti za uzorak ABo-41 (12.7-13 m) .....	127
Slika 6.88. Dijagram vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ za neporemećene i prerađene uzorke na prirodnoj vlažnosti .....	127
Slika 6.89. Senzitivnost dobijena jednoaksijalnim opitom, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom .....	128
Slika 6.90. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije ACPT-21, ACPT-22, ACPT-23 i ACPT-24 .....	129
Slika 6.91. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije ACPT-45 i ACPT-46 .....	130

Slika 6.92. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije MCPT-3 i MCPT-9 .....	131
Slika 7.1. Odnos penetracije konusa $h$ (mm) i vlažnosti $w$ (%) za konus $30^\circ/80g$ .....	134
Slika 7.2. Odnos penetracije konusa $h$ (mm) i vlažnosti $w$ (%) za konus $60^\circ/60g$ .....	135
Slika 7.3. Odnos koeficijenta $C_0$ i $\beta$ za oba tipa konusa a.) odvojeno b.) objedinjeno .....	136
Slika 7.4. Odnos koeficijenta $C_0$ i $\beta$ na velikoj bazi podataka (Shimobe i Spagnoli, 2020b – dopunjeno od Đurić, T.) .....	136
Slika 7.5. Odnos penetracije konusa $h$ (mm) i nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ (kPa) .....	137
Slika 7.6. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti $w$ za konus $30^\circ/80g$ .....	138
Slika 7.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti $w$ za konus $60^\circ/60g$ .....	139
Slika 7.8. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti $w$ za konus $60^\circ/80g$ , $30^\circ/100g$ i $30^\circ/400g$ .....	139
Slika 7.9. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i prirodne vlažnosti $w$ na neporemećenim i prerađenim uzorcima primenom metode padajućeg konusa .....	140
Slika 7.10. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće $c_{uu}$ od vlažnosti $w$ primenom jednoaksijalnog opita na neporemećenim i prerađenim uzorcima .....	140
Slika 7.11. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće $c_{uks}$ od vlažnosti $w$ primenom džepne krilne sonde .....	141
Slika 7.12. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_{uks}$ i prirodne vlažnosti $w$ primenom džepne krilne sonde .....	141
Slika 7.13. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće $c_{up}$ od vlažnosti $w$ primenom džepnog penetrometra .....	142
Slika 7.14. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće $c_{up}$ i prirodne vlažnosti $w$ primenom džepnog penetrometra .....	142
Slika 7.15. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i indeksa tečenja $I_L$ na a.) neporemećenim uzorcima b.) prerađenim uzorcima .....	143
Slika 7.16. Zavisnost granice plastičnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće a.) neporemećni uzorci, b.) prerađeni uzorci .....	145
Slika 7.17. Razlika merenih i korigovanih nedreniranih smičućih čvrstoća primenom korekcionog faktora $\mu$ .....	146
Slika 7.18. Normalizovana nedrenirana smičuća čvrstoća u funkciji od indeksa plastičnosti .....	146

Slika 7.19. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i aktivnosti glina.....	147
Slika 8.1. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode a.) korišćenjem konusa 30°/80g i b.) konusa 60°/60g .....	149
Slika 8.2. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće - $c_u$ i odnosa sadržaja vode - WCR a.) merenja pomoću džepne krilne sonde, b.) merenja pomoću džepnim penetrometrom .....	150
Slika 8.3. Regresioni model za indeks plastičnosti $I_p$ .....	152
Slika 8.4. Regresioni model za stepen prekonsolidacije OCR.....	152
Slika 8.5. Regresioni model za zapreminsku težinu $\gamma$ .....	153
Slika 8.6. Poređenje izmerenih i sračunatih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće.....	155
Slika 8.7. Primena empirijskog SHANSEP modela na CPT podatke.....	156
Slika 8.8. Primena empirijskog SHANSEP modela na podatke dobijene opitom jednoaksijalne kompresije, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom .....	156
Slika 8.9. Kombinovana analiza .....	157
Slika 8.10. Integracija novog modela u postojeće (Amin i sar., 1992 – dopunjeno od Đurić., T.) .	158
Slika 9.1. Odnos vlažnosti i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće .....	159
Slika 9.2. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće tla i vlažnosti .....	160
Slika 9.3. Normalizovani odnos nedrenirane smičuće čvrstoće tla i vlažnosti.....	161
Slika 9.4. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena metodom padajućeg konusa i računski na osnovu predloženih jednačina .....	162
Slika 9.5. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće $c_u$ i vlažnosti $w$ na osnovu različitih opita ispitivanja.....	163
Slika 9.6. Poređenje metoda na osnovu normalizovanih parametara .....	164
Slika 9.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena opitima i računski na osnovu dobijenih jednačina .....	165
Slika 9.8. Primena različitih empirijskih modela.....	168
Slika 9.9. Grupni dijagram odnosa nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja .....	169
Slika 9.10. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja (Shimobe i Spagnoli, 2020a – dopunjeno od Đurić., T.).....	169

Slika 9.11. Korišćenje logaritamskog indeksa tečenja (Koumotu i Houlsby, 2001– dopunjeno od Đurić, T.).....	170
Slika 9.12. Korišćenje logaritamskog indeksa tečenja i logaritamske nedrenirane smičuće čvrstoće (Vardanega i Haigh, 2014 – dopunjeno od Đurić, T.) .....	170
Slika 9.13. Primena različitih empirijskih modela.....	172
Slika 10.1. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini za različite metode .....	173
Slika 10.2. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene jednoaksijalnim opitom i drugim opitima.....	174
Slika 10.3. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene padajućim konusom i opitom džepnog penetrometra .....	175
Slika 10.4. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene padajućim konusom i opitom džepne krilne sonde.....	176
Slika 10.5. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom .....	176
Slika 10.6. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini za različite metode sa korekcijom vrednosti dobijenih metodom padajućeg konusa .....	177

## SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Referentne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće .....	9
Tabela 2.2. Prikaz različitih modela za definisanje nedrenirane čvrstoće smicanja u zavisnosti od vlažnosti .....	14
Tabela 2.3. Prikaz brojnih modela nedrenirane smičuće čvrstoće tla u zavisnosti od indeksa tečenja .....	21
Tabela 2.4. Prikaz različitih modela računanja nedrenirane čvrstoće smicanja.....	24
Tabela 5.1. Tipovi konusa za određivanje granice tečenja .....	41
Tabela 5.2. Vrednosti indeksa plastičnosti za različite vrste tla .....	41
Tabela 5.3. Klasifikacija (vrsta) minerala prema aktivnosti (Janbu, 1989) .....	42
Tabela 5.4. Vrednosti indeksa konzistencije (Terzaghi, 1925).....	43
Tabela 5.5. Klasifikacija tla na osnovu indeksa tečenja (Casagrande,1932) .....	43
Tabela 5.6. Skempton i Northey (1952) klasifikacija .....	44
Tabela 5.7. Vrste konusa prema standardu SRPS EN ISO 17892-6.....	50
Tabela 5.8. Usvojene vrednosti konstante c.....	52
Tabela 5.9. Relevantne vrednosti za konstante M i N za metodu koja koristi konus 60°/60g (Karlsson, 1961) .....	53
Tabela 5.10. Odnos jednoaksijalne čvrstoće i konzistencije tla.....	56
Tabela 5.11. Primena različitih vrhova penetrometra .....	57
Tabela 5.12. Dimenzije nastavka i vrednosti koeficijenta koji se koristi prilikom ispitivanja (Myslinska, 2006) .....	58
Tabela 5.13. Prikaz vrednosti faktora $N_k$ i $N_{kt}$ .....	62
Tabela 5.14. Kvalitet modela na osnovu koeficijenta determinacije (Hair i sar., 2010). .....	67
Tabela 6.1. Osnovne identifikaciono-klasifikacione karakteristike tla.....	77
Tabela 6.2. Prikaz rezultata dobijenih iz edometarskog opita.....	83
Tabela 6.3. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za PB-27 (1.1–1.5 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	86

Tabela 6.4. Postupak definisanja nedrenirane smičuće čvrstoće kod uzorka PB-27 (1.1–1.5 m) .....	86
Tabela 6.5. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-23 (2.5-2.8 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	88
Tabela 6.6. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-41 (7.6-7.9 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	90
Tabela 6.7. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za MB-25 (1.3-1.6 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	92
Tabela 6.8. Postupak definisanja nedrenirane smičuće čvrstoće kod uzorka MB-25 (1.3-1.6 m).....	92
Tabela 6.9. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za MB-13 (1.5-1.8 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	94
Tabela 6.10. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za D-1 (2.0-2.2 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	96
Tabela 6.11. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za PB-27 (4.3-4.6 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	98
Tabela 6.12. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-41(12.7-13 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti .....	100
Tabela 6.13. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m).....	104
Tabela 6.14. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) .....	106
Tabela 6.15. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m) .....	107
Tabela 6.16. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) .....	109
Tabela 6.17. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) .....	110
Tabela 6.18. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak D-1 (2.0-2.2 m).....	111
Tabela 6.19. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m).....	112
Tabela 6.20. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-41 (12.7-13.0 m) ...	114
Tabela 6.21. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m) .....	115
Tabela 6.22. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) .....	116
Tabela 6.23. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m) .....	117

Tabela 6.24. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) .....	117
Tabela 6.25. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) .....	118
Tabela 6.26. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak D-1 (2.0-2.2 m) .....	119
Tabela 6.27. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) .....	119
Tabela 6.28. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (12.7-13 m) .....	120
Tabela 6.29. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m) .....	122
Tabela 6.30. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) .....	122
Tabela 6.31. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41(7.6-7.9 m) .....	123
Tabela 6.32. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) .....	124
Tabela 6.33. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) .....	125
Tabela 6.34. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak D-1 (2.0-2.2 m) .....	125
Tabela 6.35. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) .....	126
Tabela 6.36. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (12.7-13 m) .....	126
Tabela 7.1. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije između parametara tla i nedrenirane smičuće čvrstoće za različite opite na neporemećenim uzorcima .....	133
Tabela 7.2. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije između parametara tla i nedrenirane smičuće čvrstoće za različite opite na prerađenim uzorcima .....	133
Tabela 7.3. Vrednosti koeficijenta $C_0$ i $\beta$ za sve uzorke za dva osnovna konusa $30^\circ/80g$ i $60^\circ/60g$ .....	135
Tabela 7.4. Empirijske korelacije koje se koriste za računanje nedrenirane smičuće čvrstoće .....	143

Tabela 7.5. Parametri i koeficijent determinacije za svaki opit koji se koristio za dobijanje nedrenirane smičuće čvrstoće .....	144
Tabela 8.1. Rezultati linearne regresije unutar uzorka za opit padajućeg konusa .....	148
Tabela 8.2. Rezultati linearne regresije unutar uzorka za opit džepne krilne sonde i džepnog penetrometra .....	149
Tabela 8.3. Zbirni prikaz višestruke linearne regresije.....	151
Tabela 9.1. Statističke greške za konus 30°/80g i 60°/60g.....	162
Tabela 9.2. Statističke greške za konus 30°/80g i 60°/60g.....	165
Tabela 9.3. Baza podataka korišćena za proveru empirijskih modela.....	166
Tabela 9.4. Empirijske korelacije .....	167
Tabela 9.5. Empirijske korelacije .....	171
Tabela 10.1. Pregledna tabela vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijenih različitim metodama .....	178

# 1. UVOD

Izvođenje istražnih radova u geotehnici predstavlja skup kompleksnih i složenih terenskih i laboratorijskih metoda ispitivanja koje se namenski izvode na lokacijama projektovanih građevinskih konstrukcija. Poznavanje određenih geoloških činilaca kao što su litološki sastav terena, geološka starost, identifikaciono-klasifikaciona svojstva i fizičko-mehaničke osobine, omogućava rešavanje različitih problema u geotehnici. Tlo se sastoji od minerala različitog hemijskog sastava, oblika i veličine i kao takvo najčešće predstavlja podlogu različitim vrstama objekata ili služi kao građevinski materijal. Zbog toga je ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika tla ujedno i jedan od osnovnih i glavnih zadataka inženjera geotehnike.

Samo tlo predstavlja jedan složeni dvofazni ili trofazni sistem čije su komponente čvrste čestice, voda i gas. Čvrste čestice izgrađuju skelet, dok su pore ispunjene vazduhom (gasovita faza) ili vodom (tečna faza). Kada se razmatra interakcija čvrstih čestica i vode u tlu u obzir se uzimaju brojni faktori kao što su zavisnost čvrstoće tla od brzine opterećenja, pritiska tla na konstrukciju u funkciji od vremena, poremećenost uzoraka tla prilikom uzorkovanja i sl. Ovi efekti su u direktnoj vezi sa čvrstim česticama i vodom u porama. Ukoliko se opterećenje na tlo nanese vremenski brzo tako da nema dreniranja vode kažemo da nastupa nedrenirano stanje tla gde se promene dešavaju pri konstantnoj zapremini i promeni pornog pritiska koji zavisi od prirode tla i putanje napona.

Drenirani i nedrenirani uslovi u mehanici tla odnose se na vreme koje je potrebno da se voda izdrenira iz pora tla, nakon promene naponskog stanja u terenu. U zavisnosti od toga da li u tlu dolazi do promene pornog pritiska, usled nanošenja opterećenja, uslovi su drenirani ili nedrenirani (Hadži-Niković, 2020). Razlika između dreniranih i nedreniranih uslova u mehanici tla direktno je povezana sa vremenom potrebnim za disipaciju pornog pritiska nakon promene naponskog stanja. Ovi uslovi su ključni za pravilnu interpretaciju laboratorijskih rezultata. Drenirani uslovi nastaju kada brzina nanošenja opterećenja dozvoljava slobodno kretanje vode kroz pore tla. U ovom režimu, nanošenje opterećenja ne dovodi do promene pornog pritiska. Nedrenirani uslovi karakterišu se nemogućnošću trenutne filtracije vode iz pora tla tokom promene opterećenja, što rezultuje porastom pornih pritisaka jer voda ne može slobodno da se kreće kroz skelet tla.

Nedrenirani uslovi su karakteristični za sitnozrna tla, naročito gline. Kod zasićenih glina, nedrenirana smičuća čvrstoća ne zavisi samo od normalnih napona nego i od istorije opterećenja i stepena prekonsolidacije. Mnogi drugi faktori kao što su: minerali glina, struktura, anizotropija, ispucalost, isušivanje tokom smicanja, vlažnost, brzina opterećenja, kompresija uzoraka tokom ispitivanja i drugi utiču na nedreniranu smičuću čvrstoću. Fizičko ponašanje sitnozrnog tla u prvom redu zavisi od prisustva različitih minerala glinovite frakcije, njihovog oblika i orijentacije minerala. Anizotropija je bitna prilikom laboratorijskih ispitivanja, jer uvažavanjem orijentacije uzorka tj. postizanjem idealne orijentacije uzorka dobijaju se realne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Anizotropija je više naglašena kod materijala niske plastičnosti. Kada govorimo o glinovitom tlu i određivanju nedrenirane čvrstoće smicanja bitno je uočiti razliku u mehaničkom ponašanju normalno konsolidovanih i prekonsolidovanih glina. Tlo je normalno konsolidovano ako od svog nastanka u prošlosti do vremena kada ga posmatramo nije bilo izloženo većem vertikalnom naponu od trenutnog, a prekonsolidovano ako je u svojoj prošlosti bilo opterećeno vertikalnim efektivnim naponom, koji je veći od stvarne veličine vertikalnog efektivnog napona - naponom prekonsolidacije. Normalno konsolidovane gline imaju manju nedreniranu čvrstoću smicanja od prekonsolidovanih glina.

## 1.1. Predmet i cilj istraživanja

Osnovni predmet ove disertacije je određivanje i procena nedrenirane smičuće čvrstoće normalno konsolidovanog i slabo prekonsolidovanog sitnozrnog tla šireg Beogradskog područja. U okviru disertacije nedrenirana smičuća čvrstoća se analizira različitim laboratorijskim metodama: jednoaksijalni opit (opit jednoaksijalne kompresije), opit padajućeg konusa, opiti džepne krilne sonde i džepnog penetrometra, kao i terenskim statičkim penetracionim opitom (CPT). U važećoj standardizaciji u Republici Srbiji, laboratorijski jednoaksijalni opit i opit padajućeg konusa imaju definisane SRPS EN ISO standarde koji omogućavaju određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće tla, dok se džepna krilna sonda i džepni penetrometar koriste isključivo kao orijentacione laboratorijske i terenske metode bez posebnog standardnog okvira. Statički penetracioni opit (CPT) je standardizovan u pogledu izvođenja ispitivanja, pri čemu se procena nedrenirane smičuće čvrstoće zasniva na empirijskim korelacijama i interpretacionim postupcima iz literature.

Cilj doktorske disertacije predstavlja prikaz korišćenja prethodno navedenih metoda za određivanje nedrenirane čvrstoće, kao i uslove koje je potrebno zadovoljiti za analizu dobijenih rezultata (tačnost, upoređivanje). Uz to, dat je poseban osvrt na prednosti i nedostatke korišćenih metoda sa naglašenim razmatranjem jednostavnosti njihove primene.

U svetskoj literaturi postoji veliki broj korelacija koje su predložene za nedreniranu čvrstoću smicanja, na osnovu rezultata dobijenih različitim laboratorijskim metodama ispitivanja na neporemećenim ili prerađenim uzorcima (uzorci kojima je promenjena prirodna struktura). Da bi se odredile donje granice nedrenirane čvrstoće smicanja često se vrše empirijske korelacije u zavisnosti od drugih fizičko-mehaničkih parametara. Na osnovu rezultata Skempton i Northey (1952), Wroth i Wood (1978), Sharma i Sridharan (2018), došlo se do određenih relacija da je smičuća čvrstoća na granici plastičnosti sto puta veća nego čvrstoća na granici tečenja. Skempton (1957) je izveo korelaciju za normalno konsolidovane gline, koja ukazuje na to da nedrenirana čvrstoća smicanja raste sa porastom indeksa plastičnosti. Relacije sa indeksom plastičnosti analizirali su i drugi istraživači kao što su Schofield i Wroth (1968), Wood (1990), Edil i Benson (2009). Mesri (1975) je predložio da veza između nedrenirane čvrstoće smicanja i vertikalnog napona bude konstantna, što je ujedno i novije istraživanje D'Ignazio i sar. (2016). Sharma i Bora (2003), O'Kelly (2013), Shimobe i Spagnoli (2020a,2020b), Vardanega i Gan (2023) su predložili zavisnost sa promenom vlažnosti kada je u pitanju ispitivanje prerađenih uzoraka tla. Sve ove korelacije urađene su na osnovu izvedenih laboratorijskih istraživanja ali i na osnovu velike baze prikupljenih podataka širom sveta.

U ovoj doktorskoj disertaciji korišćeni su direktni i indirektni pristupi, što ima za cilj razvijanje novih korelacija i povezanosti nedrenirane čvrstoće smicanja sa različitim svojstvima tla kao što su: vlažnost, granica tečenja, indeks plastičnosti, indeks tečenja, i dr. Na osnovu statističke analize, regresionih modela, ograničenja, pretpostavki i praktičnih razmatranja nedrenirane smičuće čvrstoće uspostavljene su i razvijene nove zavisnosti i novi modeli.

U okviru ove disertacije izvršena je nadogradnja dosadašnjih opštih saznanja o svojstvima sitnozrnog tla sa aspekta nedrenirane smičuće čvrstoće. Poređenjem laboratorijskih ispitivanja prikazane su prednosti i mane navedenih i na različite načine primenjenih opita, s posebnim osvrtom na opit padajućeg konusa kao i realizacije njegove primene u određivanju nedrenirane čvrstoće sitnozrnog tla. Osnovni razlog za to leži u našoj naučnoj i stručnoj praksi. Ovaj opit do sada nije primenjivan bez obzira što se radi o standardnom postupku koji je detaljno opisan u SRPS EN ISO17892-6 (Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 6: Ispitivanje padajućim konusom).

## 1.2. Polazne hipoteze

Nedrenirani uslovi su bitni za ponašanje sitnozrnog tla kod kojih je koeficijent vodopropustljivosti mali tako da prilikom nanošenja opterećenja ne dolazi do značajnog istiskivanja vode iz pora. Stoga veličina nedrenirane smičuće čvrstoće zavisi od veličine pornog pritiska koji nastaje pri nedreniranim uslovima. Kada su u pitanju zasićene gline nedrenirana čvrstoća smicanja je nezavisna od normalnog napona, ali zavisi od prethodne istorije opterećenja, stepena prekonsolidacije, vlažnosti i strukture glina tj. njenog mineralnog sastava i orijentacije mineralnog skeleta. Nedrenirana smičuća čvrstoća se primenjuje za analizu privremene stabilnosti tla, kod fundiranja objekata na zasićenom tlu i dr. Da bi se definisala u laboratorijskim uslovima najčešće se koriste triaksijalni i jednoaksijalni opiti, opiti padajućeg konusa, kao i opit džepne krilne sonde i džepnog penetrometra, a takođe se može definisati i na osnovu terenskih „in situ“ opita (opita statičke penetracije-CPT, CPT-u, standardne penetracije-SPT, dilatometra-DMT i terenske krilne sonde).

Na osnovu izloženog, polazne hipoteze disertacije su bile:

- Nedrenirana čvrstoća tla zavisi od brzine deformacija i vremena opterećivanja uzorka.
- Nedrenirana čvrstoća tla može se definisati na neporemećenim i na prerađenim uzorcima tla.
- Nedrenirana čvrstoća tla je direktno zavisna od konzistencije i prirodne vlažnosti ispitivanih materijala.
- Prirodna vlažnost ispitivanih uzoraka ima uticaj na nedreniranu čvrstoću smicanja.
- Stepen prekonsolidacije OCR je bitan faktor za definisanje naponskih stanja i ponašanje zasićenog sitnozrnog tla, za normalno konsolidovano tlo stepen prekonsolidacije OCR je manji od 1.5 dok je za slabo prekonsolidovano tlo između 1.5-4.
- Opit padajućeg konusa omogućava jednostavnu i brzu procenu nedrenirane smičuće čvrstoće sitnozrnog tla pri različitim vlažnostima.
- Terenski opiti omogućavaju dobijanje podataka na licu mesta korišćenjem različitih empirijskih formula.
- Analitičkim i regresionim metodama ispituje se zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće od osnovnih fizičkih i indeksnih parametara tla.

## 1.3. Metode istraživanja

Uzimajući u obzir temu disertacije, akcenat se stavlja na rezultate istraživanja koji su sprovedeni u okviru ovog rada, korišćenjem različitih metoda. Imajući u vidu prethodno izložene ciljeve i zadatke istraživanja, u doktorskoj disertaciji se primenjuju različite teorijske analize koje se koriste u geotehničkom modeliranju. Primenjene su sledeće naučne metode istraživanja:

- Metoda teorijske analize koja bi se odnosila na proučavanje dosadašnjih teorijskih saznanja i najnovijih rezultata vezanih za predmet disertacije.
- Metode prikupljanja, obrade i analize podataka dobijenih laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.
- Metode za definisanje naponsko-deformacijskog ponašanja tla uključujući laboratorijske postupke za definisanje stepena prekonsolidacije (OCR).
- Metoda korišćenja laboratorijske opreme za izvođenje identifikaciono-klasifikacionih opita, opita padajućeg konusa, jednoaksijalnog opita, džepne krilne sonde i džepnog penetrometra.

- Metode interpretacije laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa statističkom obradom podataka koja omogućava preciznije usvajanje odgovarajućih parametara radi definisanja karakterističnih geotehničkih modela.
- Metoda poređenja i definisanja korelacionih zavisnosti između dobijenih parametara određenih iz laboratorijskih opita kao i nekih terenskih opita.
- Metoda verifikacije dobijenih rezultata zasnovana na komparativnoj analizi sa već poznatim podacima objavljenim u svetskoj literaturi, primenom različitih statističkih metoda radi upoređivanja rezultata laboratorijskih ispitivanja.

## 1.4. Organizacija doktorske disertacije

Doktorska disertacija je podeljena u deset poglavlja. Kratak sadržaj svakog poglavlja dat je u nastavku teksta:

Poglavljje 1 prikazuje uvodna razmatranja vezana za nedreniranu smičuću čvrstoću tla. Definisan je osnovna problematika istraživanja i formirani su glavni ciljevi doktorske disertacije. Istaknute su polazne hipoteze koje su testirane kroz laboratorijska ispitivanja, uz opis metodologije istraživanja, kao i organizacije i strukture disertacije.

Poglavljje 2 daje detaljan pregled literature i teorijskih osnova vezanih za nedreniranu smičuću čvrstoću. Prikazane su osnovne definicije i značaj nedrenirane smičuće čvrstoće u geotehnici. Analizirani su postojeći literaturni podaci o metodama određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće, uključujući korelacije u funkciji od napona, sadržaja vode, indeksa tečenja i drugih relevantnih fizičko-mehaničkih parametara tla, što omogućava uvid u postojeće empirijske i teorijske pristupe i osnove za dalja istraživanja.

Poglavljje 3 detaljno opisuje strukturu i mineralni sastav tla. Analizira se fizička struktura tla, raspodela čestica različite granulacije, kao i mineralni sastav, što omogućava razumevanje osnovnih karakteristika tla i njihovog uticaja na mehaničko ponašanje i nedreniranu smičuću čvrstoću.

Poglavljje 4 prikazuje istoriju opterećenja tla i određivanje stepena prekonsolidacije (OCR), kao i napona prekonsolidacije ( $\sigma_p'$ ). Ovi parametri definišu vrstu ispitivanog tla tj. da li je ono normalno konsolidovano ili slabo prekonsolidovano.

Poglavljje 5 detaljno opisuje korišćene metode istraživanja i program ispitivanja. Laboratorijska ispitivanja obuhvataju određivanje osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika tla, uključujući granulometrijski sastav, zapreminsku masu, vlažnost, Atterbergove granice, senzitivnost i parametre stišljivosti i konsolidacije dobijene edometarskim opitom. Posebna pažnja posvećena je metodama određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće, uključujući opit padajućeg konusa, jednoaksijalnu kompresiju, džepnu krilnu sondu i džepni penetrometar, kao i terenska ispitivanja. Poglavlje takođe opisuje korišćene statističke metode obrade rezultata, uključujući koeficijent determinacije ( $R^2$ ), srednju kvadratnu grešku (RMSE), srednju apsolutnu grešku (MAE), srednju apsolutnu procentualnu grešku (MAPE), Pirsonov koeficijent, prediktivne modele, što omogućava kvantitativnu i kvalitetnu analizu i poređenje metoda.

Poglavljje 6 se fokusira na diskusiju i tumačenje dobijenih rezultata, prikazujući opite pojedinačno i upoređujući vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke tla.

Poglavlje 7 prikazuje razvoj empirijskih i korelacionih modela koji povezuju nedreniranu smičuću čvrstoću sa relevantnim parametrima tla. U okviru poglavlja primenjen je Pirsonov koeficijent korelacije radi utvrđivanja jačine i smera zavisnosti između posmatranih promenljivih. Razmatraju se trendovi, odstupanja i zavisnost rezultata u kontekstu fizičko-mehaničkih karakteristika tla i prethodno definisanih hipoteza.

Poglavlje 8 obuhvata razvoj prediktivnih modela za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće na osnovu izabranih parametara tla i rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Analiza obuhvata primenu jednostavne i višestruke linearne regresije, kao i razmatranje uticaja parametara dobijenih iz CPT opita. Pored toga, razmatra se i primena SHANSEP modela u cilju procene nedrenirane smičuće čvrstoće.

Poglavlje 9 je posvećeno verifikaciji modela sa rezultatima iz svetske literature. Urađena je statistička obrada podataka kao i poređenje rezultata različitih metoda, čime se potvrđuje pouzdanost i praktična primenljivost dobijenih zavisnosti.

Poglavlje 10 predstavlja završno poglavlje doktorske disertacije gde su sumirani zaključci, daju se preporuke za primenu rezultata u geotehničkoj praksi i predlažu pravci budućih istraživanja koji mogu dodatno unaprediti razumevanje i primenu nedrenirane smičuće čvrstoće.

Doktorska disertacija se završava literaturom koja obuhvata naučne radove, standarde i publikacije iz oblasti geotehnike, inženjerske geologije, građevine i drugih prirodno-matematičkih nauka koje su korišćene pri izradi doktorske disertacije, jednim dodatkom i kraćom biografijom autora.

## 2. PREGLED LITERATURE I TEORIJSKIH OSNOVA NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE

### 2.1. Opšte o nedreniranoj smičućoj čvrstoći

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla predstavlja stanje u sitnozrnom tlu kod koga je vodopropusnost mala pa se deformacije odvijaju pri konstantnoj zapremini. Drugim rečima, to je maksimalni smičući napon koje tlo može da izdrži u uslovima kada voda u porama ne može da se izdrenira u toku trajanja opterećenja. Ta voda koja je zarobljena u porama ne može da izađe iz uzorka i dovodi do povećanja pritiska vode u porama. Ovakvo stanje je karakteristično za sitnozrne materijale, posebno kod glina kada je izgradnja nekog objekta trenutna i brza. Takođe, nedrenirana smičuća čvrstoća tla je bitna kod zemljotresa i privremenih opterećenja. Kada govorimo o kosinama i uslovima u kojima se one nalaze, nije uvek jednostavno odrediti da li će kosina pre doživeti nestabilnost u dreniranom ili nedreniranom stanju. Prilikom formiranja kosine njeno početno stanje je u nedreniranim uslovima, ali nakon određenog perioda mirovanja ona se nađe u dreniranom stanju. Iz ovih razloga neophodno je proveriti oba slučaja i na taj način neposredno utvrditi koji je slučaj kritičniji. Za normalno konsolidovana tla, u fazama tokom i neposredno nakon izgradnje, kritično je nedrenirano stanje. Nasuprot tome, kod prekonsolidovanih tla pri dugotrajnom opterećenju kritično postaje drenirano stanje. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla se na osnovu Mohr-Coulombovog zakona može izraziti na sledeći način:

$$\tau_{fn} = c_u + \sigma_n \tan \varphi_u = c_u \quad (2.1)$$

Gde je:

$\tau_{fn}$  – napon smicanja koji predstavlja nedreniranu smičuću čvrstoću,

$c_u$  – nedrenirana kohezija,

$\varphi_u = 0$  – nedrenirani ugao unutrašnjeg trenja,

$\sigma_n$  – normalni napon.

Kod normalno konsolidovanog tla, nedrenirana smičuća čvrstoća je manja u odnosu na dreniranu čvrstoću smicanja i zavisi od veličine generisanog pornog pritiska. To znači da je kritično vreme kod sitnozrnog tla odmah nakon nanošenja opterećenja, a vremenom se porni pritisak smanjuje usled dreniranja vode i čvrstoća smicanja se povećava. Tako da svaka promena ukupnog napona u nedreniranim uslovima izaziva istu promenu pornog pritiska. Ugao unutrašnjeg trenja u nedreniranim uslovima je jednak nuli.

Kod mekog, normalno konsolidovanog i slabo prekonsolidovanog tla, kada se opterećenje nanese brzo, voda u porama preuzima celokupno opterećenje jer skelet tla nije u stanju da primi dodatni napon. Povećanje normalnog napona ( $\sigma_n$ ) tada je jednako povećanju pornog pritiska ( $u$ ), pa ne dolazi do promene efektivnih napona niti do povećanja smičuće čvrstoće. Zbog toga je nedrenirana čvrstoća smicanja zasićenog, sitnozrnog, normalno konsolidovanog tla konstantna, pod uslovom da nema promene napona, stepena prekonsolidacije (OCR) i da je putanja napona tokom smicanja ista sve do loma tla. Upravo zbog toga definisanje smičuće čvrstoće tla predstavlja složeniji problem nego što se često pretpostavlja (Ladd, 1991). Tokom nedreniranih uslova dešava se proces koji se može objasniti

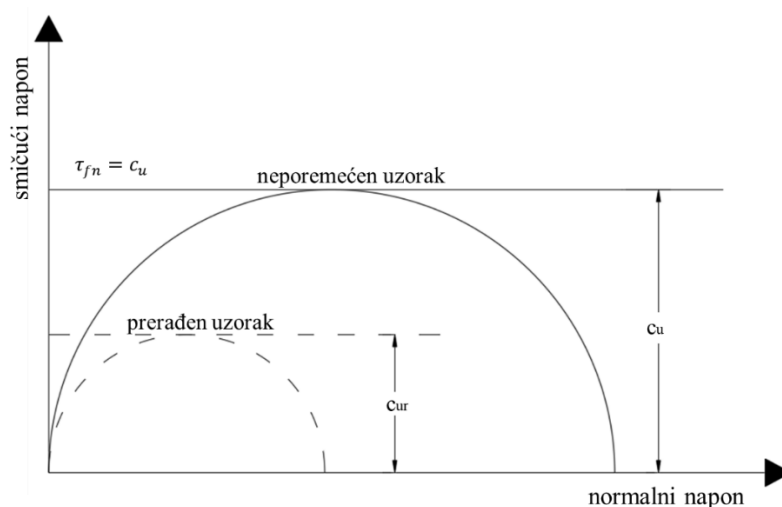
kroz efektivno naprezanje. Kao posledica sporog istiskivanja vode iz tla dolazi do povećanja pornog pritiska, pa je efektivni napon, prema Terzagiju (1940) definisan jednačinom 2.2.

$$\sigma' = \sigma_n - u \quad (2.2)$$

Gde je:

- $\sigma'$  – efektivni normalni napon,
- $u$  – porni pritisak i
- $\sigma_n$  – ukupni normalni napon.

Nedrenirana smičuća čvrstoća se može određivati na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla, što će biti prikazano i u ovoj disertaciji. Ilustracija ovakvog ponašanja tla prikazana je na Slici 2.1.



Slika 2.1. Ilustracija nedrenirane smičuće čvrstoće Mohr-Coulombovom anvelopom loma

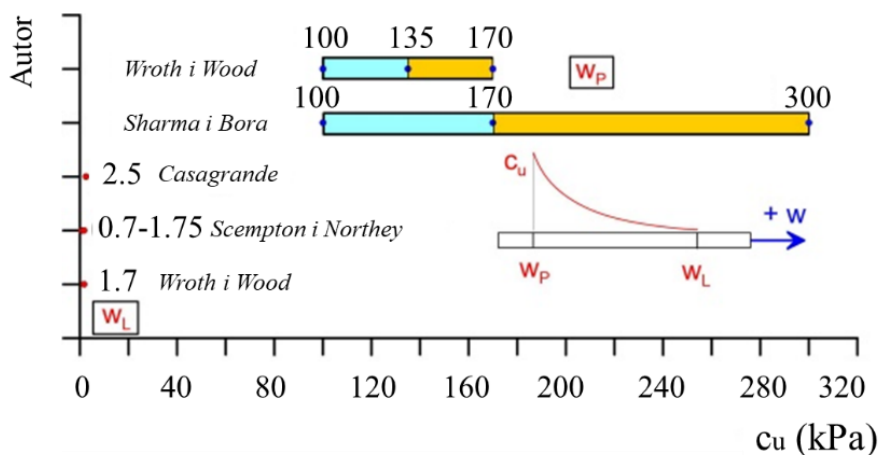
Nedrenirana smičuća čvrstoća zavisi od mnogo faktora:

- Mineralnog sastava i strukture tla,
- Napona prekonsolidacije i stepena opterećenja,
- Sadržaja vode u tlu,
- Dubine uzimanja uzorka,
- Osetljivosti tla,
- Kvaliteta uzorka i vrsta ispitivanja.

Gline se u prirodi uglavnom nalaze u čvrstom ili plastičnom stanju konzistencije i kao takve poseduju izvesnu nedreniranu smičuću čvrstoću. Kada se sadržaj vode približi granici tečenja, glina prelazi iz plastične u tečnu konzistenciju. Nedrenirana čvrstoća gline u tečnom stanju je veoma mala, što ukazuje da promene u sadržaju vode direktno utiču na njenu čvrstoću. Ovo naglašava da postoji zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće i sadržaja vode, definisane granicama konzistencije. U tom pogledu, metoda padajućeg konusa je jedan od najprikkladnijih opita jer služi za određivanje ne samo ovih granica, već i nedrenirane smičuće čvrstoće tla (Đurić i sar., 2025).

Mnogi istraživači su analizirali nedreniranu smičuću čvrstoću u funkciji od vlažnosti. Oni su zaključili da granica tečenja predstavlja karakterističnu vlažnost sitnozrnog tla. U mnogim radovima

pa čak i studijama pokazano je da nedrenirana smičuća čvrstoća sitnozrnog tla na granici tečenja pada u uskom opsegu od približno 1.3 do 2.8 kPa (Hansbo, 1957; Koumoto i Houlsby, 2001; Sharma i Bora, 2003; Karakan, 2023). Među prvima je ova istraživanja sproveo Casagrande (1939) i zaključio da sitnozrni materijali koji su na granici tečenja imaju nedreniranu čvrstoću smicanja od oko 2.5 kPa. Kasniji istraživači potvrdili su postojanje znatnog raspona vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće od 0.48 do 4 kPa (Sridharan i Prakash, 1998; Youssef i sar., 1965). Skempton i Northey (1952) su na osnovu 4 uzorka sa različitim vrednostima indeksa plastičnosti pokazali da je nedrenirana čvrstoća u rasponu od 0.7 – 1.75 kPa, dok su Wroth i Wood (1978) predložili prosečnu vrednost od  $c_u = 1.7$  kPa na granici tečenja i pretpostavili da je nedrenirana čvrstoća na granici plastičnosti približno 100 puta veća od one na granici tečenja. Sharma i Bora (2003) zaključuju da je nedrenirana čvrstoća na granici plastičnosti u rasponu od 100 do 300 kPa sa prosečnom vrednošću od 170 kPa (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Šematski prikaz nedrenirane čvrstoće prema teorijskim osnovama

Jedna grupa naučnika (Belviso i sar., 1985; Lee, 2004; Sharma i Bora, 2003; Sharma i Sridharan, 2018; Shimobe i Spagnoli, 2020; Karakan, 2023) je saglasna sa tim da je nedrenirana čvrstoća na granici plastičnosti 100 puta veća nego na granici tečenja. Primenom metode obrnute ekstruzije, Kayabali i Tufenkci (2010) su pokazali da prosečne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenih zasićenih glina iznose približno 2.3 kPa na granici tečenja i oko 180 kPa na granici plastičnosti, pri čemu su dobijeni rezultati u dobroj saglasnosti sa ranijim istraživanjima.

Ipak, neki autori osporavaju postojanje jedinstvenog odnosa nedrenirane smičuće čvrstoće na karakterističnim vlažnostima tla  $w_L - w_P$ . O'Kelly (2013) i Nagaraj i sar. (2012) ističu da se nedrenirana čvrstoća smicanja  $c_u$  na granici tečenja  $w_L$  može kretati od 0.2 do 12 kPa, a na granici plastičnosti  $w_P$  od 35 do 600 kPa. Prema tim istraživanjima, razlike potiču od aktivnosti glinenih minerala u tlu naročito kada se govori o kaolinitnim i montmorilonitnim glinama. Kod montmorilonitnih glina odnos može biti blizu 100, dok je kod tla sa prisustvom kaolinitnih minerala oko 30 (Wood, 1990). Vinod i sar. (2012) su dobili srednju vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od 5.8 kPa na granici tečenja, što je visoka vrednost u poređenju sa onim dobijenim iz literature, dok su za srednju vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće na granici plastičnosti dobili vrednost od 186 kPa. Hutabarat i Widjaja (2020) su za glinovite materijale dobili srednju vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od 2.67 kPa (sa vrednostima od 0.37 do 19.19 kPa) na granici tečenja i srednjom vrednošću od  $c_u = 165.83$  kPa na granici plastičnosti (opseg vrednosti je od 55 do 500 kPa). Za prašinate materijale srednja vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  je 2.60 kPa (sa vrednostima od 0.65 do 10.44 kPa) na granici tečenja i srednjom vrednošću od 48.99 kPa na granici plastičnosti (sa vrednostima od 16 do 150 kPa). Nedrenirana smičuća čvrstoća na granicama konzistencije zavisi od prirode samog tla tj. mineraloškog sastava, sadržaja vode i strukture tla kao i od metode koja se

koristi za njeno određivanje. U tabeli 2.1 izdvojene su tipične vrednosti za nedreniranu smičuću čvrstoću na granici tečenja i na granici plastičnosti koje su predlagali različiti autori.

Tabela 2.1. Referentne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće

Autor	Opseg $c_u$ (kPa)	Uslov	$w_L$	$w_P$	Napomena
Casagrande (1932)	$\approx 2.5$	$w_L$	-	-	Tipična referentna vrednost $c_u$
Skempton i Northey (1952)	0.7 – 1.75 (0.42-143.25)	$w_L$	30-97	16-32	Vrednosti zavise od indeksa plastičnosti (krilna sonda)
Hansbo (1957)	1.5 – 2.0	$w_L$	-	-	Srednja vrednost 1.75 kPa (padajući konus)
Norman (1958)	0.8 – 1.6	$w_L$	41-72	-	Srednja vrednost 1.2 kPa (krilna sonda)
Youssef i sar. (1965)	1.3 – 2.4	$w_L$	-	-	Srednja vrednost 1.7 kPa (krilna sonda)
Wroth i Wood (1978)	1.7/170	$w_L/w_P$	26-190	-	Minimalne vrednosti
Whyte (1982)	1.6	$w_L$	-	-	Poremećeni uzorci tla
Houlsby (1982)	2.75 – 5.24	$w_L$	-	-	Srednja vrednost 3.9 kPa
Leroueil i sar.(1983)	1.6	$w_L$	-	-	(padajući konus i krilna sonda)
Wasti i Bezirci (1986)	0.8-4.8/35-600	$w_L/w_P$	27-526	-	Srednja vrednost 2.2/315 kPa (krilna sonda)
Medhat i Whyte (1986)	1.6/110	$w_L/w_P$	-	-	Uzete su srednje vrednosti
Sridharan and Prakash (1998)	0.66 – 1.35	$w_L$	30-101	18-52	Srednja vrednost 1 kPa
Koumoto i Houlsby (2001)	1.38 0.61-130.3	$w_L$	30-318	16-54	Konus tipa 60°60g (h=11.5mm)
Sharma i Bora (2003)	1.7/170 0.36-246	$w_L/w_P$	38-67	14-33	Uzete su srednje vrednosti (krilna sonda)
SRPS EN ISO17892-6	1.57–1.59 (1.6)	$w_L$	-	-	Konus tipa 60°60g–30°80g
Zentar i sar. (2009)	1.3/65	$w_L/w_P$	37	24	Uzete su srednje vrednosti (krilna sonda)
Kayabali i Tufenkci (2010)	1.2-12.0/68-530	$w_L/w_P$	26-84	18-47	Srednja vrednost 2.3/180 kPa
Tanaka i sar. (2012)	1.0-2.0 0.41-19.50	$w_L$	34-94	14-53	
Kayabalia i sar. (2015)	1.7 0.1-222	$w_L$	29-117	15-28	Indeks tečenja $I_L$ je 1
Karakan (2023)	1.67/166.7 33.5-255.1	$w_L/w_P$			Odnos zavisi od mineralnog sastava (kaolinit, montmorilonit)

## 2.2. Korelacione zavisnosti i modeli

U ovom delu disertacije prikazane su korelacione zavisnosti i empirijski modeli za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće tla u zavisnosti od karakterističnih parametara. Ove zavisnosti zasnivaju se na rezultatima laboratorijskih i terenskih ispitivanja, kao i na osnovu široko prihvaćenih literaturnih podataka, i omogućavaju indirektnu procenu nedrenirane smičuće čvrstoće u uslovima ograničene dostupnosti eksperimentalnih podataka. Ponašanje tla u velikoj meri zavisi od naponskog stanja. Većina korelacija koje se koriste za nedreniranu smičuću čvrstoću u direktnoj vezi su sa vertikalnim efektivnim naponom ili naponom prekonsolidacije. Taj odnos se često definiše kao

normalizovana smičuća čvrstoća (normalizovan parametar<sup>1</sup>). Razvoj brojnih empirijskih i polu-empirijskih korelacija nastaje kombinacijom normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i drugih fizičkih i indeksnih parametara tla. Pored toga, mnogi istraživači (Wroth i Wood, 1978; Edil i Benson, 2009; Vardanega i Haigh, 2014; Spagnoli i Feinendegen, 2017; Hutabarat i Widjaja, 2020) nedreniranu smičuću čvrstoću prikazuju i u ekponencijalnom obliku u zavisnosti od vlažnosti, Aterbergovih granica ili indeksa tečenja:

$$c_u = ae^{-bf} \quad (2.3)$$

Gde su:

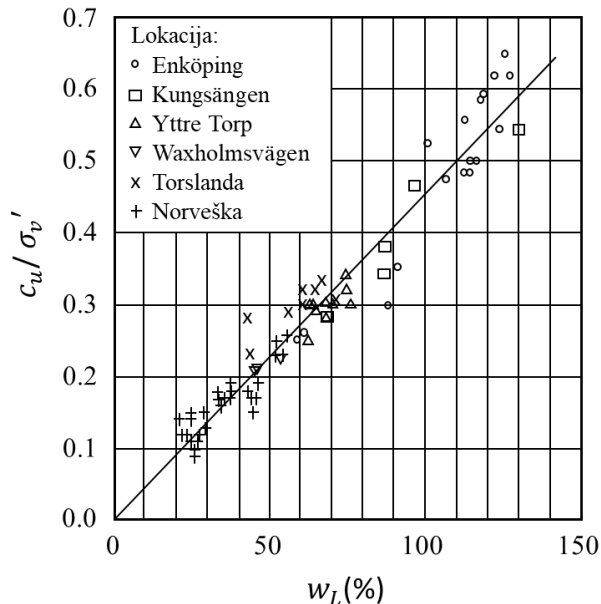
- a i b koeficijenti koji su dobijeni laboratorijskim ili empirijskim ispitivanjima,
- f predstavlja neku od fizičkih ili indeksnih parametara tla.

### 2.2.1. Korelacije u funkciji od vlažnosti i granice tečenja

Hansbo (1957) je predložio zavisnost za Švedske gline, pretežno izgrađene od ilitnih minerala, normalno konsolidovane i koje nisu bile pod uticajem prethodnog opterećenja. Nedrenirana smičuća čvrstoća je u direktnoj vezi sa granicom tečenja i vertikalnim efektivnim naponom:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = 0.45 \cdot w_L \quad (2.4)$$

Na osnovu njegovih istraživanja dat je grafički prikaz (Slika 2.3.) koji opisuje odnos normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja.



Slika 2.3. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja

<sup>1</sup> Normalizovan znači da je neki fizički parametar (čvrstoća, modul deformacije, porni pritisak, itd.) podeljen nekom referentnom veličinom (naponom ili nekom drugom veličinom) kako bi postao bezdimenzionalan.

Karlsson i Viberg (1967) su predložili linearnu zavisnost sličnu prethodnoj, gde je nedrenirana smičuća čvrstoća u relaciji sa granicom tečenja i vertikalnim efektivnim naponom:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = 0.005 \cdot w_L \quad (2.5)$$

Posmatrajući jednačine koje su predložili Hansbo i Karlsson primećuje se velika razlika u koeficijentu, čak dva reda veličine, što ukazuje da prikazane jednačine treba oprezno koristiti.

Prema Koumot-u i Houlsby-u (2001), odnos između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće sitnozrnog tla može se izraziti u obliku logaritamske jednačine, ali se za veći opseg vlažnosti preporučuje primena eksponencijalne jednačine, poznate kao:

$$w = a(c_u/p_a)^{-b} \quad (2.6)$$

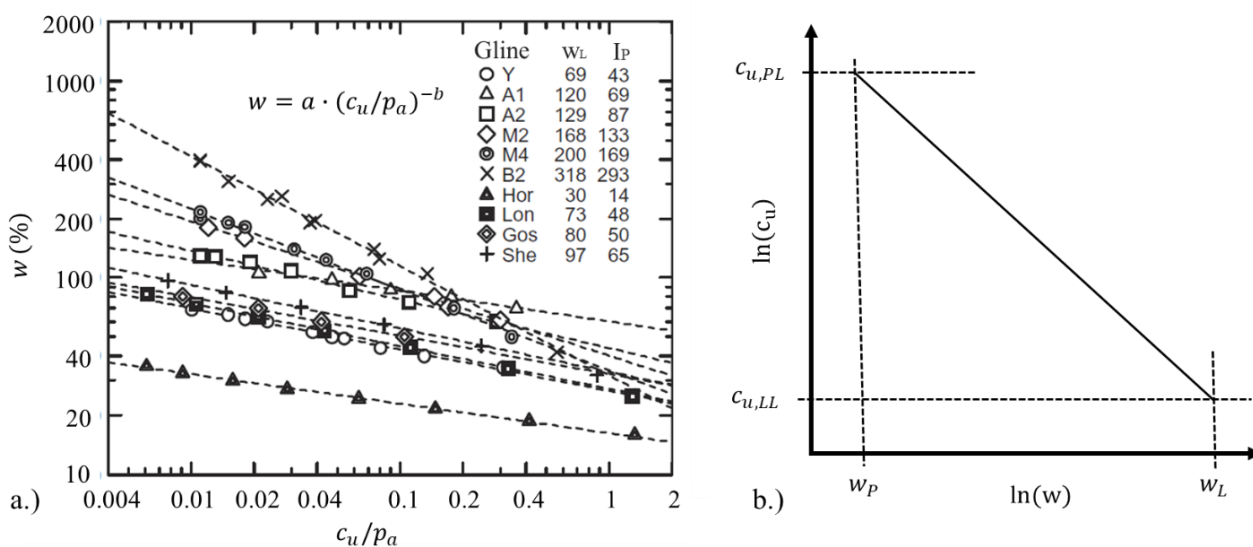
Gde je:

a – konstanta koja se odnosi na osobine tla i predstavlja osnovne karakteristike njegove čvrstoće,

b – parametar nagiba koji odražava osetljivost nedrenirane smičuće čvrstoće na promene vlažnosti i

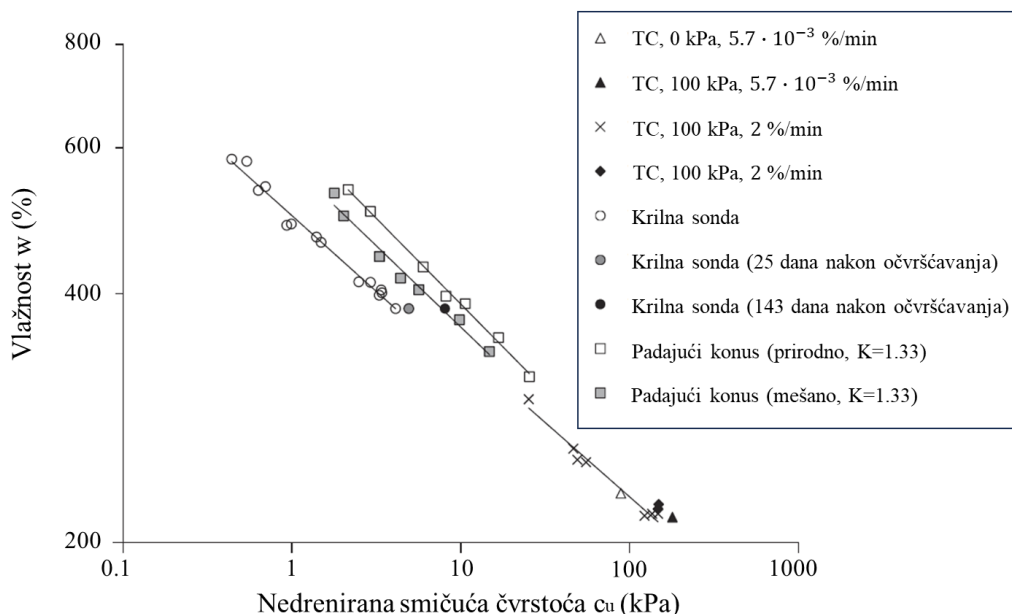
$p_a$  – atmosferski pritisak (100 kPa).

Logaritamski oblik pojednostavljuje prikazivanje i tumačenje eksperimentalnih podataka (Slika 2.4.a). Sa Slike 2.4.b je uočljivo da sa povećanjem vlažnosti nedrenirana čvrstoća tla opada. Voda je direktno vezana i za minerale koji su prisutni u tlu (više u Poglavlju 3).



Slika 2.4. a.) Logaritamski odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti tla b.) Zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti (Koumoto i Houlsby, 2001)

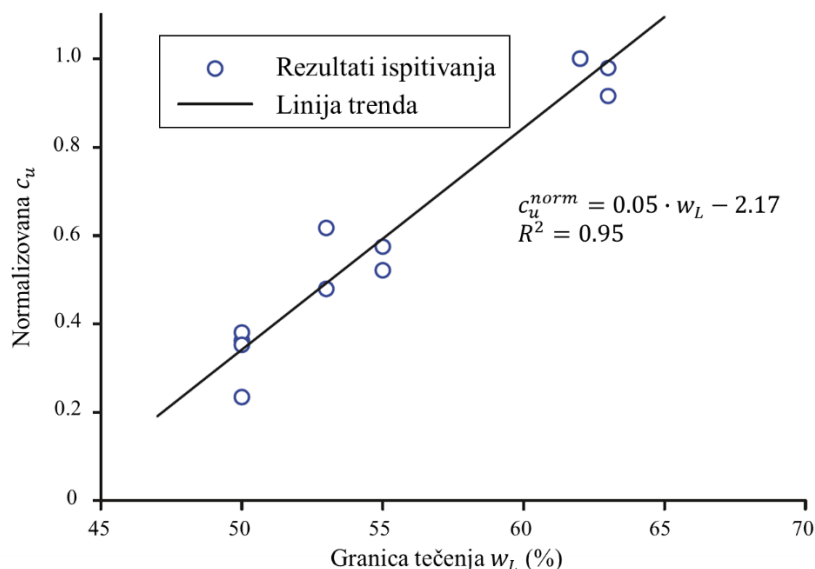
O'Kelly (2011) je ispitivao amorfne organske gline, koristeći prerađene uzorke, i pokazao je da je odnos između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće dobro korelisan, kao i da ostaje linearan i pri izuzetno visokim vlažnostima, što dovodi u pitanje primenljivost klasičnih pokazatelja konzistencije zasnovanih na Atterbergovim granicama (Slika 2.5.).



Slika 2.5. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće određene različitim opitima i vlažnosti (O'Kelly, 2011)

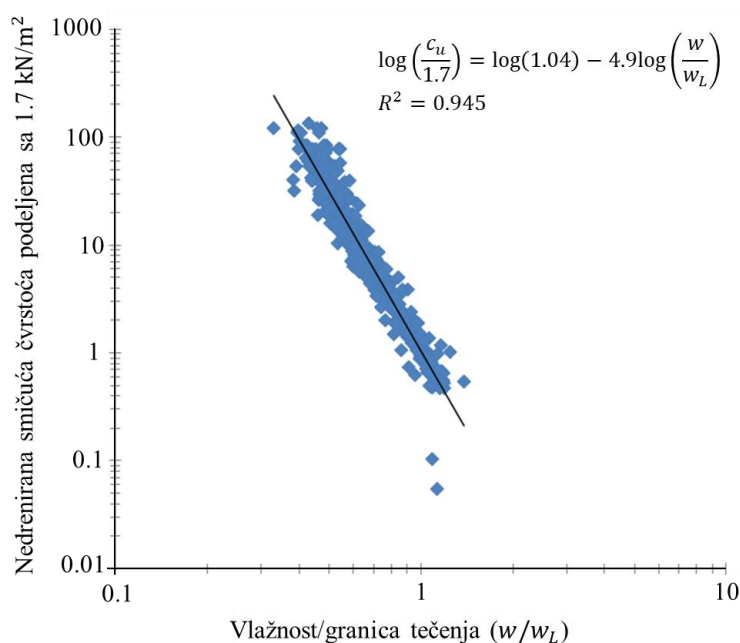
Visoke vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, veće od 150–200 kPa, pri vlažnostima većim od 200 %, nisu karakteristične za normalno konsolidovane gline. Ovakvo ponašanje ukazuje da kod organskih gline vlažnost i Atterbergove granice ne predstavljaju pouzdan pokazatelj konzistencije tla, budući da je smičuća čvrstoća u većoj meri povezana sa parametrima kritičnog stanja i strukturnim vezama unutar tla nego sa samim sadržajem vode. Opisano ponašanje može se pripisati specifičnoj mikrostrukturi i visokom sadržaju organske materije, kao i uslovima ispitivanja u triaksijalnom opitu pri svestranom pritisku i velikim brzinama deformacije (TC, 100 kPa, 2 %/min).

Vahedifard i sar. (2016) radili su ispitivanja džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom. Oni su pokazali da krilna sonda daje pouzdanije procene nedrenirane smičuće čvrstoće u poređenju sa džepnim penetrometrom, koji ispoljava veliko rasipanje rezultata i ograničenu primenljivost kod mekog i organskog tla. Rezultati kriline sonde su bili bliži vrednostima referentnih laboratorijskih ispitivanja. Na Slici 2.6. prikazana je normalizovana vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja, gde je normalizovana nedrenirana smičuća čvrstoća definisana kao odnos terenski merenih vrednosti (džepna krilna sonda i džepni penetrometri) i referentne laboratorijske nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena „UU“ triaksijalnim opitima.



Slika 2.6. Odnos normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i granice tečenja (Vaherdifard i sar., 2016).

Sharma i Sridharan (2018) su podržavali teoriju da je nedrenirana smičuća čvrstoća na granici plastičnosti 100 puta veća od nedrenirane čvrstoće na granici tečenja. Oni su vlažnost podelili sa granicom tečenja i time dobili odnos sadržaja vode (WCR), a vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće podelili sa nedreniranom smičućom čvrstoćom na granici tečenja za 1.7 kPa (Slika 2.7.).



Slika 2.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i WCR (Sharma i Sridharan, 2018)

Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće od vlažnosti tla u opštem slučaju nije linearna, već pokazuje nelinearni karakter, pri čemu se u ograničenom opsegu vlažnosti može aproksimirati linearnom funkcijom, dok se pouzdaniji opis ostvaruje primenom logaritamskih ili eksponencijalnih relacija, posebno u korelaciji sa Aterbergovim granicama.

U Tabeli 2.2. su izdvojene mnogobrojne druge korelacije nedrenirane smičuće čvrstoće tla u zavisnosti od vlažnosti i granice plastičnosti.

Tabela 2.2. Prikaz različitih modela za definisanje nedrenirane čvrstoće smicanja u zavisnosti od vlažnosti

Istraživači	Model	Napomena
Federico (1983)	$c_u = e^{5.25(1.161-WCR)}$	CPT opit urađen na visoko i srednje plastičnim glinama
Tsuchida (1999)	$c_u = 1.4WCR^{-4.5}$	Prerađeni uzorci
Bell (2002)	$c_u = 3718w^{-1.18}$	Glinovita nisko plastična tla
Lee (2004)	$c_u = 182.93e^{-2.37WCR}$	Prerađeni uzorci
Berilgen i sar. (2007)	$c_u = 145e^{-2.86WCR}$ $\log c_u = 11.5 - 2.2\log w$	Morske „Golden Horn“ gline
Edil i Benson (2009)	$c_u = 191.4e^{-0.03w_L}$	Različite vrste materijala
Jacobs (2011)	$c_u = 2770WCR^{-2.5}$	Veštački pripremljene gline
O'Kelly (2012)	$w = 385c_u^{-0.201}$	Otpadni mulj
Kang i sar. (2017)	$c_u = 1.39 \cdot WCR^{-4.79}$	Veštački pripremani uzorci
Kuriakose i sar. (2017)	$\log(c_u) = 0.644 - 2.55WCR$	Prerađeni uzorci
Vardanega i Haigh (2017)	$c_u = 10^{(2.72-2.585WCR)}$	Prerađeni uzorci
Spagnoli i Feinendegen (2017)	$c_u = 597.82e^{-5.131WCR}$	Kod prerađenih 40 uzoraka tla
Sharma i Sridharan (2018)	$c_u = c_{uL} \cdot WCR^{-4.9}$	Neorganska tla
Londalen (2018)	$w = 290c_u^{-0.6}$	Na osnovu veće baze podataka, odnosi se na neporemećen $c_u$
Karakan (2023)	$c_u = 1.838 \cdot WCR^{-3.068}$	Veštački pripremani uzorci

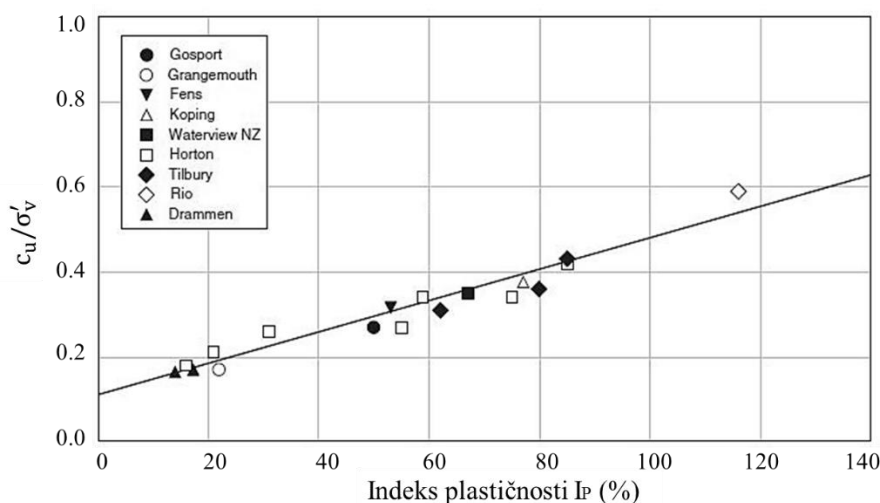
\* WCR – odnos vlažnosti i granice tečenja,

\*\*  $c_{uL}$  – nedrenirana smičuća čvrstoća na granici tečenja koja je često usvojena da je 1.7 kPa.

### 2.2.2. Korelacije u funkciji od indeksa plastičnosti

Jedna od prvih korelacija za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće za normalno konsolidovane gline koja se i najčešće upotrebljava u geotehničkoj praksi dao je Skempton (1957). On je predložio linearni odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  normalno konsolidovanih glina i indeksa plastičnosti  $I_p$  u zavisnosti od vertikalnog efektivnog napona  $\sigma'_v$ . Ova relacija je bazirana na podacima koji su dobijeni opitom terenske krilne sonde i laboratorijskim jednoaksijalnim opitom (Slika 2.8. i jednačina 2.7.).

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = (0.11 + 0.037I_p) \quad (2.7)$$



Slika 2.8. Zavisnost nedrenirane čvrstoće tla, vertikalnog napona i indeksa plastičnosti (Skempton, 1957)

Dijagram pokazuje da vrednosti odnosa nedrenirane smičuće čvrstoće i vertikalnog efektivnog napona rastu sa porastom indeksa plastičnosti ( $I_p$ ). Treba napomenuti da je jako bitno da li su gline normalno konsolidovane ili prekonsolidovane. Kada su u pitanju normalno konsolidovana tla koristi se efektivni vertikalni napon  $\sigma'_v$ , dok se kod prekonsolidovanog tla efektivni vertikalni napon zamenjuje naponom prekonsolidacije  $\sigma'_p$ .

Bjerrum (1954) je ispitivajući norveške normalno konsolidovane gline pomoću terenske krilne sonde došao do zaključka da nedrenirana smičuća čvrstoća linearno raste sa povećanjem dubine i to je izrazio preko odnosa nedrenirane čvrstoće smicanja i vertikalnog efektivnog napona. Njegova korelacija uzima u obzir efekte veličine uzorka i anizotropiju. Bjerrum i Simons (1960) su nedreniranu smičuću čvrstoću izrazili preko indeksa plastičnosti:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = (0.045I_p^{0.5}) \quad (2.8)$$

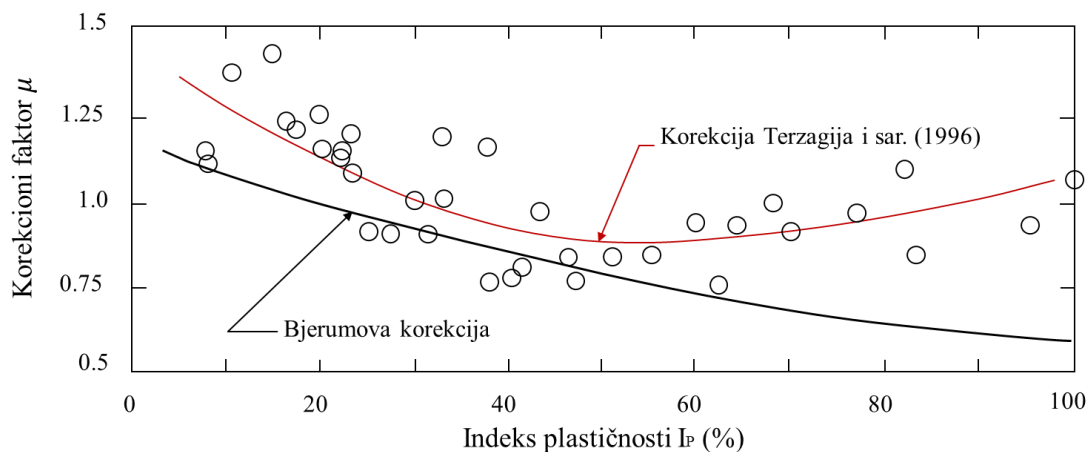
Bjerum (1973) predlaže uvođenje korekcionog faktora  $\mu$  (Slika 2.9.). Korekcioni faktor direktno zavisi od indeksa plastičnosti i služi za korekciju nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_{ucor}$ ) kod glinovitih i prašinastih materijala:

$$c_{ucor} = c_u \cdot \mu \quad (2.9)$$

Na osnovu Bjerrum-ovog dijagrama korekcioni faktor  $\mu$  se može i izračunati prema formuli:

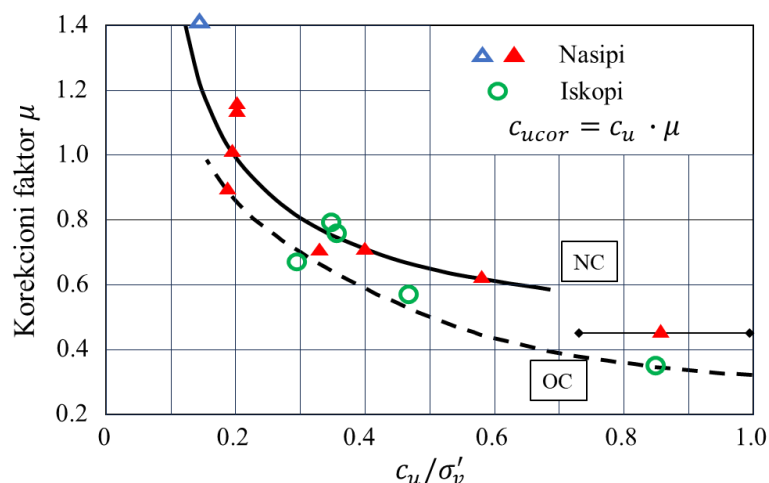
$$\mu \sim 0.18 + \frac{70}{I_p(\%) + 65} \quad (2.10)$$

Terzaghi i sar. (1996) su radili analize primenom jednoaksijalne kompresije i takođe su istakli korekcioni faktor (Slika 2.9.)



Slika 2.9. Korekcioni faktor  $\mu$  za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće (Terzaghi i sar., 1996)

Aas i sar. (1986) su predložili korekcioni faktor  $\mu$  koji zavisi od istorije opterećenja. Treba napomenuti da su oni prilikom formiranja ovog dijagrama nedreniranu smičuću čvrstoću određivali terenskom krilnom sondom koristeći koeficijent 0.86 (Slika 2.10.).



Slika 2.10. Korekcionni faktor  $\mu$  prema Aas i sar. (1986)

Larsson (1980) je kao i Skempton objavio korelaciju između nedrenirane čvrstoće i indeksa plastičnosti, što omogućava procenu  $c_u$  na osnovu lako dostupnih podataka o granicama konzistencije. Kako je ispitivanje indeksa plastičnosti često jednostavnije i brže od direktnog određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće, ove relacije su posebno korisne kod mekih glina. Larsson je ustanovio da se nedrenirana čvrstoća povećava sa porastom indeksa plastičnosti, ali u zavisnosti od specifičnih faktora kao što su: prirodna vlažnost, gustina, mineralni sastav i prethodno opterećenje tla.

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = (0.08 + 0.0055I_p) \quad (2.11)$$

Mitchell i Soga (2005) su na osnovu Wroth-a i Houlsby-ja (1985) predložili linearnu zavisnost:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = (0.129 + 0.00435I_p) \quad (2.12)$$

### 2.2.3. Korelacije u funkciji od indeksa tečenja

Bjerrum i Simons (1960) su nedreniranu smičuću čvrstoću izrazili preko indeksa tečenja:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = \left( \frac{0.18}{I_L^{0.5}} \right) \quad (2.13)$$

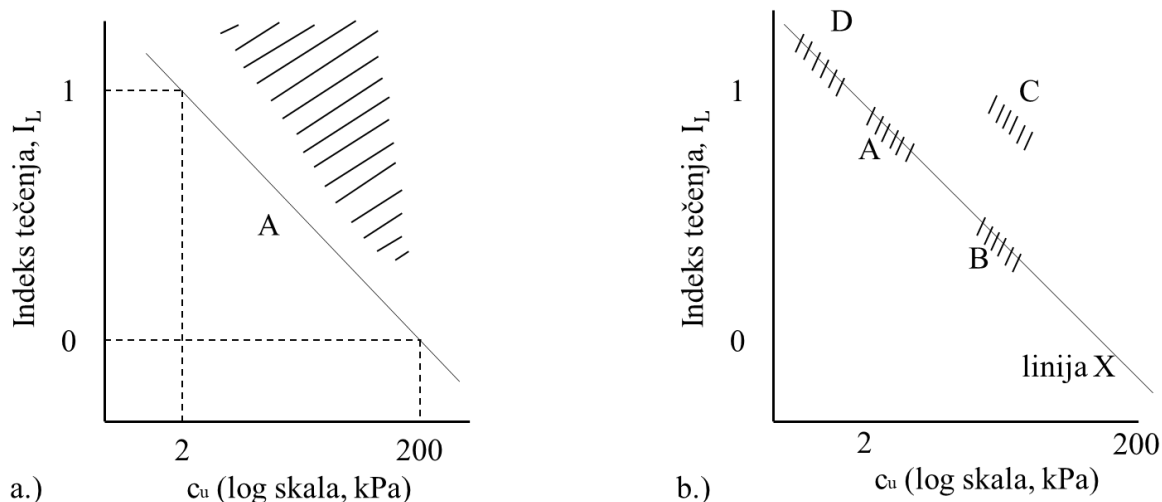
Locat i Demers (1988) su istražujući prerađene uzorke muljevutih materijala predložili da se nedrenirana smičuća čvrstoća tla može izraziti preko relacije:

$$c_u = \left( \frac{1.167}{I_L} \right)^{2.44} \quad (2.14)$$

Wood (1990) je na osnovu eksperimentalnih podataka nedreniranu smičuću čvrstoću tla izrazio preko indeksa tečenja jednačinom:

$$c_u = 2 \cdot 100^{1-I_L} \quad (2.15)$$

Eksperimentalni podaci predstavljaju osnovu ove korelacije, a njihov odnos je prikazan na Slici 2.11.a dok je na Slici 2.11.b prikazana ista zavisnost za procenu istorije opterećenja tla. Ispitivani uzorci su bili prerađeni.



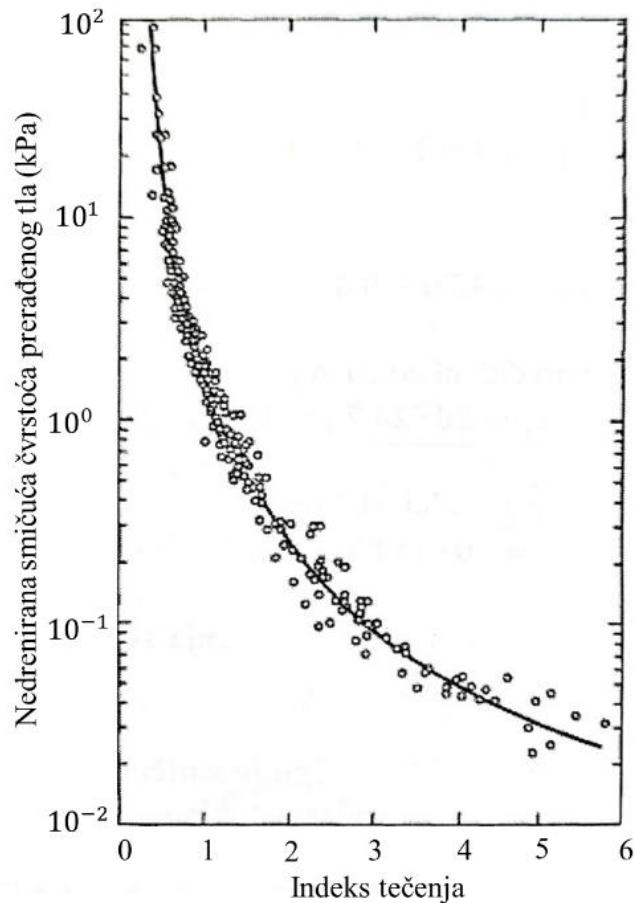
Slika 2.11. a.) Grafički prikaz jednačine 2.15, b.) Raspored tla prema istoriji opterećenja (Wood, 1990)

Na slici 2.11.b prostor na liniji X koji je označen sa A predstavlja normalno konsolidovana tla čija nedrenirana čvrstoća smicanja zavisi od indeksa tečenja. Deo koji je označen sa B označava prekonsolidovana tla. Indeks tečenja je niži nego kod normalno konsolidovanog tla, što je zapravo uticaj istorije opterećenja tla. Tla izraženo visoke vlažnosti nalaze se izvan linije X i na slici su označeni sa C, dok tla koja su još uvek u postupku konsolidacije označena kao D (Wood, 1990). Wood je takođe zaključio da tla koja sadrže više minerala montmorilonita imaju veću nedreniranu čvrstoću smicanja dok tla sa većim sadržajem kaolinita imaju manju nedreniranu smičuću čvrstoću.

Terzaghi i sar. (1996) su pored korelacija koje su vezane za granicu plastičnosti analizirali i odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja izrazivši to preko relacije:

$$c_u = 2 \cdot (I_L)^{-2.8} \quad (2.16)$$

Ispitivani uzorci su bili prerađeni. Na Slici 2.12. prikazan je dijagram nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja za veliki broj glina širom sveta.



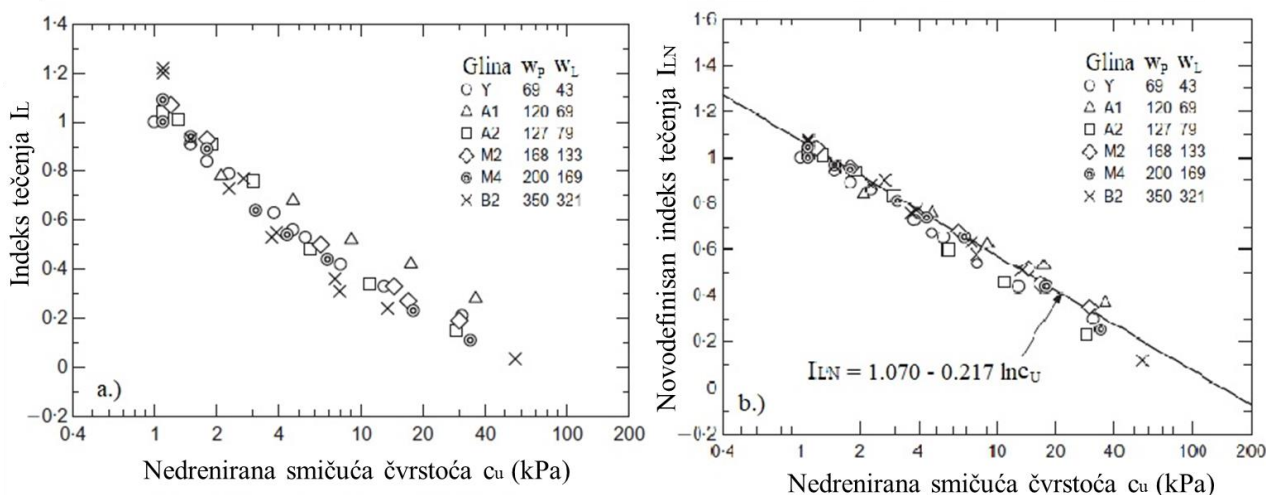
Slika 2.12. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenog tla i indeksa tečenja (Terzaghi i sar. 1996)

Pored njih slične relacije su dali Leroueil i sar. (1983), Boukpeti i sar. (2009), Sahdi i sar. (2014) s tim što su vrednosti koeficijenata drugačiji. Svi ovi modeli i korelacije zavise od vrste materijala.

Koumotu i Houlsby (2001) su uveli i pojam logaritamskog indeksa tečenja koji se dobija iz jednačine:

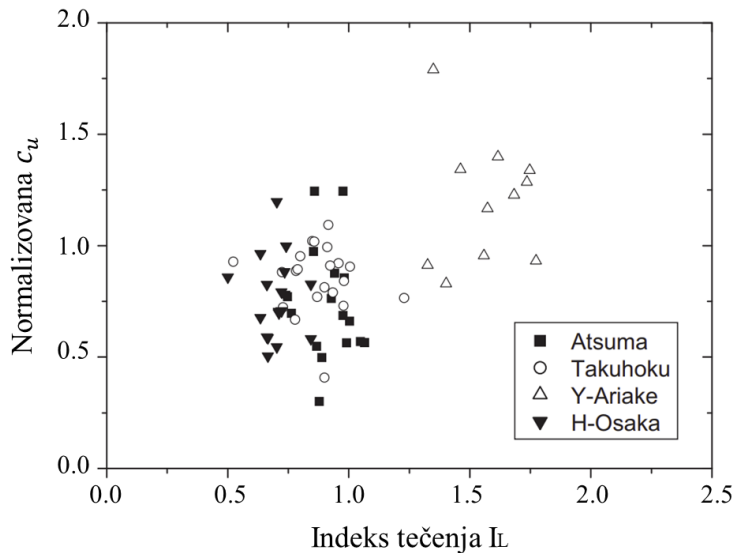
$$I_{LN} = \frac{\ln w - \ln w_p}{\ln w_L - \ln w_p} \quad (2.17)$$

Oni su smatrali da se odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja preciznije može prikazati logaritamskom raspodelom, nego da to bude prikazano polu-logaritamskom raspodelom (Slika 2.13.).



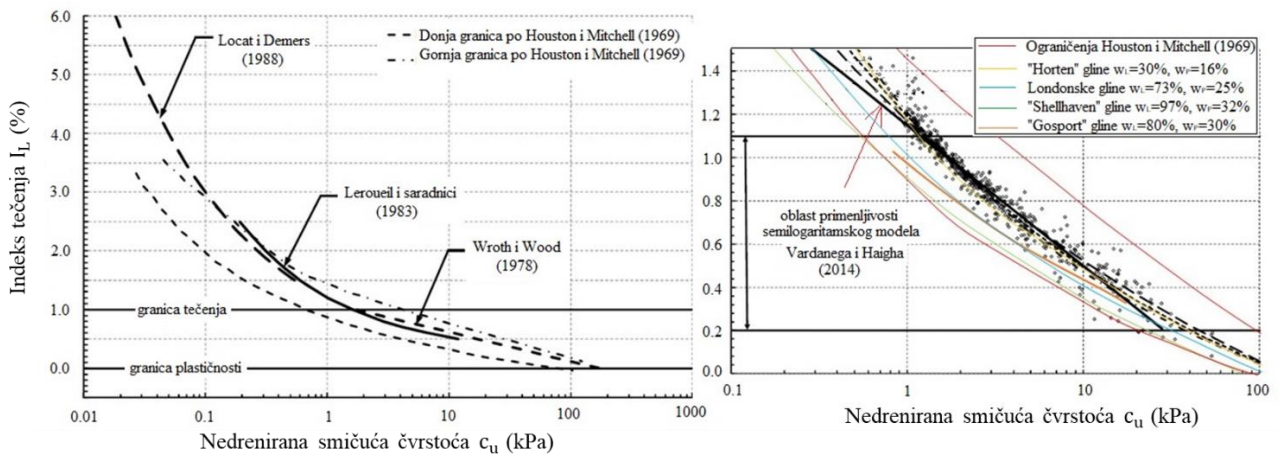
Slika 2.13. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja, i novodefinisanog indeksa tečenja (Koumoto i Houlsby, 2001)

Tanaka i sar. (2012) su vršili ispitivanja opitima padajućeg konusa, jednoaksijalnog opita i opitima krilne sonde. Rezultati istraživanja potvrđuju da opiti korišćenjem padajućeg konusa ne daju ekvivalentne vrednosti u odnosu na jednoaksijalne opite. Oni su rezultate nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim uzorcima (čije vrednosti nisu prelazile 25 kPa) poredili sa rezultatima Leuroueil i sar. (1983) i pokazali da njihovi rezultati odstupaju od krive. Pored toga, rezultate su prikazali odnosom normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće (gde su vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena jednoaksijalnim opitom delili vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene opitom padajućeg konusa) i indeksa tečenja (Slika 2.14.).



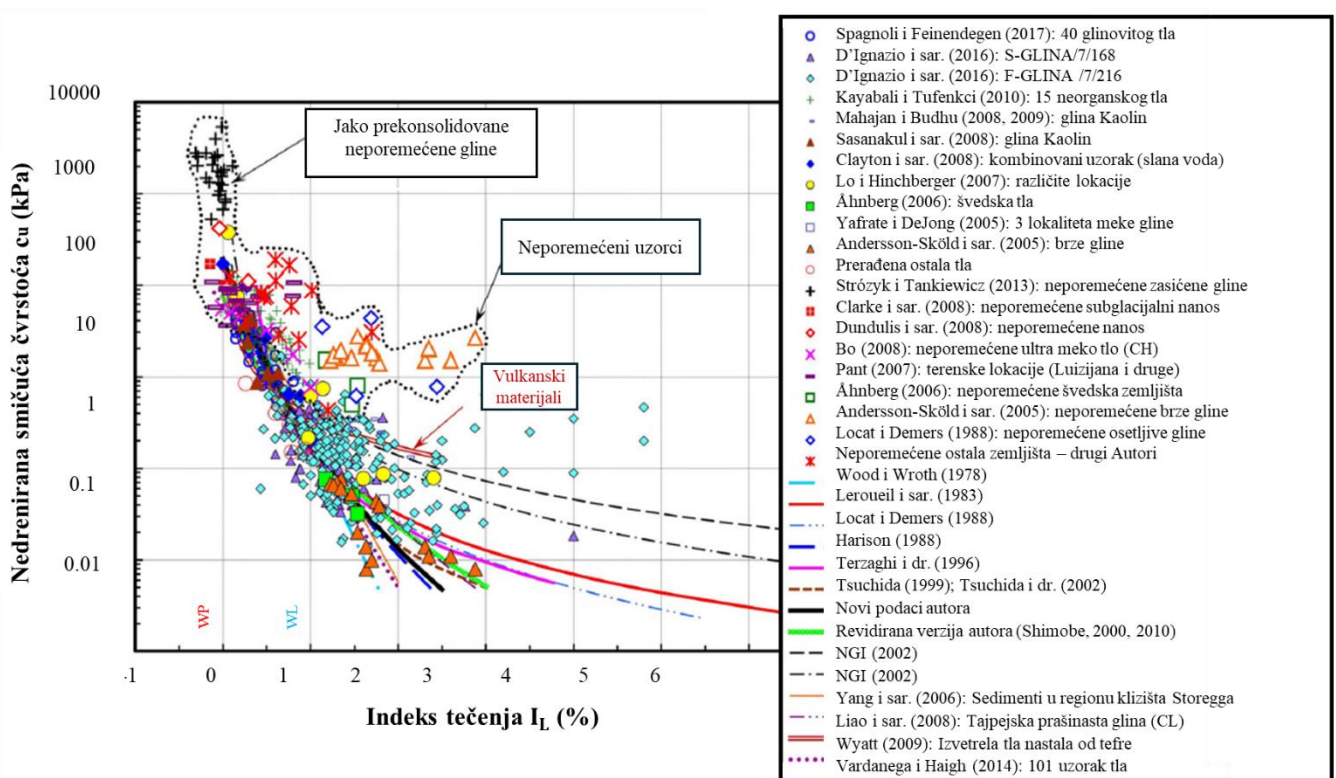
Slika 2.14. Odnos između indeksa tečenja i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće (Tanaka i sar., 2012)

Vardanega i Haigh (2014) su u svojim istraživanjima ispitivali odnos nedrenirane smičuće čvrstoće koja je podeljena sa 1.7 kPa, tj. sa nedreniranom čvrstoćom koja je na granici tečenja, i takođe su primenjivali teoriju logaritamskog indeksa tečenja čije su jednačine prikazane u Tabeli 2.2. Na Slici 2.15. je prikazan odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja, kao i ograničenja različitih istraživanja zajedno sa Vardanega i Haigh-ovim.



Slika 2.15. Zavisnost indeksa tečenja i nedrenirane čvrstoće smicanja (Vardanega i Haigh, 2014)

Shimobe i Spagnoli (2020a) su radili mnogobrojna ispitivanja, primenjujući različite obrasce i eksperimentalne podatke. Oni su u svom istraživanju obradili oko 500 podataka. Na Slici 2.16. je prikazan odnos za nedrenirnu smičuću čvrstoću za prerađene i neporemećene uzorke tla sa indeksom tečenja, dok je u Tabeli 2.2. istaknuta njihova relacija za dobijanje nedrenirane smičuće čvrstoće uvođenjem senzitivnosti.



Slika 2.16. Prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  u zavisnosti od indeksa tečenja  $I_L$  (Shimobe i Spagnoli, 2020a).

Pored ovih, postoje i mnogobrojne druge korelacije koje su date u Tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Prikaz brojnih modela nedrenirane smičuće čvrstoće tla u zavisnosti od indeksa tečenja

Istraživači	Model	Napomena
Mitchell (1976)	$c_u = 1.7 \cdot 10^{2(1-I_L)}$	Prerađeni uzorci
Wroth i Wood (1978)	$c_u = 170e^{-4.6I_L}$ $c_u = c_{uL}30.6^{(1-I_L)}$	Nedrenirana čvrstoća može imati maksimalnu vrednost od 170kPa
Whyte (1982)	$c_u = 1.6e^{4.23(1-I_L)}$	Prerađeni uzorci tla nedrenirane čvrstoće od 1.6 do 110 kPa
Leroueil i sar. (1983)	$c_u = \frac{1}{(I_L - 0.21)^2}$	Prerađeni uzorci
Locat i Demers (1988)	$c_u = (19.8/I_L)^{2.64}$	Prerađeni uzorci
Leroueil i sar. (1992)	$c_u = 140e^{-5.8I_L}$	Neporemećeni uzorci
Yilmaz (2000)	$c_u = e^{0.026-1.21I_L}$	Prerađeni uzorci
Koumoto i Houlsby (2001)	$I_{LN} = 1.070 - 0.217 \ln c_u$	Prerađeni uzorci, primena konusa 60°/60g
Yilmaz (2004)	$c_u = 102.63e^{-1.21I_L}$	Prašinasta glina u nekim lokacijama Turske
Yang i sar.(2006)	$c_u = 159.6e^{-3.97I_L}$	Prerađeni uzorci
Edil i Benson (2009)	$c_u = 144.9e^{-1.72I_L}$	Različite vrste materijala
Vinod i sar. (2012)	$c_u = 184.45e^{-1.087I_L}$	CH i CL materija gde je $I_L < 0$
Vardanega i Haigh (2014)	$I_L = 1.150 - 0.283 \ln c_u$ $c_u = c_{uL}35^{(1-I_L)}$ $c_u = c_{uL}85^{(1-I_{LN})}$	Prerađeni uzorci
Kayabalia i drugi (2015)	$c_u = 96 \cdot 0.187^{I_L}$ $c_u = 84.8(0.02044^{I_L})$	Primena krilne sonde
Spagnoli i Feinendegen (2017)	$c_u = 119.283e^{-4.020I_L}$	Kod prerađenih 40 uzoraka tla
Hutabarat i Widjaja (2020)	$c_u = 165.83e^{-4.239I_L}$ $c_u = 48.99e^{-2.938I_L}$	Prva jednačina je za glinovita tla, dok je druga za prašinasta
Shimobe i Spagnoli (2020a)	$c_u = 98 \cdot S_t \cdot e^{\left[ \frac{\ln\left\{ \frac{0.4755}{I_L + 0.5(1-I_L)} \right\}}{0.19} \right]}$	Prerađeni i neporemećeni uzorci
Habibullah i sar. (2022)	$c_u = 72.9e^{-1.95I_L}$	Tlo Malezije

\*  $c_{uL}$  – nedrenirana smičuća čvrstoća na granici tečenja koja je često usvojena da je 1.7 kPa,

\*\*  $I_{LN}$  – logaritamski indeks tečenja.

#### 2.2.4. Korelacije u funkciji od napona prekonsolidacije i stepena prekonsolidacije

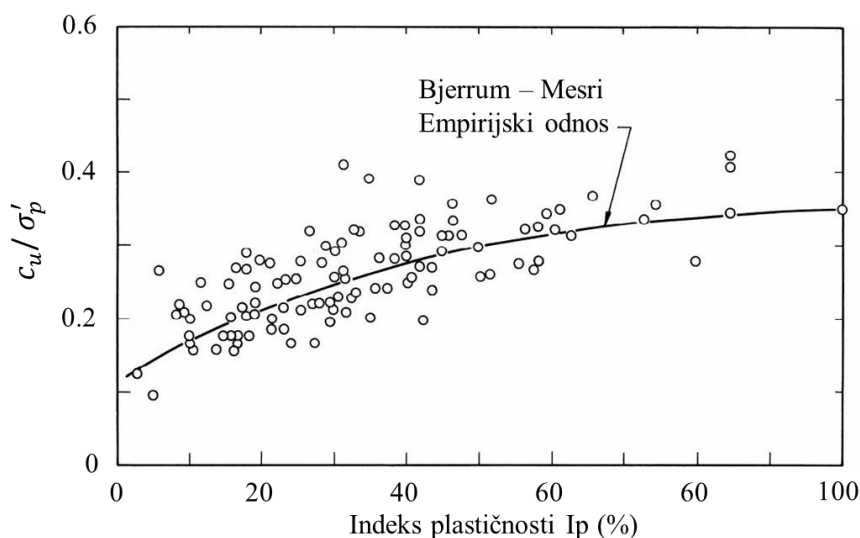
Nedrenirana smičuća čvrstoća se u literaturi često izražava kroz korelacije koje uključuju više parametara. U ovom poglavlju osnovni odnos se zasniva na naponu prekonsolidacije ( $\sigma_p'$ ) i stepenu prekonsolidacije (OCR), ali se u jednačinama mogu pojaviti i dodatni parametri, poput vlažnosti (w), granice plastičnosti ( $w_L$ ) ili senzitivnosti ( $S_t$ ), čime se postiže preciznije opisivanje ponašanja tla.

Mesri (1975, 1989) je koristeći Bjerumov korekcionni faktor  $\mu$ , direktno izrazio korigovanu nedreniranu smičuću čvrstoću prema jednačini 2.9. i predložio jednu linearnu vezu između nedrenirane smičuće čvrstoće i napona prekonsolidacije, koju je izrazio kao:

$$c_u = 0.22\sigma_p' \quad (2.18)$$

Nedrenirana smičuća čvrstoća zasićenih glina raste sa porastom naponu prekonsolidacije, a konstanta od 0.22 zapravo predstavlja generalizovani odnos nedrenirane čvrstoće za glinovita tla u

prekonsolidovanom stanju. Mesri (1975) je dao empirijsku zavisnost između indeksa plastičnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće u zavisnosti od napona prekonsolidacije, objedinivši svoje podatke zajedno sa podacima Bjerruma (1972, 1973). Ova relacija je poznata kao Bjerrum – Mesri empirijski odnos (Slika 2.17.).



Slika 2.17. Zavisnost indeksa plastičnosti i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće (Mesri, 1975)

Mesrijeva jednačina se često u literaturi sreće u drugačijem obliku tj. nedrenirana smičuća čvrstoća se izražava preko stepena prekonsolidacije:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = 0.22 \cdot OCR \quad (2.19)$$

Mesrijeva jednačina je relativno jednostavna i samim tim je korisna za brzu procenu nedrenirane čvrstoće smicanja. Kod organskih glina i prašina konstanta od 0.22 iznosi 0.26.

Jamiolkowski i sar. (1985) su nedreniranu smičuću čvrstoću izrazili sličnom jednačinom koristeći stepen prekonsolidacije OCR. Uveli su eksponent 0.8, a vrednost konstante je 0.23:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = 0.23 \cdot OCR^{0.8} \quad (2.20)$$

Ova jednačina se u literaturi često pominje i kao SHANSEP jednačina.

Larsson i sar. (2007) su nedreniranu čvrstoću izrazili preko granice tečenja i stepena prekonsolidacije. Istraživanja su sprovedena opitom direktnog smicanja za normalno konsolidovana tla. Larson i sar (2007) predlažu sledeću jednačinu:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = \left( 0.125 + \frac{0.205 \cdot w_L}{1.17} \right) \cdot OCR^{0.8} \quad (2.21)$$

Prilikom izvođenja opita direktnog smicanja teško je obezbediti striktno nedrenirane uslove, naročito kod sitnozrnog zasićenog tla. Tokom smicanja delimično dreniranje je neizbežno, što može uticati na izmerene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće i dovesti do odstupanja od pravih vrednosti.

D'Ignazio i sar. (2016) su sprovedli statističku analizu zasnovanu na obimnoj bazi podataka koja se uglavnom odnosi na skandinavske (finske, švedske i norveške) glina. Oni su predložili korelaciju sličnu Mesrijevoj:

$$c_u = 0.24\sigma'_p \quad (2.22)$$

Ove dve relacije se zasnivaju na Bjerumovim podacima iz 1972 i 1974 godine, gde su sve prethodno prikazane jednačine nezavisne od OCR i drugih indeksa.

Ching i Phoon (2012) su predložili globalni model na osnovu jednoaksijalnih opita i opita krilne sonde u funkciji od stepena prekonsolidacije (OCR) i senzitivnosti glina ( $S_t$ ). Njihov model je nastao na osnovu velike baze podataka, ispitanih čak 345 glinovitih uzoraka sa nekoliko lokacija širom sveta.

$$\frac{c_u(mob)}{\sigma'_v} = 0.229 \cdot S_t^{0.121} \cdot OCR^{0.823} \quad (2.23)$$

Karlsruud i Hernandez-Martinez (2013) su proučavali uzorke norveških mekih glina pomoću triaksijalnog opita i opita direktnog smicanja. Oni su dali model koji je u relaciji sa stepenom prekonsolidacije i sa prirodnim sadržajem vode:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = (0.14 + 0.18w) \cdot OCR^{(0.35+0.77w)} \quad (2.24)$$

Sve izdvojene korelacije ne treba koristiti kao zamenu za direktna laboratorijska ili terenska ispitivanja, već kao smernicu za preliminarne procene nedrenirane smičuće čvrstoće tla.

### 2.3. SHANSEP metoda

SHANSEP metodu (*Stress History and Normalized Soil Engineering Properties*) i normalizovani parametar (Normalized Soil Parameters – NSP) su prvi razvili Ladd i Foott (1974) na osnovu mnogobrojnih laboratorijskih ispitivanja mekih glina. Ova metoda predstavlja postupak za određivanje i procenu nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  uzimajući u obzir istoriju opterećenja i stanje u kome se tlo nalazi. Metoda polazi od pretpostavke da glina pokazuje normalizovano ponašanje, što znači da se njene mehaničke osobine, uključujući nedreniranu smičuću čvrstoću, mogu izraziti kao odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i efektivnog napona. Kao takva je data u obliku:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = s \cdot OCR^m \rightarrow s = \left( \frac{c_u}{\sigma'_v} \right)_{NC} \quad (2.25)$$

Gde su  $s$  i  $m$  koeficijenti materijala:

- $s$  – koeficijent nedrenirane čvrstoće u normalno konsolidovanom stanju je raspona  $0.16 < s < 0.33$ ,
- $m$  – empirijski eksponent raspona  $0.12 < m < 0.95$ .

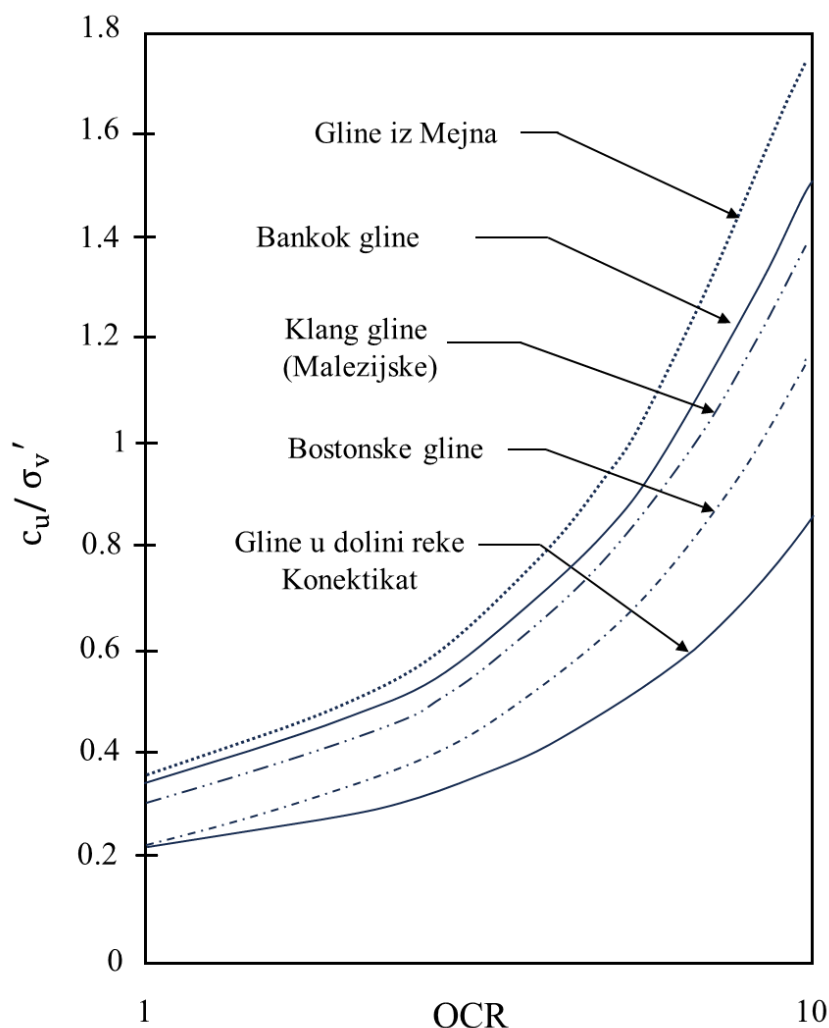
Ladd (1986) je sugerisao da  $s$  ne zavisi od indeksa plastičnosti. On je na osnovu triaksijalnih opita dokazao da se smičuća deformacija, koja je potrebna da bi se dostigla vršna nedrenirana čvrstoća, povećava sa OCR-om. Literaturni podaci koji govore o opsegu parametara  $s$  i  $m$  dati su u Tabeli 2.4. Analizirana tla obuhvataju različite tipove glina (uključujući marinske i prašinate glina), dok su u

radu Youssouf i sar. (2020), za razliku od ostalih istraživanja u tabeli, korišćeni veštački pripremljeni uzorci dobijeni mešanjem gline i peska.

*Tabela 2.4. Prikaz različitih modela računanja nedrenirane čvrstoće smicanja*

Parametri		Literatura
S	m	
0.22	0.80	Ladd (1991)
0.16	0.75	
0.25	0.88	
0.259	0.78	Amin i sar. (1992)
0.259	0.78	Mohd i sar.(1997)
0.245	0.27	Seah i Lai (2003)
0.75	0.89	
0.33	0.8	Larsson i sar. (2007)
0.25	0.76	Roy i Singh (2008)
0.08	0.35	Karlsrud i Hernandez-Martinez (2013)
0.844	0.95	
0.481	0.118	Stróżyk i Tankiewicz (2014)
0.802	0.256	
0.33	0.75	Krage i sar. (2014)
0.41	0.18	Youssouf i sar. (2020)
0.32	0.25	
0.19	0.35	

Da bi se metoda primenila u praksi, potrebno je sprovesti laboratorijska ispitivanja (najčešće se u literaturi koristi triaksijalni opit) na uzorcima tla čije su OCR vrednosti određene edometarskim opitom. Zatim se za svaki uzorak određuje odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i efektivnog vertikalnog napona, i crta se dijagram normalizovane čvrstoće u funkciji OCR-a. Ova kriva se koristi za kalibraciju parametara  $s$  i  $m$ , a zatim omogućava procenu čvrstoće na različitim dubinama na osnovu poznatog OCR-a i efektivnog vertikalnog napona iz edometarskog opita. Amin i sar. (1992) su dopunili dijagram Ladd-a i Foott-a (1974) i dodali njihova istraživanja izvedena na marinskim glinama u Klangu (Slika 2.18.)



Slika 2.18. Odnos normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i OCR-a (Amin i sar., 1992)

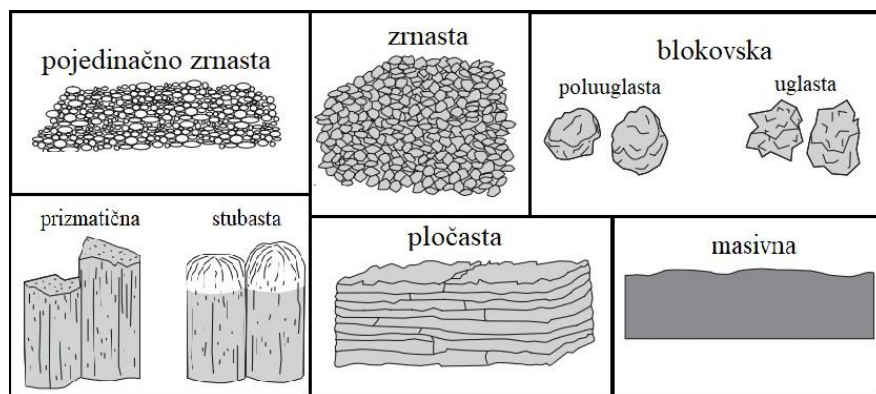
Osnovna prednost SHANSEP metode ogleda se u integraciji laboratorijskih i terenskih podataka, čime se efekti normalne konsolidacije i prekonsolidacije sistematski uključuju u analize stabilnosti i proračune nosivosti. Time se izbegava primena izolovanih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće i uspostavlja kontinuirana funkcionalna veza između istorije opterećenja i vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Zbog toga se SHANSEP metoda široko primenjuje u projektovanju nasipa, temelja, brana i iskopa u mekim glinama, naročito u slučajevima kada je neophodno pouzdano definisati promenu nedrenirane smičuće čvrstoće sa dubinom. Njena ključna prednost leži u povezivanju istorije naprezanja tla sa njegovim savremenim mehaničkim ponašanjem, čime se omogućavaju realističniji i pouzdaniji geotehnički proračuni.

### 3. STRUKTURA I MINERALOŠKI SASTAV TLA

#### 3.1. Struktura tla

Struktura glinovitog tla zavisi od veličine i rasporeda čestica koje ga sačinjavaju, kao i od uslova u kojima je došlo do njihovog taloženja. Minerali prisutni u tlu odgovaraju mineralnom sastavu stenske mase iz koje tlo potiče i imaju veliki uticaj na geotehnička svojstva. Postanak tla vezan je za neki prirodni proces: mehaničko raspadanje stenske mase, transport i sedimentacija istih kao i hemijsko razaranje. Struktura samog tla direktno zavisi od procesa nastanka. Struktura tla nastaje kao rezultat različitih geoloških i ekoloških procesa koji deluju na tlo tokom njegovog stvaranja – geološke istorije i predstavlja raspored i način povezivanja čestica u jednu grupaciju – agregate (Slika 3.1.). Zavisno od uslova u kojim su nastali, možemo razlikovati sledeće strukture:

1. Pojedinačno zrnastu – ona se sastoji od rastresitih čestica koje nisu povezane i koje imaju malu ili nemaju koheziju. Voda i vazduh lako prolaze kroz ovu vrstu tla i tako ih čine dobro dreniranim.
2. Zrnasta – čestice tla su povezane u male grudve formirajući tako međuzrnsku poroznost.
3. Blokowska – čestice tla su raspoređene u velike (nepravilne oblike) u vidu blokova sa izraženim ivicama i jakim međuprostorom. Vodopropusnost je uslovljena stepenom zbijanja.
4. Stubasta – čestice tla su vertikalno raspoređene u vidu stubova ili prizmi. Kao takva, ova struktura otežava vertikalno kretanje vode.
5. Pločasta – čestice tla su raspoređene u horizontalne slojeve u vidu naslaganih ploča. Kod ove strukture voda se otežano kreće kroz tlo.
6. Masivna – čestice tla su raspoređene u kompaktni oblik, masa je nepravilnog oblika i nema izražen oblik. Voda se zadržava i dreniranje je lošije.



Slika 3.1. Tipovi strukture tla (Soil Survey Staff, 2004)

Struktura sitnozrnih materijala u velikoj meri zavisi od uslova taloženja, pre svega od brzine taloženja i intenziteta delovanja vode. Ukoliko je sedimentacija spora u mirnoj vodi dolazi do otvorene strukture. O'Brien i Slatt (1990) pokazali su da laminacija ukazuje na taloženje u mirnim uslovima, bez mešanja tokom taloženja, dok kod brze sedimentacije i uz prisustvo jakih strujanja vode dolazi do orijentisane i kompaktnije sturkture.

Struktura glinovitog tla prema Bergaya i Lagaly (2013) može se podeliti u četiri kategorije:

- sloj (izgrađen od jednog oktaedarskog ili tetraedarskog sloja, ili jedan oktaedarski sloj koji se nalazi između dva tetraedarska sloja),

- čestica (izgrađena od većeg broja slojeva),
- agregat (izgrađene od više čestica),
- skupina agregata (izgrađena od većeg broja agregata).

Struktura glinenih čestica prema Olphenu (1963) zavisi od njenih naelektrisanja. Različita naelektrisanja, pozitivna ili negativna, utiču na raspored čestica. On razlikuje agregatnu strukturu: površina – površina, flokulisanu strukturu ivica – ivica, flokulisanu strukturu površina – ivica i disperzna (razbacana) struktura.

Struktura sitnozrnog materijala je zapravo rezultat fizičko-hemijske ravnoteže između čestica tla. Ta ravnoteža se formira tokom geološkog razvoja tla i zavisi od različitih faktora, uključujući:

- mineralni sastav,
- elektrostatne i magnetne veze između kristala,
- koncentraciju katjona i anjona
- hemijski sastav vode u fazi taloženja,
- osmotski pritisak,
- temperaturu,
- prisustvo organskih materija.

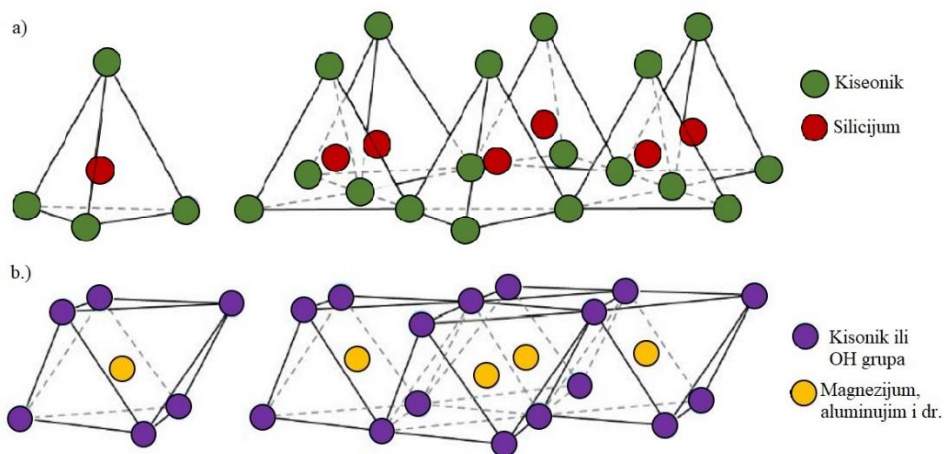
Promene ovih faktora mogu tokom vremena značajno uticati na način vezivanja čestica. Zbog toga se može reći da su procesi taloženja ključni za formiranje i razvoj strukture tla. Struktura tla odražava sve promene i uticaje koje je tlo pretrpelo tokom svoje geološke istorije. Proces samog taloženja kasnije direktno utiče na mehaničke karakteristike tla samim tim i na naponsko-deformacijske karakteristike tla. Raspored čestica i kontakt između njih nije isti u svim pravcima pa se može reći da se radi o anizotropnom tlu. Casagrande i Carrillo (1944) su ovu anizotropiju, koja je rezultat geoloških procesa formiranja tla, nazvali inherentnom anizotropijom. Ona proizlazi iz primarne strukture tla, uključujući laminaciju, slojevitost i međučestične kontakte. Karakteristična je za prirodna, netaknuta tla. Za tla koja su prošla plastične deformacije u određenim pravcima i kod kojih se javlja anizotropija izazvana deformacijama kaže se da su rekonstituisana tla ili prerađena. Leroueil i sar. (1984) su pored netaknute strukture razlikovali i druga stanja. Prema njima možemo izdvojiti četiri osnovna stanja ili strukture tla:

- Netaknuta struktura – predstavlja prirodno stanje tla koje nije bilo podvrgnuto značajnim mehaničkim poremećajima,
- Destruktuirana struktura – stanje u kojem je prvobitna struktura uništena usled velikih deformacija,
- Preoblikovana struktura – stanje koje nastaje kada se materijal preoblikuje, tj. koristi se neka količina mehaničke energije gde se čvrstoća tla svede na minimum.
- Residimentovana struktura – stanje koje se formira taloženjem prethodno preoblikovanih i homogenizovanih glinenih čestica u obliku suspenzije, koje se potom konsoliduju pod sopstvenom težinom u rastućem sloju tla.

Sva ova stanja polaze od pretpostavke da su osobine tla direktna posledica procesa kroz koje je ono prošlo. Prema tome, svako tlo, bez obzira na trenutno stanje, poseduje određenu strukturu koja je uslovljena njegovim sedimentacionim vekom.

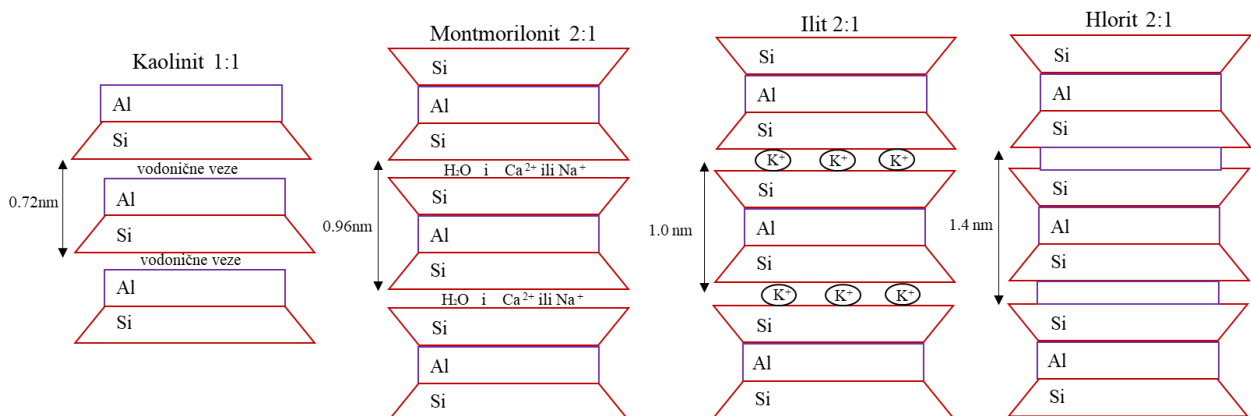
### 3.2. Mineralni sastav

Čestice gline su veoma male i sastavljene od niza strukturnih jedinica koje se sastoje od minerala hidratiranih slojevitih silikata aluminijuma i magnezijuma, čiji razmak može biti više ili manje stabilan u zavisnosti od jačine veza među njima. Slojevi i veze među njima određuju različiti minerali. Sitnije čestice su podložnije uticaju molekularnih sila koje utiču na njihovu međusobnu povezanost i raspored. Kada se te čestice povežu u mrežaste ili sačaste oblike, nastaje tlo sa izraženom poroznošću i visokom sposobnošću zadržavanja vode, što ga čini veoma mekim i podložnim deformacijama. Glavni minerali koji se nalaze u glinama uključuju montmorilonit, kaolinit, ilit i hlorit. Struktura tipičnih glinenih minerala zavisi od osnovne kombinacije dve strukturne jedinice: silicijumskog tetraedra (izgrađen od atoma kiseonika raspoređenog oko katjona silicijuma) i aluminijumskog ili magnezijumskog oktaedra (oktaedarska grupa izgrađena od atoma Al i Mg oko kojih su raspoređeni OH joni) (Slika 3.2.). đ



Slika 3.2. Prostorni izgled a.) Silicijumski tetraedar i njegov sloj i b.) Aluminijumski ili magnezijumski oktaedar i njegov sloj

Različite grupe glinenih minerala razlikuju se po načinu rasporeda ovih slojeva i načinu njihovog međusobnog povezivanja. Na mestima gde se susreću rečne i morske vode, dolazi do koagulacije koloidnih čestica pod uticajem soli, što dodatno doprinosi formiranju glinenih minerala. Vezivanje minerala kao i svih čestica predstavlja skup međučestičnih sila (elektrostatne, elektromagnetne, Van der Walsove, viskozne) koje nisu zasnovane isključivo na trenju. Izgled vezivanja kaolinita, montmorilonita, ilita i hlorita prikazan je na Slici 3.3.



Slika 3.3. Pojednostavljeni prikaz četiri vrste minerala glina

Kaolinit ima strukturu 1:1, debljine oko 0.72 nm i sastoji se od jednog aluminijumskog oktaedra i jednog sloja silicijumskog tetraedra.

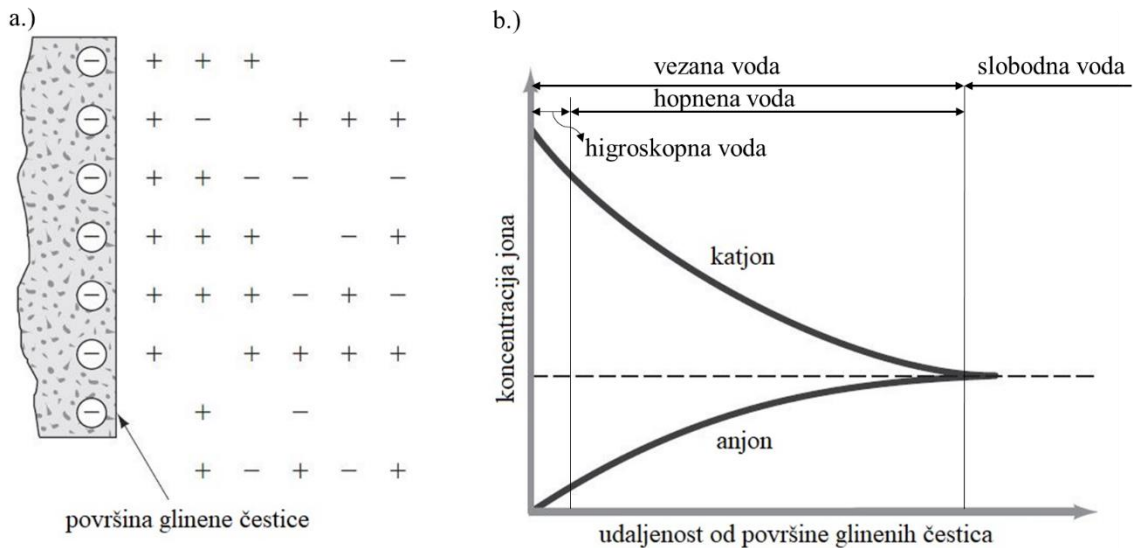
Montmorilonit ima strukturu 2:1 i sastoji se od sloja aluminijumskog oktaedra i dva sloja silicijumskih tetraedara, debljine oko 0.96 nm. Veze između slojeva su veoma slabe, što omogućava širenje pri prodoru porne vode. U specifičnim uslovima, čisti minerali montmorilonita mogu se grupisati u pahuljice koje se talože u obliku sačaste strukture. Takvi sedimenti su retki, ali imaju značajan uticaj na ponašanje tla, naročito u prisustvu vode. Ovi minerali su skloni bubrenju. Kada se razmaci između slojeva montmorilonita ispune vodom njihova debljina se povećava. Vezivanjem  $\text{Na}^+$  katjona debljina međuprostora raste do oko 1.5 nm, dok vezivanjem  $\text{Ca}^{2+}$  katjona nastaje stabilnija sredina i debljina sloja iznosi 1.2 nm.

Illit ima strukturu istu kao i montmorilonit gde se aluminijumski oktaedar nalazi između dva sloja silicijumskih tetraedara, ukupne debljine oko 1 nm. Slojevi illita povezani su kalijumovim ( $\text{K}^+$ ) i hidronijumskim jonima ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ). Negativni naboj, koji balansira prisustvo kalijuma, potiče od zamene dela silicijuma aluminijumom u tetraedarskim slojevima.

Hlorit ima strukturu 2:1 i sastoji se od slojeva debljine 1.4 nm, koji su delimično simetrični kao kod illita, a delimično formirani od silicijumskih slojeva u ravnim sistemima.

Glinene čestice imaju izražen negativan električni naboj na svojoj površini, koji potiče iz dva glavna izvora: zamene jona unutar kristalne rešetke (izomorfna supstitucija) i prekida strukture na ivicama čestica. Što je površina čestica veća, to je i intenzitet negativnog naboja izraženiji. Na ivicama se mogu javiti i mesta sa pozitivnim nabojem, što dodatno komplikuje elektrohemijsko ponašanje gline, posebno u prisustvu vode i rastvorenih jona, ali ovaj slučaj je jako redak. U suvom stanju, negativni električni naboj gline neutralisan je razmenljivim katjonima poput ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  i  $\text{K}^+$ ), koji se elektrostatički vezuju za površinu čestica. Difuzni dvostruki sloj se formira kada katjoni i mali broj anjona počinju slobodno da se kreću oko čestica.

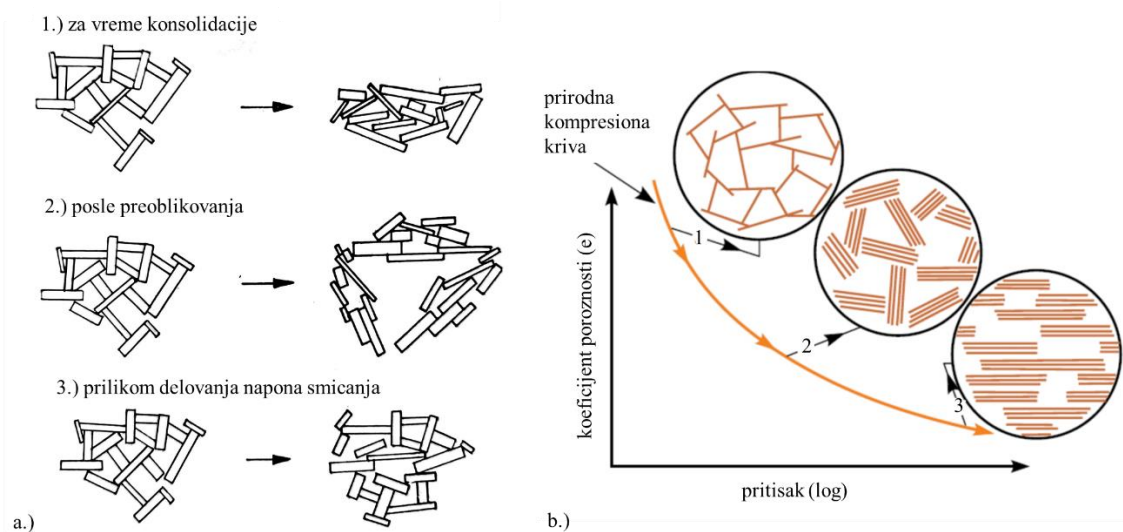
Molekuli vode, zbog svoje polarne prirode, imaju pozitivan i negativan kraj – vodonikovi atomi formiraju ugao od oko  $105^\circ$  u odnosu na kiseonik, što vodi daje dipolni karakter. Ovaj dipol omogućava molekulima vode da se privlače ka negativno naelektrisanim površinama gline, kao i katjonima u dvostrukom sloju. Osim toga, dolazi do formiranja vodoničnih veza između vodonika iz vode i kiseonika na površini gline, što dodatno učvršćuje vezu. Delimično hidratizirani katjoni u pornoj vodi takođe privlače molekule vode, stvarajući sloj vezane vode oko čestica. Ova voda, poznata kao voda dvostrukog sloja, ima različite nivoe vezanosti – najčvršće vezana je adsorbovana voda, koja je znatno viskozija od slobodne vode. Upravo raspored i vezanost molekula vode oko glinenih čestica, daje glinovitom tlu njegovu karakterističnu plastičnost i sposobnost oblikovanja (Slika 3.4.). Na Slici 3.4.a se vidi da se privlačne sile sa udaljavanjem od glinenih čestica smanjuju i koncentracija jona u dvojnomo sloju, a njihova pokretljivost se povećava. Na Slici 3.4.b se vidi da je prelaz adsorbovane odnosno vode vezane dipolarnim privlačenjem u slobodnu pornu vodu postupan.



Slika 3.4. Difuzni dvostruki sloj

Montmorilonit ima veću sposobnost vezivanja vode jer je njegova specifična površina minerala znatno veća, što direktno utiče na granicu plastičnosti i granicu tečenja. Mineralni sastav glina je ključan parametar u karakterizaciji ponašanja tla pod opterećenjem.

Orijentacija glinenih minerala utiče na ponašanje i čvrstoću tla. Način formiranja strukture glinenih minerala direktno zavisi od površinskih sila. Ukoliko postoji neko spoljašnje opterećenje i kada ono počne da deluje na nataloženi materijal, odmah kreće proces konsolidacije. Samim tim struktura glinenih minerala u tlu će se modifikovati tako što će se stepen orijentacije zrna postepeno povećavati. Kada ovakva tla prerađujemo ona se automatski raspadaju u male grumuljice. Ovi grumeni se raspoređuju nasumično ali čestice glina zadržavaju svoj paralelni oblik (Slika 3.5-a). Napon smicanja koji deluje na masu tokom dužeg vremenskog perioda dovešće do reorijentacije strukture. Tla koja imaju vrlo poroznu strukturu (morska i rezidualna) njihova deformabilnost i osetljivost su usko povezani sa flokulacionim stanjem (Slika 3.5-b).



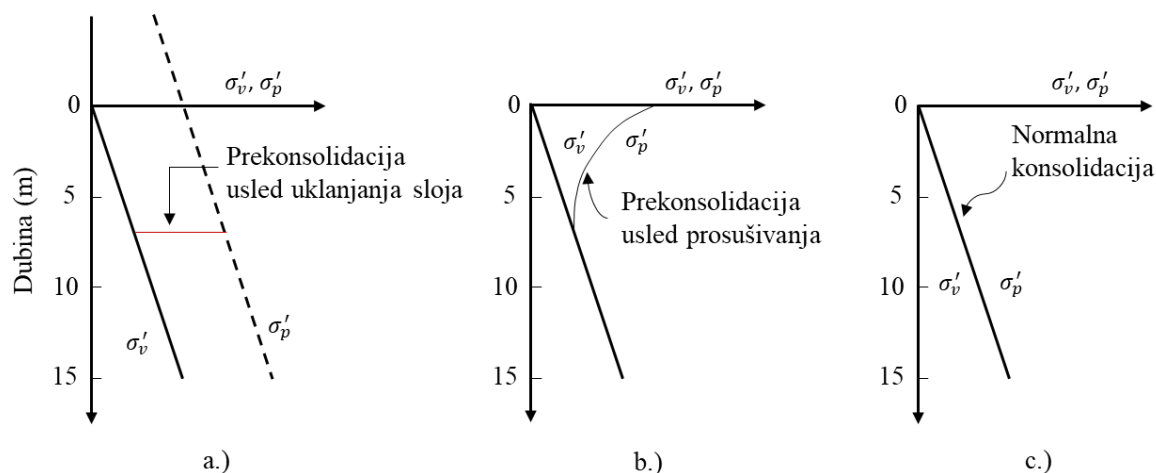
Slika 3.5. a.) Struktura minerala glina sa različitim stepenom orijentacije (Kezdi, 1974) b.) Uticaj smanjenja koeficijenta poroznosti na deformabilnost tla

## 4. ISTORIJA OPTEREĆENJA, STEPEN PREKONSOLIDACIJE I NAPON PREKONSOLIDACIJE

### 4.1. Istorija opterećenja

Istorija opterećenja predstavlja hronološki pregled promena naponskog stanja u tlu tokom geološkog i inženjerskog vremena koje je vezano za antropogene aktivnosti. Efektivni naponi kojima je tlo bilo izloženo u prošlosti presudno utiču na njegova današnja mehanička svojstva. Promene opterećenja nastaju usled različitih prirodnih procesa, kao što su glacijacija i deglacijacija, tektonska kretanja, sedimentacija, erozija, oscilacije nivoa podzemnih voda, kao i antropogenih aktivnosti poput građenja i uklanjanja konstrukcija, podizanja nasipa ili izvođenja privremenih opterećenja (Bjerrum, 1973). U mehanici tla i geotehničkom inženjerstvu tlo se obično klasifikuje kao normalno konsolidovano (NC) ili prekonsolidovano (OC) tlo. Razlika između ova dva tipa tla leži u njihovoj istoriji konsolidacije i u njihovom ponašanju pod opterećenjem.

Normalno konsolidovano tlo je tlo koje je doživelo konsolidaciju pod prirodnim opterećenjem čiji su efektivni naponi u prošlosti isti kao i sada ili su zanemarljivo manji. Pod daljim opterećenjem normalno konsolidovano tlo će obično pokazivati postepene promene u zapremini bez velikih deformacija. Normalno konsolidovano tlo ima manju čvrstoću nego prekonsolidovana tla i stoga se lakše deformišu. Prekonsolidovano tlo je tlo koje je doživelo konsolidaciju pod većim opterećenjem od onog koje trenutno deluje na njega, što znači da je u prošlosti bilo izloženo većem efektivnom vertikalnom naponu. To može biti rezultat promena u geološkoj istoriji, kao što su periodi glacijacije, erozija, promene nivoa podzemnih voda, koji su uzrokovali veće pritiske na tlo u prošlim vremenima. Takođe, u površinskim delovima terena, prekonsolidacija može da nastane i usled prosušivanja tla (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Uticaj prosušivanja tla na napon prekonsolidacije

Dobro poznavanje istorije opterećenja, odnosno razumevanje da li je tlo prekonsolidovano ili normalno konsolidovano je ključno u geotehničkom inženjerstvu jer utiče na ponašanje tla pod opterećenjem i može imati značajan uticaj na projektovanje temelja i stabilnost građevinskih objekata.

## 4.2. Stepen prekonsolidacije i napon prekonsolidacije

Da bismo mogli da odredimo istoriju opterećenja, tj. da li je tlo normalno konsolidovano ili prekonsolidovano koristi se pokazatelj koji nazivamo stepen prekonsolidacije –  $OCR$ . Stepen prekonsolidacije se definiše kao odnos maksimalnog efektivnog napona tj. napona prekonsolidacije  $\sigma'_p$  i njegovog trenutnog efektivnog naponskog stanja  $\sigma'_v$ :

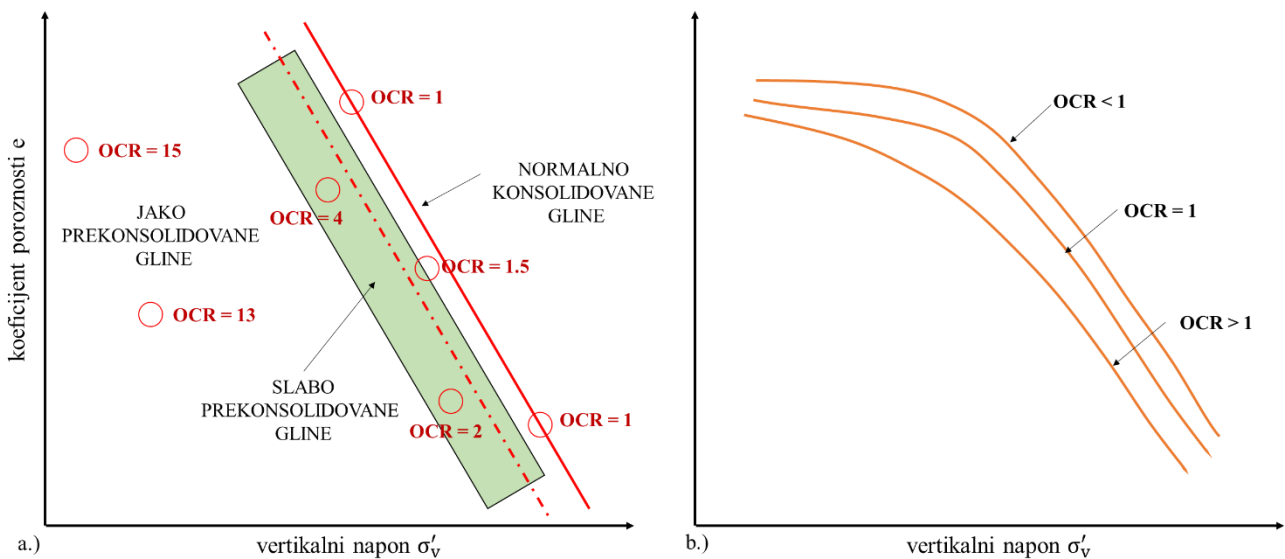
$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \quad (4.1)$$

$OCR = 1$  – normalno konsolidovano tlo

$OCR > 1$  – prekonsolidovano tlo

Pored ove osnovne podele prema  $OCR$ -u, često se u inženjerskoj praksi istorija opterećenja kvantifikuje na sledeći način (Kulhawy i Mayne, 1990; Atkinson, 2007; Look, 2007; Robertson, 2016; Rakić, 2015) (Slika 4.2.):

- $OCR = 1(1.5)$  – normalno konsolidovano tlo,
- $OCR = 1(1.5)-4$  – slabo prekonsolidovano tlo ( $OCR = 1(1.5)-2$  – blago prekonsolidovano tlo i umereno prekonsolidovano tlo ( $OCR = 2-4$ )),
- $OCR > 4$  – jako prekonsolidovano tlo.

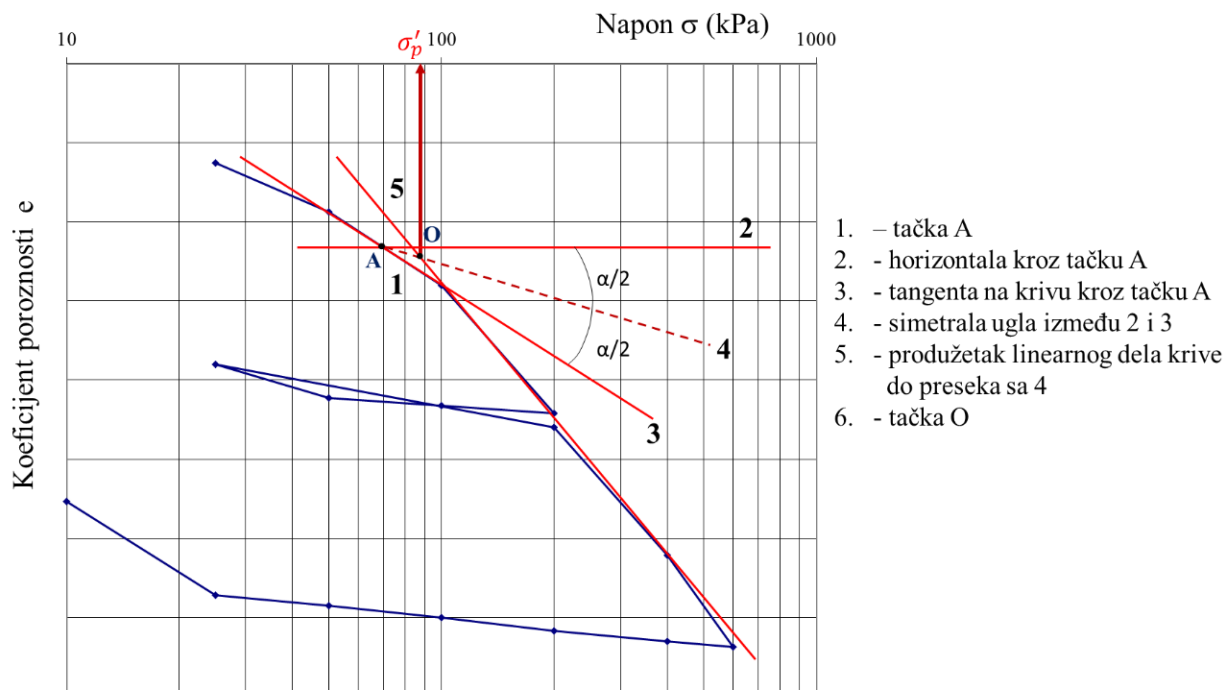


Slika 4.2. Uticaj stepena prekonsolidacije na kompresionu krivu

Slika 4.2.b prikazuje prirodu promene zavisnosti koeficijenta poroznosti u odnosu na vertikalni napon za različite vrednosti  $OCR$ -a. Kako se  $OCR$  povećava, kriva se postepeno pomera nadole.

Napon prekonsolidacije je maksimalni napon koje je tlo nekada trpelo, a da nije bilo dodatno opterećeno. To se može smatrati većim vertikalnim efektivnim naponom tla od tekućeg, a svaki napon koji premašuje napon prekonsolidacije može uzrokovati plastičnu deformaciju ili promenu strukture tla (Casagrande, 1936). U suštini, napon prekonsolidacije označava granicu do koje se deformacije

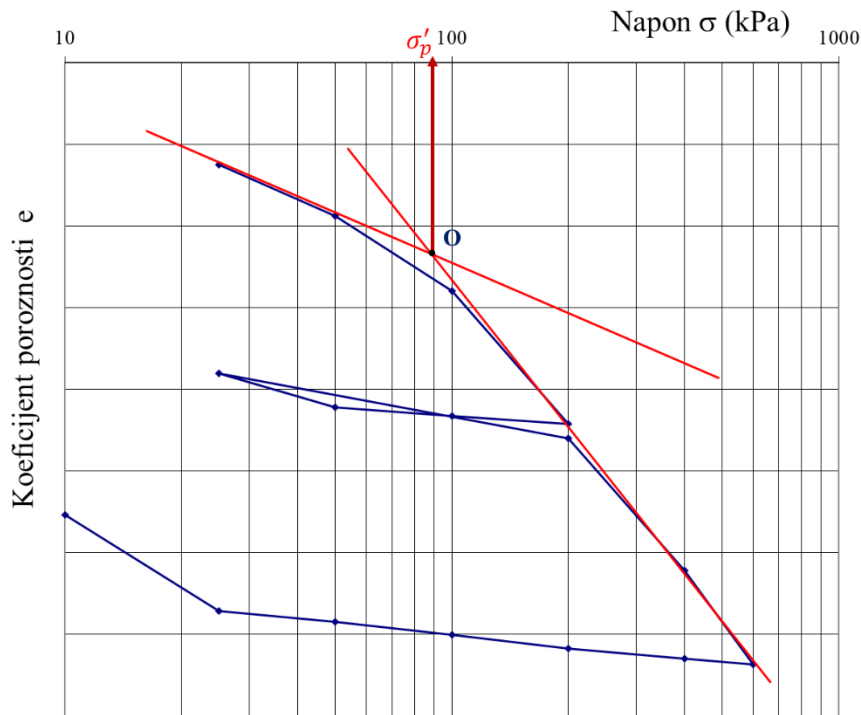
tla mogu smatrati pretežno elastičnim, dok njegovo prekoračenje dovodi do plastičnih deformacija i promena strukture tla. Određivanje napona prekonsolidacije  $\sigma'_p$  najčešće se sprovodi laboratorijskim putem, edometarskim ispitivanjima. Casagrande (1936) je predložio grafičku metodu koja se zasniva na iscrtavanju tangenti i određivanju tačke preloma između linearnih segmenata krive kompresije (Slika 4.3.).



Slika 4.3. Određivanje napona prekonsolidacije metodom Kasagrandea

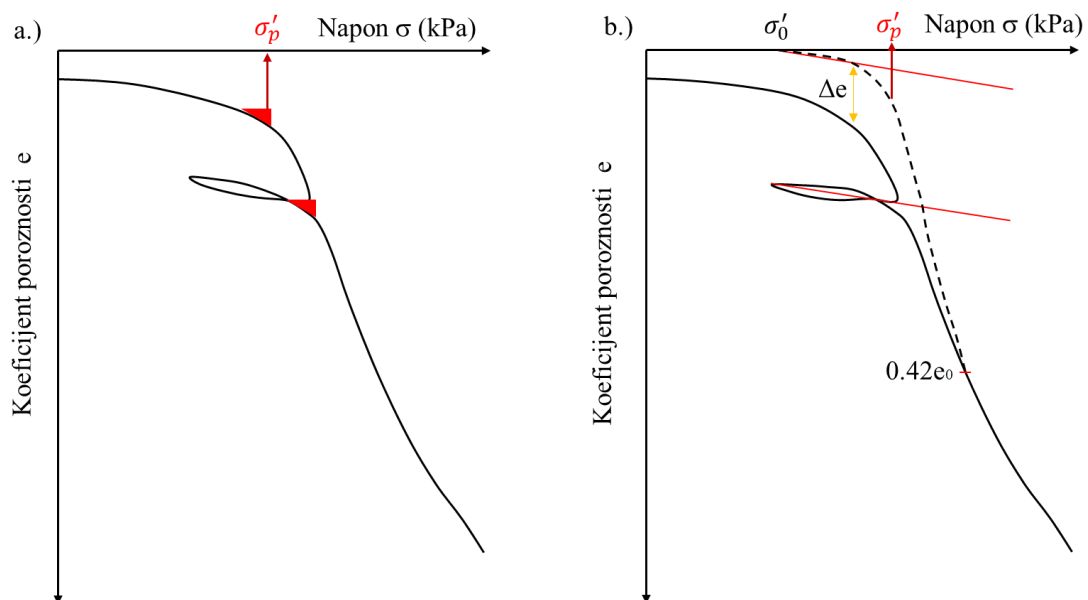
Na Slici 4.3. prikazan je Kasagrandeov grafički postupak za određivanje napona prekonsolidacije. Prema pomenutom postupku prvo se odredi mesto maksimalnog zakrivljenja krive i nacrtta tačka A nakon čega se povlači horizontala iz iste tačke (2). Zatim se povuče tangenta u tački A (3) i izvlači simetrala ugla između tangente i horizontale (4). Nakon toga se linearni deo dijagrama aproksimira pravom (5) koja u preseku sa simetralom (4) daje tačku O i omogućava očitavanje napona prekonsolidacije  $\sigma'_p$ .

Ohde-ova metoda (Ohde, 1938) je još jedan način na koji se može odrediti napon prekonsolidacije (Slika 4.4.). Napon prekonsolidacije se dobija presekom dve tangente (na donjem i gornjem delu krive kompresije). Ovaj postupak određivanja napona prekonsolidacije je jednostavniji od Kasagrandeovog.



Slika 4.4. Određivanje napona prekonsolidacije Ohde-ovom metodom

Burmister (1951) je definisao da se napon prekonsolidacije određuje tako što se formira trougao između dela krive rasterećenja i ponovnog opterećenja i isti takav trougao se prenosi na prvi deo krive opterećenja (Slika 4.5.a). Schmertmann (1953) vrši korekciju krive kako bi se dobila nova kriva konsolidacije. Postupak obuhvata određivanje tačke na krivoj koja odgovara koeficijentu poroznosti od  $0.42e_0$ , gde je  $e_0$  početni koeficijent poroznosti. Nakon toga se iz početne tačke ( $e_0/\sigma'_0$ ) povlači pravac paralelan srednjem nagibu krive. Nakon toga se konsturiše kriva koja kreće od pretpostavljene vrednosti napona do tačke  $0.42e_0$  (Slika 4.5.b).



Slika 4.5. Određivanja napona prekonsolidacije a.) Burmister, b.) Schmertmann

Burmisterova metoda se oslanja na „energetski“ odziv kroz rasterećenje, a Schmertmanova metoda uvodi empirijsku korelaciju zasnovanu na tački  $0.42e_0$ .

Pored ovog, razvijene su brojne modifikacije i alternativni postupci (Becker i sar., 1987; Janbu, 1969), kao i in-situ metode određivanja pomoću penetrometarskih ispitivanja (CPTU, DMT, PMT) uz odgovarajuće empirijske korelacije (Mayne, 2001). Napon prekonsolidacije je ovim istraživanjima dobijen pomoću edometarskog opita. Matematički, napon prekonsolidacije se može izraziti kao:

$$\sigma'_p = \max(\sigma'_{vmax}) \quad (4.2)$$

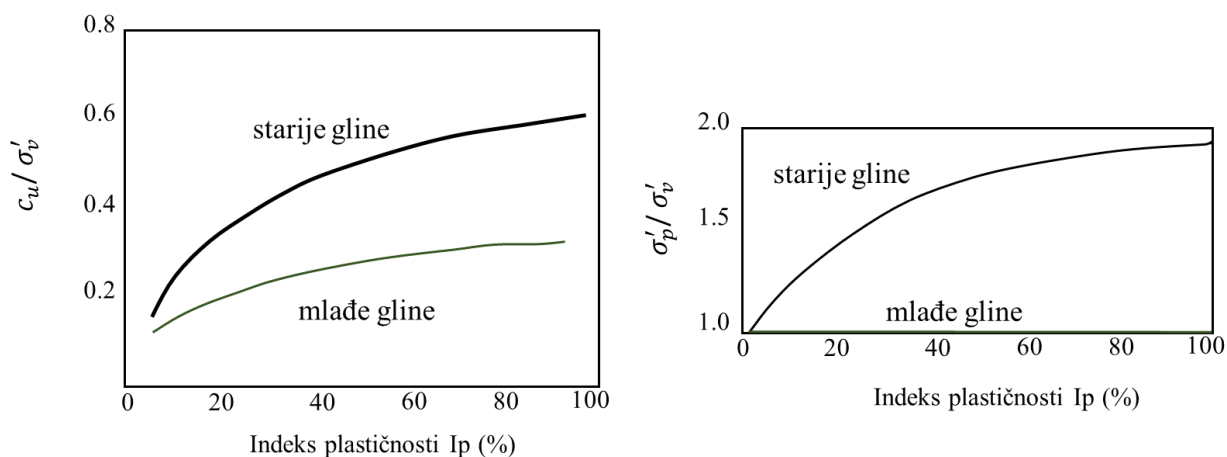
Gde je  $\sigma'_{vmax}$  najveći efektivni vertikalni napon.

Sa porastom OCR, tlo pokazuje veću otpornost, dok sa druge strane, niska vrednost OCR ukazuje na podložnost tla većim sleganjima i potencijalno nepovoljnu stabilnost konstrukcija izgrađenih na ovakvim materijalima (Schmertmann, 1955).

Prema Nagaraj i Murthy (1985) prekonsolidacija tla može nastati usled tri osnovna procesa:

- **Promene efektivnog vertikalnog napona:** Prekonsolidacija se može pojaviti kada dođe do smanjenja efektivnog vertikalnog napona ( $\sigma'_v$ ). Ovo se dešava zbog smanjenja ukupnog vertikalnog napona ili povećanja porednog pritiska ( $u$ ), što dovodi do situacije u kojoj efektivni napon pada ispod svoje prethodne maksimalne vrednosti.
- **Promene u strukturi tla:** Struktura tla može se promeniti zbog faktora kao što su sekundarna kompresija, promene u brzini deformacije tokom opterećenja ili efekta starenja. Ove promene mogu izazvati različite uslove za efektivni prekonsolidacioni napon, zbog čega se tlo ponaša kao da je prekonsolidovano, usled vremenski zavisnih procesa.
- **Hemijski i ekološki faktori:** Spoljni uslovi, uključujući hemijske interakcije i uticaj okoline, takođe mogu promeniti ponašanje tla, što dovodi do pojave tzv. pseudoprekonsolidacionog napona. To znači da, čak i bez značajne istorije opterećenja, ovi faktori mogu doprineti ponašanju tla koje simulira efekte prekonsolidacije.

Bjerrum (1973) ističe razlike između mladih i starih normalno konsolidovanih glacijalnih gline. Mlade gline, koje su nedavno deponovane, nalaze se u ravnoteži pod sopstvenom težinom, ali se značajno deformišu pod dodatnim opterećenjem. Stare gline su prošle kroz sekundarnu konsolidaciju, što im daje veću čvrstoću i manju kompresibilnost (Slika 4.6.). Aas i dr. 1986 su primenom terenske krilne sonde dali sličnu zavisnost (Slika 2.10.).



Slika 4.6. a.) Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i efektivnog vertikalnog napona u zavisnosti od indeksa plastičnosti i b.) Odnos napona prekonsolidacije i vertikalnog napona u funkciji od indeksa plastičnosti. (Bjerrum, 1973)

Napon prekonsolidacije  $\sigma'_p$  i stepen prekonsolidacije OCR se sve više integriše u različite teorijske i numeričke modele tla. Originalni i Modifikovani Cam Clay modeli predstavljaju osnovu koncepta kritičnog stanja tla, u kojima napon prekonsolidacije definiše granicu površine popuštanja i plastifikacije (Roscoe i Burland, 1968). SHANSEP metod (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties) omogućava predviđanje nedrenirane smičuće čvrstoće na osnovu istorije napona i normalizovanih parametara (Ladd i Foott, 1974).

Prilikom izrade ove doktorske disertacije za normalno konsolidovano tlo usvojene su vrednosti OCR-a manje od 1.5, a za slabo prekonsolidovano vrednosti između 1.5 i 4.

## 5. METODE I PROGRAM ISPITIVANJA

U ovom poglavlju prikazane su metode i program ispitivanja primenjeni u okviru disertacije, sa ciljem da se odrede osnovne fizičko-mehaničke karakteristike tla. Ispitivanja su obuhvatila laboratorijske i terenske metode ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće. Sve metode ispitivanja omogućile su dobijanje relevantnih parametara za dalju analizu, uspostavljanje novih modela i korelacija. Pored toga, prikazane su i metode statističke obrade podataka korišćene za ocenu pouzdanosti i tačnosti predloženih korelacija.

### 5.1. Laboratorijska ispitivanja osnovnih fizičko – mehaničkih karakteristika tla

Prvi korak u ispitivanju nedrenirane smičuće čvrstoće tla je određivanje identifikaciono-klasifikacionih karakteristika uzorka (granulometrijskog sastava, zapreminskih masa, prirodne vlažnosti i Atebergovih granica), određivanje naponsko deformacijskih karakteristika i stepena prekonsolidacije.

#### 5.1.1. Određivanje granulometrijskog sastava

Određivanje granulometrijskog sastava se vrši pomoću dve metode: sejanjem i hidrometrisanjem. Da bismo utvrdili metodu ispitivanja potrebno je poznavati procentualno učešće čestica prečnika 0.063 mm. Ukoliko uzorak ima manje od oko 10% čestica manjih od 0.063 mm, obično se ne zahteva ispitivanje hidrometrisanjem, a ako uzorak u celosti prolazi kroz sito od 2 mm i ima manje od oko 10% čestica većih od 0.063 mm, ispitivanje prosejavanjem nije obično potrebno. Za sve ostale uzorke treba izvršiti kombinaciju ispitivanja prosejavanjem i hidrometrisanjem kako bi se utvrdio granulometrijski sastav. Metoda hidrometrisanja vršena je sa hidrometrom opsega merenja između 0.995 g/ml i 1.030 g/ml sa linijama za očitavanje u intervalima od 0.0005 g/ml. Određivanje granulometrijskog sastava tla vršeno je prema standardu SRPS EN ISO 17892-4.

#### 5.1.2. Određivanje zapreminske mase čvrstih čestica i zapreminske mase tla

Zapreminska masa čvrstih čestica se određuje metodom piknometra prema standardu SRPS EN ISO 17892-3. Metoda se zasniva na određivanju zapremine poznate mase tla metodom istiskivanja tečnosti. Gustina čvrstih čestica se računa iz mase tla i zapremine. U prethodno kalibrisan i izmeren piknometar ( $m_0$ ) se stavlja oko 1/5g njegove mase. Za piknometar 50 ml stavlja se 10 g osušenog (u sušnici na 105°C) i usitnjenog uzorka tla čije je veličina čestica manja od 4 mm. U piknometar se dodaje kontrolna tečnost i uzorak se kuva najmanje 10 min uz povremeno mešanje piknometra radi uklanjanja vazduha. Nakon toga se zagrejani uzorak hladi na sobnoj temperaturi 24h. U piknometar se dodaje kontrolna tečnost (do crte) i meri njihova zajednička masa. Zapreminska masa čvrstih čestica ( $\rho_s$ ) se računa po jednačini:

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0)(m_3 - m_2)} \rho_w \quad (5.1)$$

Gde je:

$\rho_s$  – zapreminska masa čvrstih čestica ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\rho_w$  – zapreminska masa vode ( $\text{kg/m}^3$ ),

- $m_0$  – masa suvog piknometra (kg),
- $m_1$  – masa piknometra napunjenog kontrolnom tečnošću (kg),
- $m_2$  – masa suvog piknometra i uzorka (kg),
- $m_3$  – masa piknometra, uzorka i kontrolne tečnosti (kg),
- $m_4$  – masa suvog uzorka (kg).

Zapreminska masa tla predstavlja odnos mase uzorka i zapremine. Njeno određivanje je sprovedeno metodom linearnog merenja prema standardu SRPS EN ISO 17892-2. Određivanje prirodne zapreminske mase vršeno je na uzorku koji se istiskuje mehaničkim putem iz cilindra za uzorkovanje. Za uzorke u obliku pravougaone prizme dimenzije se mere na najmanje tri različite pozicije, dok se kod uzoraka cilindričnog oblika, prečnik određuje u dva međusobno upravna pravca (na oba kraja i u sredini), a dužina se meri na tri mesta, raspoređena pod uglom od približno 120° oko obima. Preciznost merenja dimenzija iznosi 0.1 mm ili 0.1 % od izmerene veličine (usvaja se veća vrednost), dok je masa uzorka određivana sa tačnošću od 0.01 g ili 0.1 % od ukupne mase (takođe se usvaja veća vrednost). Zapreminska masa tla ( $\rho$ ) se računa po sledećem obrascu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.2)$$

Gde je:

- $\rho$  – zapreminska masa tla (kg/m<sup>3</sup>),
- $m$  – masa uzorka (kg) i
- $V$  – zapremina uzorka (m<sup>3</sup>).

### 5.1.3. Određivanje vlažnosti tla

Laboratorijsko određivanje vlažnosti tla urađeno je prema standardu SRPS EN ISO 17892-1. Vlažnost tla se meri korišćenjem gravimetrijske metode gde se masa uzorka tla meri pre i posle sušenja, čime se izračunava sadržaj vode. Određena količina tla se stavi u posudu i suši na 105 °C. Vlažnost tla ( $w$ ) se računa na osnovu jednačine:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \quad (5.3)$$

Gde je:

- $m$  – masa posude (kg),
- $m_1$  – masa vlažnog uzorka sa posudicom (kg) i
- $m_2$  – masa suvog uzorka sa posudicom (kg).

### 5.1.4. Aterbergove granice – plastičnost i konzistencija

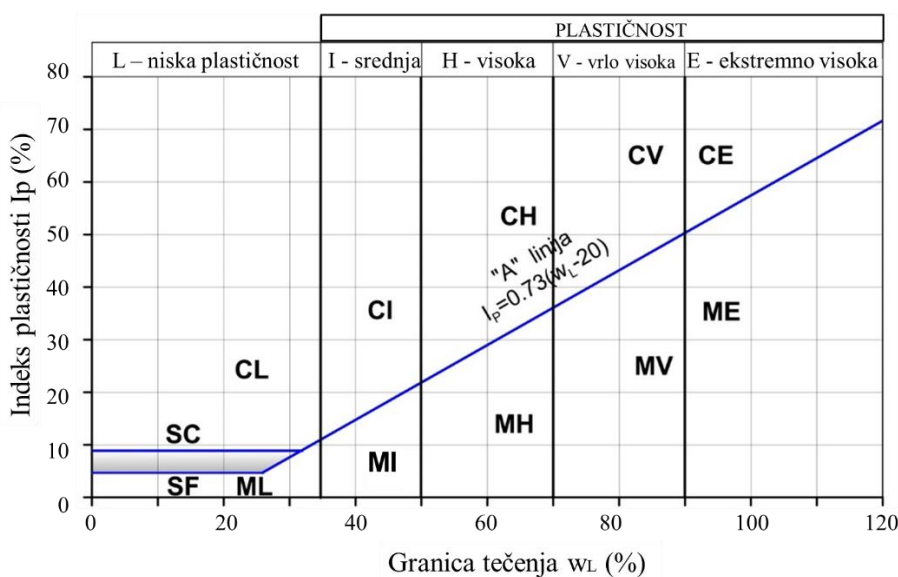
Albert Atterberg, švedski hemičar i poljoprivredni naučnik, imao je ključnu ulogu u definisanju granica konzistencije tla za klasifikaciju sitnozrnog tla 1911.godine. Njegovo otkriće o plastičnosti kao jedinstvenom svojstvu kohezivnih zemljišta postavilo je osnovu za dalja istraživanja u oblasti

geotehnike. Otkrio je da je plastičnost jedinstvena karakteristika koherentnog tla poput gline i prašine, te je predložio da se tla s česticama veličine 2  $\mu\text{m}$  (0.002 mm) ili manje klasifikuju kao gline.

Karl Terzaghi i Arthur Casagrande su takođe igrali ključnu ulogu u razvoju ove oblasti. Njihova primena Aterbergovih otkrića u geotehničkom inženjerstvu ranih 1930-ih doprinela je standardizaciji testova za određivanje granice tečenja, granice plastičnosti i granice skupljanja tla, koji su osnovni parametri preko kojih se definiše stanje konzistencije tla, a koji se izučavaju u mehanici tla. Terzaghi (1925) je prvi ukazao na korisnost Aterbergovih granica. Uočio je da rezultati ispitivanja zavise od fizičkih faktora kao što su oblik čestica, efektivna veličina i uniformnost tla koji zapravo određuju čvrstoću i propustljivost tla. Arthur Casagrande koji je predložio i prikazao dijagram plastičnosti na konferenciji „The First Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering“ izjavio je sledeće (Casagrande, 1959):

*„Smatram da je ključno da iskusni inženjer geologije može proceniti položaj tla na dijagramu plastičnosti samo na osnovu vizuelnog i manuelnog ispitivanja tla. Štaviše, dijagram plastičnosti treba da mu bude poput mape sveta. Barem za određena područja dijagrama, koja su značajna za njegov rad, treba da bude dobro upoznat. Položaj tla unutar tih oblasti treba brzo da mu prenese sliku o značajnim inženjerskim svojstvima koja može da očekuje“ (slobodan prevod)*

Dijagram je više puta pretrpeo izvesne promene, ali u osnovi predstavlja odnos između granice tečenja i indeksa plastičnosti. Uvođenjem evropskih normi, dopunjen je od strane Evropske komisije jer su u odnosu na nisko (CL) i visoko plastična (CH), posebno definisana tla vrlo visoke (CV) i ekstremno visoke plastičnosti (CE) (Slika 5.1). Ovaj dijagram je A linijom ( $I_p = 0.73(w_L - 20)$ ) podeljen na dva dela: glinoviti i prašinasti. Casagrande-ov dijagram plastičnosti je poslužio da se kasnije osmisle različiti postupci klasifikacije tla kao što su: USCS, AASTHO, ESC i ASTM.



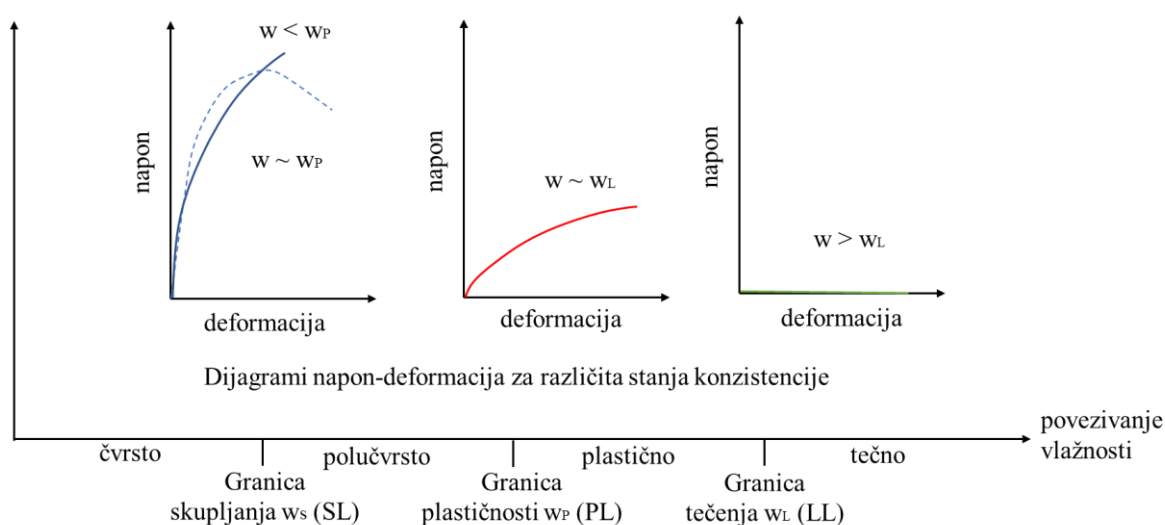
Slika 5.1. Dijagram plastičnosti

Aterbergove granice se koriste za identifikaciju i klasifikaciju koherentnog tla. Sitnozrna tla imaju različito konzistentno stanje u zavisnosti od sadržaja vode tj. vlažnosti i njihovih plastičnih osobina. Kako se vlažnost povećava, tlo koje se ispituje prolazi kroz osnovna četiri (sedam) različita stanja konzistencije: čvrsto, polučvrsto, plastično (žilavo plastično i lepljivo plastično) i tečno (žilavo tečno, gusto tečno i retko tečno). Svaka faza pokazuje značajne razlike u otpornosti i ponašanju. Aterbergove

granice služe kao osnova za preliminarnu procenu mehaničkih svojstava sitnozrnog tla, otpornosti tla na spoljašnja opterećenja što je od velikog značaja kod proučavanja stabilnosti i nosivosti. Granice konzistencije kao i indeksni parametri koji ih prate, imaju direktnu primenu u projektovanju temeljnih konstrukcija i u predviđanju ponašanja tla, nasipa i kolovoza.

#### 5.1.4.1. Granice konzistencije

Konzistencija je pokazatelj tla na osnovu kojeg se opisuje ukupna otpornost sitnozrnog tla koju ono pruža kada želimo da ga deformišemo. U mehanici tla, prelazak iz jednog stanja konzistencije u drugo definisan je granicama konzistencije. Svaka od ovih granica odgovara određenoj količini vode koja je potrebna da bi se tlo predstavilo u određenom stanju, pri čemu ta količina varira za različite tipove tla (Slika 5.2.). Tri najvažnije granice konzistencije su granica plastičnosti ( $w_P$ , PL), granica tečenja ( $w_L$ , LL) i granica skupljanja ( $w_S$ , SL). Pored granica konzistentnog stanja razlikujemo i karakteristične indekse tla koji predstavljaju matematičke izraze na osnovu kojih se definišu karakteristike plastičnosti i konzistencije.



Slika 5.2. Podela tla na osnovu stanja konzistencije prema Aterbergu

**Granica skupljanja  $w_S$  (SL)** odgovara granici između čvrstog i polučvrstog stanja konzistencije. Na ovoj granici tla dostižu minimalnu zapreminu i pri daljem sušenju ona prestaju da se skupljaju.

**Granica plastičnosti  $w_P$  (PL)** odgovara granici između čvrste i plastične konzistencije gde tlo prelazi iz plastičnog stanja u polučvrsto. Vlažnost tla na ovoj granici odgovara zasićenom tlu i nešto je veća od optimalne vlažnosti. Ova granica predstavlja zapravo najmanji sadržaj vode pri kojem je kohezija dovoljno niska da omogući kretanja, ali isto tako dovoljno visoka da omogući česticama tj. mineralima da zadrže svoj oblik (Yong i Warkentin, 1966). Iznad ove granice tlo se može deformisati bez promene zapremine ili pucanja. Nedrenirana smičuća čvrstoća na ovoj granici je najveća.

Granica plastičnosti je određena metodom valjanja u skladu sa standardom SRPS EN ISO 17892-12. Pored metode valjanja postoje i druge alternativne metode određivanja granice plastičnosti koje su detaljnije opisane u dodatku I ove doktorske disertacije.

**Granica tečenja  $w_L$  (LL)** odgovara granici između plastične i tečne konzistencije. Smatra se da je nedrenirana smičuća čvrstoća tla na ovoj granici minimalna. Granica tečenja uzorka tla određuje se prema standardima i to za tla iz kojeg su uklonjene frakcije veće od 0.4 mm. Postoje tri metode za

određivanje granice tečenja: Kasagrandeova metoda, metoda jedne tačke i metoda padajućeg konusa. Različiti standardi koriste različite uređaje, stoga treba oprezno koristiti korelacije zasnovane na granici tečenja.

Granica tečenja je određena prema SRPS EN ISO 17892-12 standardu metodom padajućeg konusa. Za određivanje granice tečenja korišćena su oba konusa i dobijene su identične vrednosti. Opseg penetracije koji je dozvoljen, kao i maksimalna razlika između dva uzastopna merenja, prikazan je u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Tipovi konusa za određivanje granice tečenja

Masa konusa (g)	Tip konusa (°)	Opseg penetracije (mm)	Dubina penetracije na kojoj se određuje granica tečenja (mm)	Maksimalna razlika između dva uzastopna merenja (mm)
60	60	7 – 15	10	0.4
80	30	15 – 25	20	0.5

**Indeks skupljanja** –  $I_S$  predstavlja razliku između granice plastičnosti i granice skupljanja, tj. definiše raspon konzistencije u kojem se tlo nalazi u polučvrstom stanju.

$$I_S = w_P - w_S \quad (5.4)$$

**Indeks plastičnosti** –  $I_P$  predstavlja razliku između granice tečenja i granice plastičnosti. On pokazuje koja je količina vode potrebna da tlo iz plastičnog stanja pređe u tečno stanje.

$$I_P = w_L - w_P \quad (5.5)$$

Granica tečenja i granica plastičnosti zavisi od vrste i količine gline u tlu. Kako se veličina čestica smanjuje, granica tečenja i granica plastičnosti se povećavaju, iz čega sledi da se i indeks plastičnosti povećava velikom brzinom. Kada bi nekom materijalu dodali organsku komponentu, granica tečenja i plastičnosti bi se smanjila i samim tim bi se indeks plastičnosti smanjio. Stoga u literaturi često nailazimo na činjenicu da indeks plastičnosti služi kao mera za finoću čestica. Za različite vrste tla, indeks plastičnosti je prikazan u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Vrednosti indeksa plastičnosti za različite vrste tla

Vrsta tla	$I_p$ (%)	Vrednosti $I_p$ Prema Aterbergu	Stanje konzistencije
<i>Pesak</i>	0	0	Neplastično
<i>Prašina</i>	2 – 10	1-7	Malo plastično
<i>Glinovito tlo</i>	10 – 25	7-17	Srednje plastično
<i>Glina</i>	25 – 75	>17	Veoma plastično

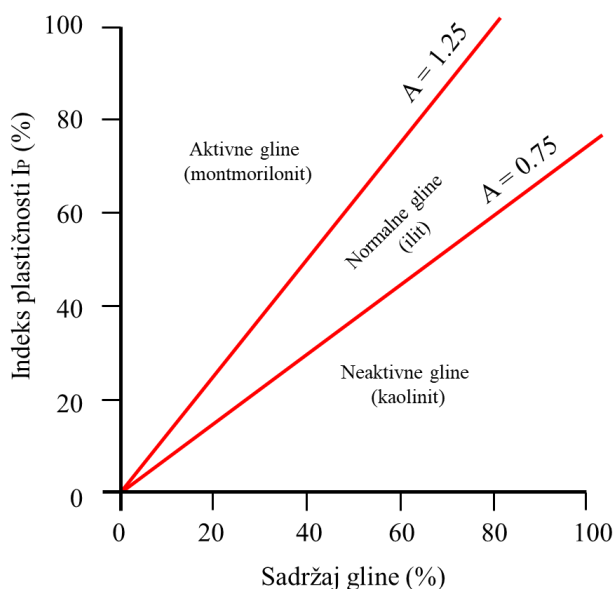
Kao što je napomenuto, vrsta i količina minerala gline imaju značajan uticaj na granice konzistencije i druge mehaničke karakteristike prašinastog i glinovitog tla. Zbog toga su granice konzistencije jako korisne u praksi jer omogućavaju procenu mehaničkih svojstava tla na jednostavan i brz način.

Kada govorimo o sitnozrnom tlu jako je bitno razdvojiti uticaj vrste minerala gline od uticaja količine gline u tlu. Stoga je uveden pojam indeks aktivnosti glina ili koloidna aktivnost glina (A) koju je predložio Skempton (1953). Aktivnost glina predstavlja odnos indeksa plastičnosti i sadržaja frakcije gline u uzorku tla, odnosno udeo čestica manjih od 0.002 mm, izražen u procentima.

$$A = \frac{I_P}{N_{0.002}} \quad (5.6)$$

Gde  $N_{0.002}$  predstavlja sadržaj čestica manjih od 0.002 mm.

Kod mnogih glinovitih tla, gde indeks plastičnosti i frakcija gline variraju u širokim granicama, aktivnost gline je približno konstantna. Na jednostavan način se može proceniti mineraloški sastav tla na osnovu indeksa aktivnosti gline prikazan na Slici 5.3.



Slika 5.3. Dijagram aktivnosti gline

Pored osnovnog dijagrama Janbu je 1989. godine izneo direktne podatke aktivnosti gline i njihove vrednosti za neke minerale prikazane u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Klasifikacija (vrsta) minerala prema aktivnosti (Janbu, 1989)

Minerali	Aktivnost gline	Klasifikacija aktivnosti
<i>Kvarc</i>	0	
<i>Kalcit</i>	0.18	Slaba aktivnost ( $A < 0.75$ )
<i>Muskovit</i>	0.23	
<i>Kaolinit</i>	0.33-0.40	
<i>Ilit</i>	0.9	Srednja aktivnost 0.75 – 1.25
<i>Montmorilonit sa Ca</i>	1.50	Aktivna tla ( $A > 1.25$ )
<i>Montmorilonit sa Na</i>	7.20	

**Indeks konzistencije** –  $I_C$  predstavlja odnos razlike granice tečenja i prirodne vlažnosti i razlike granice tečenja i granice plastičnosti:

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_P} \quad (5.7)$$

Na osnovu Terzagijeve podele stanja plastične konzistencije izdvojene su sledeće vrednosti indeksa konzistencije (Tabela 5.4):

Tabela 5.4. Vrednosti indeksa konzistencije (Terzaghi, 1925)

Stanje konzistencije	Indeks konzistencije $I_c$	Opis konzistentnog stanja
<i>za stanje tvrde plastičnosti</i>	1.0 – 0.75	Ne može se utisnuti palac, ali može vrh zaoštrene olovke
<i>za stanje mekane plastičnosti</i>	0.75 – 0.50	Palac se može utisnuti sa većim naporom
<i>za stanje vrlo mekane plastičnosti</i>	0.50 – 0.25	Može se utisnuti palac
<i>za stanje tečne plastičnosti</i>	0.25 – 0	

Na osnovu Aterberga polučvrsta tla sa indeksom konzistencije  $I_c = 1.00 - 1.25$  se praktično ne deformišu pod opterećenjima koja se mogu naneti rukom ili zašiljenim predmetom i  $I_c > 1.25$ , tvrda tla, praktično nedeformabilna za tipična opterećenja od građevina uobičajenih dimenzija.

Ukoliko je indeks konzistencije veći od 1 i ako je  $w > w_s$ , tlo je u polučvrstom stanju, a ako je indeks konzistencije veći od 1 i  $w < w_s$  tlo je u čvrstom stanju konzistencije.

**Indeks tečenja** –  $I_L$  predstavlja odnos između viška vode u tlu i indeksa plastičnosti:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (5.8)$$

Prema Casagrande-u (1932) data je osnovna podela tla prema indeksu tečenja u Tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Klasifikacija tla na osnovu indeksa tečenja (Casagrande, 1932)

Vrednost ineksa tečenja $I_L$	Klasifikacija tla
$I_L < 0$	Tvrda tla, koja se nalaze u čvrstom stanju konzistencije
$0 < I_L < 1$	Tlo je u plastičnom stanju konzistencije
$I_L > 1$	Tlo je u tečnom stanju konzistencije

### 5.1.5. Senzitivnost glina

Kod mnogih prirodno taloženih glinovitih tla, nedrenirana smičuća čvrstoća može biti umanjena zbog otežanog načina uzorkovanja, odnosno ispitivanja takozvanih prerađenih uzoraka, iako se oni ispituju pri nepromenjenom sadržaju vode – prirodnoj vlažnosti. Ovo svojstvo glinovitih tla naziva se senzitivnost ili osetljivost ( $S_t$ ). Zbog toga senzitivnost glina predstavlja odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće neporemećenog uzorka i nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenog uzorka pri istoj vlažnosti (prirodna vlažnost tla). Terzaghi (1944) je senzitivnost definisao na osnovu jednoaksijalnog opita kao:

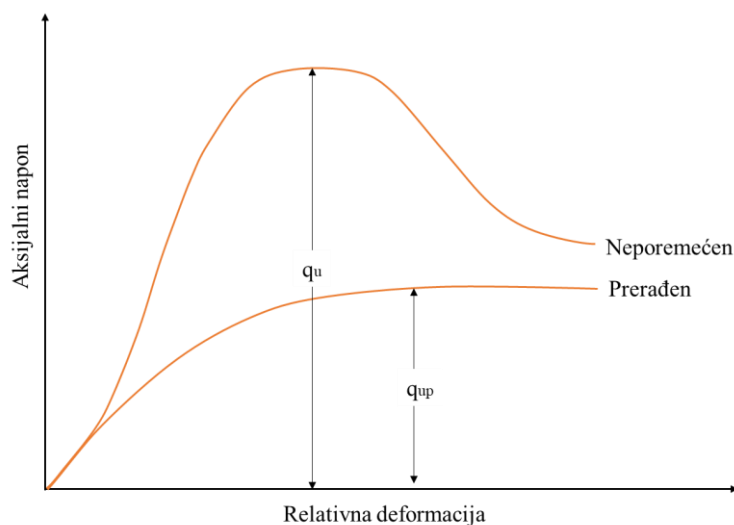
$$S_t = \frac{c_u}{c_{up}} \quad (5.9)$$

Gde je:

$c_u$  – nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka i

$c_{up}$  – nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka bez promene vlažnosti.

Prilikom izvođenja jednoaksijalnog opita pripremaju se neporemećeni i prerađeni uzorci pri istoj vlažnosti-prirodnoj (Slika 5.4.). Nekada prilikom pripreme prerađenog uzorka nedrenirana smičuća čvrstoća može da bude toliko mala, tj. prirodna vlažnost samog uzorka je mala pa se uzorci za izvođenje jednoaksijalnog opita nekada ne mogu ni formirati. Stoga se u praksi preporučuje primena drugih opita kao što su krilna sonda koja se može primeniti i u laboratoriji i na terenu ili opit džepnog penetrometra i padajućeg konusa koji je primenjen u ovoj doktorskoj disertaciji.



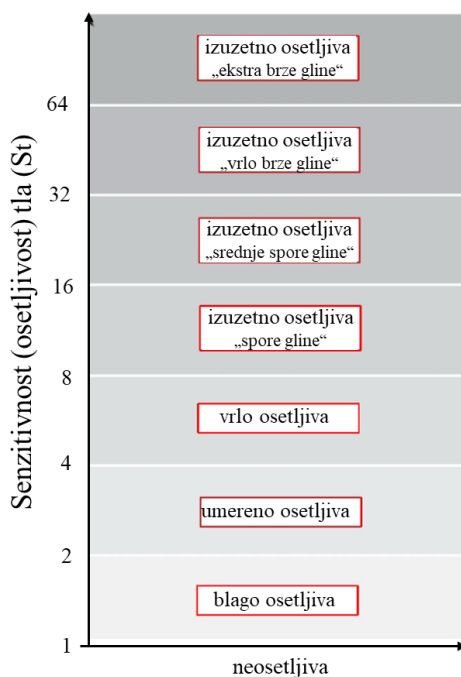
Slika 5.4. Šematski prikaz rezultata jednoaksijalnog opita na neporemećenim i prerađenim uzorcima

Prema Skempton-u i Northey-u (1952), većina glina, osim jako prekonsolidovanih glina, gubi deo svoje čvrstoće kada se ponovo oblikuje. Autori su predložili klasifikaciju senzitivnosti glina prikazanu u Tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Skempton i Northey (1952) klasifikacija

Senzitivnost $S_t$	Opis gline u tlu
1	Neosetljive gline
1 – 2	Slabo osetljive gline
2 – 4	Srednje osetljive gline
4 – 8	Osetljive gline
8 – 16	Ekstra osetljive gline
>16	Ekstremno osetljive gline

Podela tla prema senzitivnosti glina prema Rosenqvist (1953) data je na Slici 5.5.

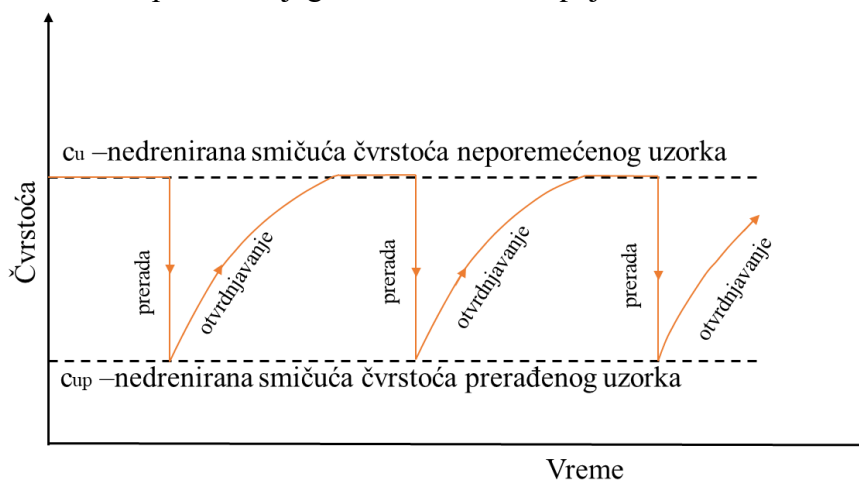


Slika 5.5. Podela tla prema senzitivnosti glina

Stepen osjetljivosti većine glina se kreće između 1 i 8, međutim, vrlo flokulentne naslage morske gline mogu imati znatno veću osjetljivosti koja se kreće u rasponu od 10 do 80. Kezdi (1974) je zaključio da normalno konsolidovane gline imaju senzitivnost između 2 i 4. Danas se najviše koristi klasifikacija tla na osnovu senzitivnosti koju daje švedski standard čija je podela prihvaćena na osnovu Jambua (1989). Oni klasifikuju tlo na:

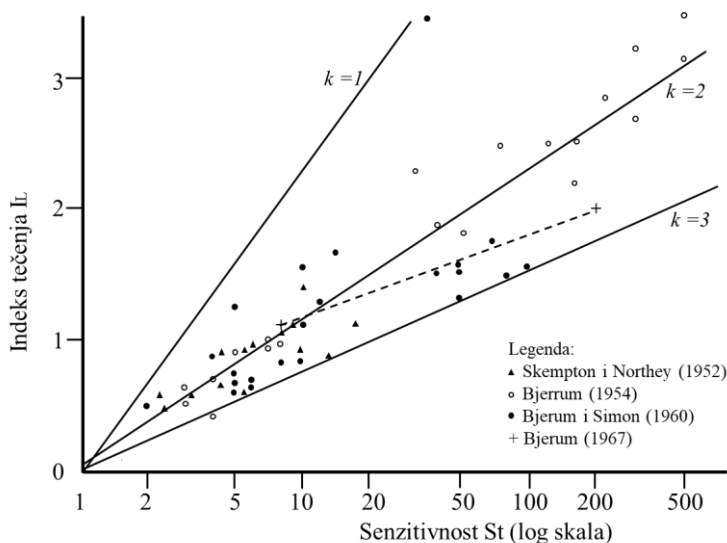
1. Visoko osjetljive gline čija je osjetljivost veća od 30,
2. Srednje osjetljive između 8-30 i
3. Nisko osjetljive gline koje imaju osjetljivost manju od 8.

Smanjenje nedrenirane čvrstoće usled prerade glinovitog tla, uzrokovano je prvenstveno uništavanjem strukture čestica gline koja je formirana tokom prvobitnog procesa taloženja. Ako se, međutim, nakon ponovnog preuređenja uzorak drži u neporemećenom stanju (tj. bez ikakvih promena vlažnosti), vremenom će se povećati njegova čvrstoća. Ova pojava se naziva tiksotropija (Slika 5.6.).



Slika 5.6. Šematski prikaz tiksotropije tla

Gline koje imaju ekstremnu i visoku osetljivost treba veoma pažljivo tretirati. One obično poseduju nevezanu strukturu i prilikom prerade [se mogu privremeno pretvoriti u viskozne tečnosti pa se često nazivaju i „Brze gline“. Na osnovu eksperimentalnih podataka prikupljenih iz različitih delova sveta (Slika 5.7.), uočava se jasan trend rasta osetljivosti tla sa povećanjem indeksa tečenja ( $I_L$ ).



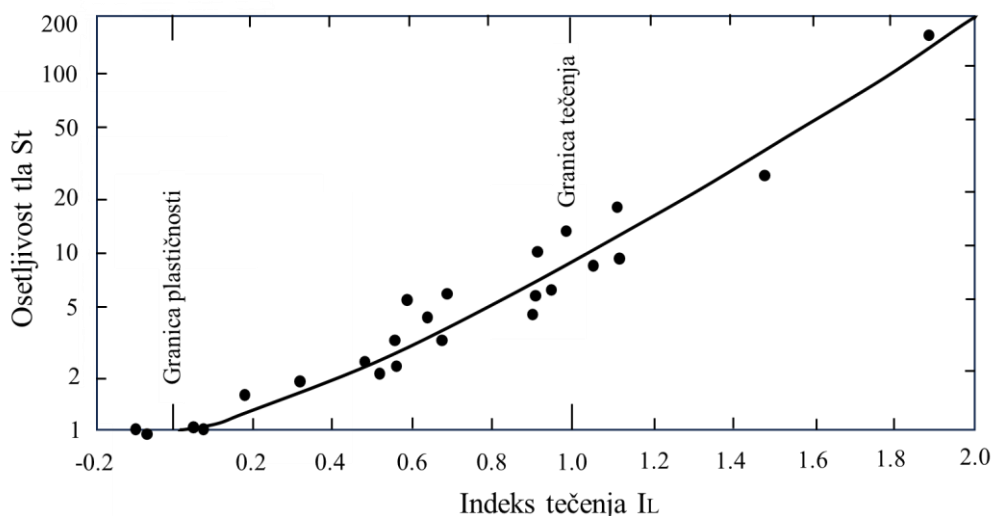
Slika 5.7. Senzitivnost u odnosu na indeks tečenja (Wood, 1990)

Za specifične tipove tla, poput norveških gline, ovaj odnos se može matematički definisati eksponencijalnom funkcijom (Bjerrum, 1954):

$$S_t = e^{kI_L} \quad (5.10)$$

Gde je k faktor materijala dobijen eksperimentalnim putem.

Carter i Bentley (1990) su isto u svojim istraživanjima istakli da senzitivnost raste sa porastom indeksa tečenja kao u okviru plastičnog stanja ( $0 < I_L < 1$ ), materijali pokazuju relativno nisku senzitivnost, jer je njihova struktura još uvek stabilna i otporna na poremećaje. Tek kad tlo pređe ka tečnom stanju ( $I_L > 1$ ) (Slika 5.8.).



Slika 5.8. Odnos indeksa tečenja i senzitivnosti (Carter i Bentley, 1990)

### 5.1.6. Edometarski opit

Razvoj edometarskog aparata i opita konsolidacije usko je povezan sa razvojem mehanike tla i potrebom da se objasni ponašanje sitnozrnog tla pod dugotrajnim opterećenjem. Pojam konsolidacije prvi je u inženjerskoj praksi upotrebio Thomas Telford još 1809. godine, kada je u svom radu primenio princip predopterećenja tla radi smanjenja kasnijih sleganja (Terzaghi i sar., 1996). Ova ideja predstavljala je osnovu za kasnija eksperimentalna i teorijska istraživanja procesa konsolidacije. Početkom XX veka javila se potreba za laboratorijskim ispitivanjem ovog fenomena, te je 1901. godine razvijen prvi aparat kojim se određivala konsolidacija. Dalji napredak ostvaren je 1910. godine, kada je D. E. Morgan uveo plutajući prsten, čime je unapređena tačnost merenja vertikalnih deformacija uzorka tla (Das, 2014). Konačno, 1923. godine Karl Terzaghi je razvio teoriju jednodimenzionalne konsolidacije za tla slabe vodopropustljivosti, čime je postavljen teorijski temelj savremene mehanike tla (Terzaghi, 1925).

Na osnovu ovih istraživanja razvijen je edometarski aparat, koji se danas koristi za laboratorijsko ispitivanje stišljivosti i konsolidacije tla. Stišljivost tla predstavlja osobinu prema kojoj se, usled delovanja opterećenja i istiskivanja vode iz pora, smanjuje zapremina tla uz istovremeno povećanje efektivnih napona. Pri trenutnom nanošenju spoljašnjeg opterećenja u zasićenom tlu dolazi do pojave pornih pritisaka, koji u početku preuzimaju veći deo opterećenja. Vremenom, usled isticanja vode iz pora, porni pritisci opadaju, što dovodi do povećanja efektivnih napona. U toku ovog procesa voda se istiskuje iz pora, pri čemu se ona ne zamenjuje vazduhom, već dolazi do smanjenja količine vode u potpuno zasićenom tlu. Kao posledica toga dolazi do smanjenja zapremine tla i pojave sleganja. Ovaj vremenski proces, koji obuhvata smanjenje pornih pritisaka, povećanje efektivnih napona i redukciju zapremine, naziva se konsolidacija, dok se sleganje koje se odvija u tom periodu naziva konsolidaciono sleganje. Suprotan proces jeste bubrenje, koje nastaje usled povećanja zapremine pora i porasta količine vode. Treba naglasiti da priroda tla ne omogućava postojanje idealno neprekidnog medijuma, što znači da svaka promena stanja tla izaziva novu promenu, odnosno da svaka promena zapremine pora neminovno dovodi do promene ukupne zapremine.

Ovaj opit omogućava razumevanje reakcije tla na različita opterećenja koja se mogu javiti u stvarnim građevinskim uslovima. Uzorci koji se koriste za izvođenje ispitivanja su neporemećeni i cilindričnog oblika sa manjom visinom u odnosu na prečnik. Oni se ugrađuju u prsten edometarskog aparata pomoću specijalnog cilindričnog noža. Ugrađeni uzorak je standardnih dimenzija: prečnika  $R$  i visine  $h$  (Slika 5.9.). Tokom ispitivanja uzorak se izlaže postepenim, unapred definisanim opterećenjima (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa.). Opterećenje se obično prenosi tegovima. Tokom svakog koraka meri se promena visine uzorka, odnosno njegova deformacija. Merenja se obavljaju u pravilnim vremenskim intervalima, sve dok se ne postigne konačna konsolidacija. Na osnovu registrovanih deformacija izrađuje se konsolidaciona kriva koja prikazuje ponašanje tla pod opterećenjem tokom vremena. Ispitivanje se izvodi u skladu sa standardom SRPS EN ISO 17892-5. Edometarski aparat koji je korišćen za potrebe ove disertacije (Slika 5.9.) se sastoji od:

- Metalnog edometarskog prstena poznatih unutrašnjih dimenzija u koji se ugrađuje uzorak,
- Filter pločice koje su ravne i čiste, izrađene od materijala koji omogućavaju slobodno dreniranje vode, ne podležu koroziji i koje su dovoljne debljine da ne pucaju pod opterećenjem.
- Čelija aparata izrađena od metala, koja se sastoji od tela ćelije koji prihvata prsten, metalnog oslonca kojim se prsten fiksira za telo ćelije.
- Ploča za opterećenje kojom se zatvara ćelija i kojom se prenose sile.

- Sistem za prenos opterećenja, koji ima krutu podlogu na koju se stavlja ćelija i drugi deo koji radi po principu poluge i omogućava prenos vertikalnih napona koji deluju centralno na poklopac ćelije.
- Komparater za merenje vertikalnih deformacija, manuelni ili digitalni sa opsegom čitanja od najmanje 10 mm i rezolucijom minimum 0.01 mm.



Slika 5.9. Izgled korišćenog edometarskog aparata (Izvor: Laboratorija RGF-a)

Pored opisanog klasičnog edometarskog aparata, u novijim laboratorijama sve češće se koriste automatski edometarski sistemi, kod kojih su klasični tegovi zamenjeni pneumatskim, hidrauličkim ili elektromehaničkim sistemima za primenu vertikalnog opterećenja. Ovi sistemi omogućavaju precizniju i stabilniju kontrolu napona. Takođe, savremeni edometri su opremljeni digitalnim senzorima pomeranja i softverima za kontinuirano praćenje i obradu podataka, čime se smanjuje mogućnost greške pri očitavanju. Uprkos ovim unapređenjima, osnovni princip rada edometarskog aparata ostaje nepromenjen i zasniva se na jednodimenzionalnoj deformaciji uzorka tla pri kontrolisanim uslovima.

Na osnovu obavljenog edometarskog opita i iscrtane konsolidacione krive možemo odrediti:

- Vremenski tok sleganja,
- Koeficijent konsolidacije  $c_v$ ,
- Modul stišljivosti  $M_v$  i koeficijent stišljivosti  $a_v$ ,
- Indeks kompresije  $C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'$  i indeks rekompresije  $C_r = -\Delta e / \Delta \log \sigma'$ ,
- Koeficijent sekundarne kompresije  $C_\alpha$ ,
- Napon prekonsolidacije  $\sigma'_p$  i
- Step prekonsolidacije  $OCR$ .

Za izradu ove doktorske disertacije edometarski opit je korišćen u svrhu utvrđivanja istorije opterećenja i stepena prekonsolidacije ispitivanih uzoraka. Prilikom određivanja napona prekonsolidacije korišćena je metoda Kasagrandea.

## 5.2. Laboratorijska ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće tla

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla u laboratoriji je određena opitom padajućeg konusa, opitom jednoaksijalne kompresije, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom. Ispitivanja su rađena na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla.

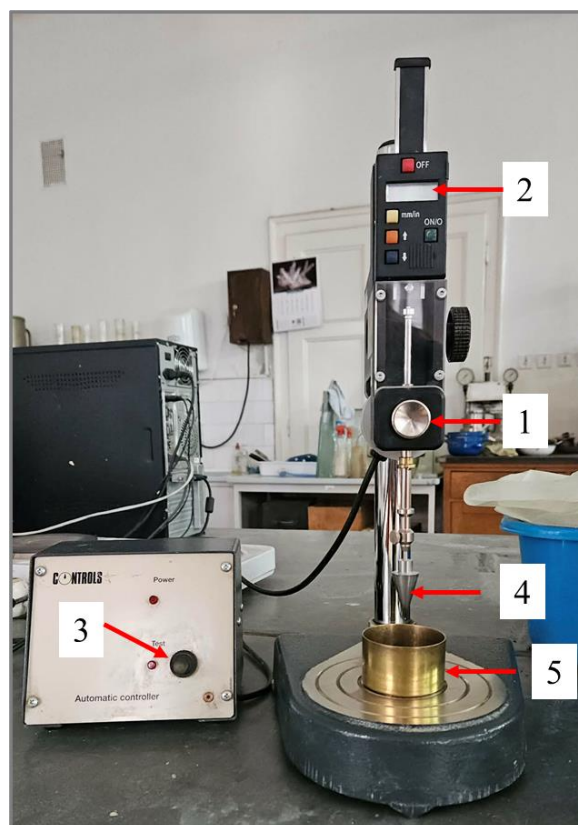
Neporemećeni uzorci tla su za sve metode pripremljeni vađenjem uzorka iz bloka pomoću cilindra odgovarajućih dimenzija i poznate zapremine. Prilikom sečenja i formiranja uzorka vodilo se računa da ne dođe do deformacija i pucanja uzorka. Kada se uzorak utisne u cilindar, njegovi krajevi se obrađuju nožem dok se ne dobije skroz ravna površina. Nakon toga se uzorak iz cilindra vadi, mere se njegove dimenzije (visina i prečnik) i kao takav se dalje koristi za ispitivanje. Jako je važno da se kod neporemećenih uzoraka očuva prirodna struktura i sadržaj vode u meri u kojoj je to moguće prilikom vađenja.

Prerađeni uzorci tla se dobijaju tako što se prirodni uzorak u potpunosti usitni, suši na vazduhu, zatim dovede na željeni sadržaj vode i kao takav se ostavi najmanje 24h da se homogenizuje. Nakon toga uzorak se za pripremu opita stavlja u odgovarajući cilindar i oblikuje na isti način kao i neporemećeni uzorak. Prilikom izvođenja jednoaksijalnog opita ispitivanja su vršena pri istoj (prirodnoj) vlažnosti na prerađenom i neporemećenom uzorku, kako bi se definisao senzitivitet. Kod opita padajućeg konusa prerađeni uzorci su utisnuti u cilindričnu posudu aparata, a ispitivanja su vršena za različit sadržaj vode, kao i za prirodnu vlažnost tla. Prilikom određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće opitom džepne krilne sonde i džepnog penetrometra uzorci su pripremani na isti način kao i kod izvođenja opita padajućeg konusa. Za razliku od prirodnih uzoraka, prerađeni nemaju mikrostrukturu, ali se na taj način obezbeđuju jednolikost i ponovljivost ispitivanja, kao i mogućnost određivanja senzitivnosti tla.

Navedene laboratorijske metode ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće tla su opisane u narednim poglavljima.

### 5.2.1. Opit padajućeg konusa

Opit padajućeg konusa, odnosno opit penetracije konusom, razvijena je između 1914. i 1922. godine od strane „Geotehničke komisije švedskih državnih železnica“ (Swedish Railways, 1922), pod rukovodstvom sekretara komisije Johana Olssona, kao jednostavna, brza i tačna metoda za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće, senzitivnosti tla, granice tečenja i plastičnosti. Kasnije je Hansbo (1957) dao teorijsku osnovu za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće, uvodeći konstantu konusa  $c$  koja povezuje dubinu penetracije sa nedreniranom smičućom čvrstoćom. U poređenju sa drugim metodama ispitivanja, opit padajućeg konusa je izuzetno jednostavan i zato je našao široku primenu u u geotehničkoj praksi u skandinavskim zemljama. Danas je ovaj opit postao evropski priznat za određivanje granice tečenja i predstavlja alternativu tradicionalnom Kasagrandovom postupku. Aparat sa padajućim konusom se sastoji od sledećih komponenti (Slika 5.10.).



Slika 5.10. Padajući konus - „fall cone test“ (Izvor: Laboratorija RGF-a)

1. Mehanizam za vertikalno podešavanje,
2. Merni uređaj koji elektronski meri dubinu prodiranja konusa,
3. Dugme koje omogućava da konus slobodno pada sa određene visine,
4. Metalni konus koji je standardnih dimenzija i
5. Posuda za uzorak cilindričnog oblika standardnih dimenzija.

Opit padajućeg konusa se zasniva na merenju dubine prodiranja konusa određenog ugla i težine u uzorak tla. Konus se postavlja iznad površine pripremljenog uzorka. Uzorak može da bude prerađen ili neporemećen. Prerađen uzorak se nalazi u posudi cilindričnog oblika (posuda je standardnih dimenzija), a neporemećeni uzorak se uzima iz većeg uzorka tla pomoću cilindra koji je obično prečnika 50 mm i visine 33 mm. Elektronskim putem, pritiskom dugmeta na aparatu konus se pušta da slobodno pada pod sopstvenom težinom kroz zadato vreme od 5 sekundi. Dubina prodiranja konusa (penetracija) se meri na uređaju u milimetrima sa tačnošću od 0.1 mm, a dubina prodiranja konusa zavisi od čvrstoće tla i njegove vlažnosti. Kada je tlo mekše konus prodire dublje i penetracija je veća, dok je kod tvrdih uzoraka obrnuto. Ovaj postupak se ponavlja za uzorke sa različitim sadržajem vode kako bi se dobila kriva zavisnosti između dubine penetracije i vlažnosti tla. Koji konus treba koristiti zavisi od vrste tla koje se ispituje. Na osnovu standarda SRPS EN ISO 17892-6 postoji pet vrsta konusa (Tabela 5.7.).

Tabela 5.7. Vrste konusa prema standardu SRPS EN ISO 17892-6

	I	II	III	IV	V
<b>Masa konusa (g)</b>	10	60	80	100	400
<b>Tip konusa (°)</b>	60	60	30	30	30

Prilikom određivanja granice tečenja koriste se konusi od 60°/60g i 30°/80g (SRPS EN ISO 17892 - 12), dok se za određivanje granice plastičnosti prema Wroth i Wood (1978) koristi konus od 30°/240g. Za određivanje nedrenirane čvrstoće mogu se koristiti svi tipovi konusa dati u tabeli 5.7. Rezultati ispitivanja kod neporemećenih uzoraka zavise od kvaliteta uzorka i ne moraju u potpunosti odražavati prirodno stanje, ali se mogu koristiti kao relevantan podatak u analizi. Za potrebe istraživanja korišćeno je više tipova konusa: 60°/60g, 60°/80g, 30°/80g, 30°/100g, 30°/240g i 30°/400g.

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla prerađenog i neporemećenog uzorka se određuje prema sledećoj jednačini 5.11:

$$c_u = \frac{cQ}{h^2} \quad 5.11$$

Gde je:

$c_u$  – nedrenirana smičuća čvrstoća tla za poremećeni ili neporemećeni uzorak (kPa),

$c$  – konstanta koja zavisi od tipa konusa (mase, ugla, geometrije),

$Q$  – težina konusa (N), koja se računa na osnovu mase konusa  $m$  (g) i ubzanja zemljine teže  $g$  ( $m/s^2$ ) i

$h$  – penetracija konusa (mm).

Veliki broj istraživanja posvećen je određivanju vrednosti konstante  $c$  na osnovu teorijske i numeričke analize ispitivanja slobodnim padom konusa. Hansbo (1957) je utvrdio da se vrednost konstante  $c$  kreće između 0.8 i 1.0 za konus od 30° i između 0.2 i 0.3 za ugao konusa od 60°. Wood (1990) je za konstantu  $c$  dobio vrednost od 0.85 za konus ugla 30° i 0.29 konus 60°. Koumoto i Houlsby (2001) su detaljnije analizirali konstantu  $c$ . Oni su ustanovili da na konstantu  $c$  utiču hrapavost površine konusa, geometrija i brzina deformacije uzorka tla tokom penetracije konusa ili izdizanje tla oko konusa prilikom penetracije. Prilikom penetracije dolazi do deformacije površine tla koja se nalazi u cilindričnom kalupu, što može da utiče na tačnost rezultata (Slika 5.11.). Za izračunavanje konstante  $c$  i analizu deformacija tla oko konusa tokom penetracije koristi se teorija kliznih linija (slip-line teorija). Ova teorija se zasniva na pretpostavci da je tlo kruto-plastično i da deformacije prate mrežu kliznih linija (slip-lines), što omogućava da se izračuna faktor nosivosti tla ispod konusa  $N_{ch}$ . Pomenuti faktor se koristi za određivanje konstante  $c$  koja se može izraziti preko sledeće jednačine:

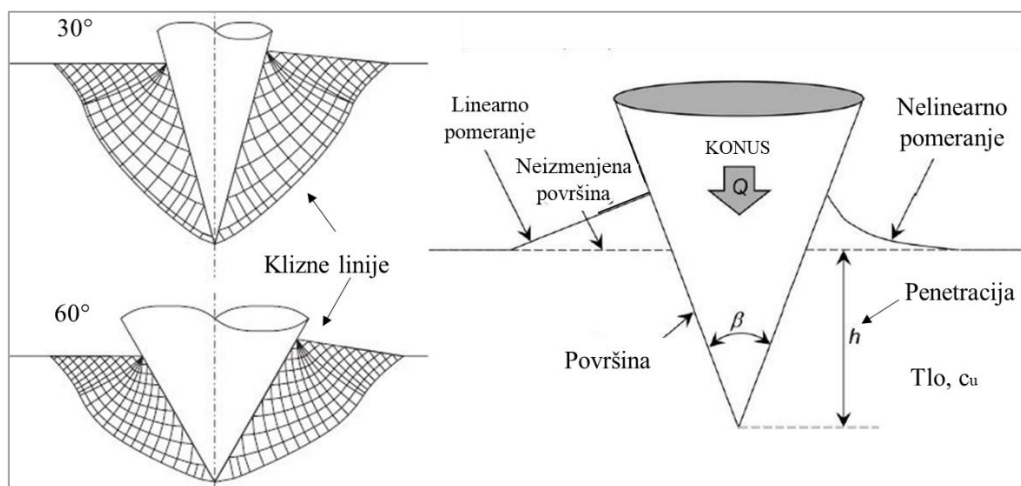
$$c = \frac{3\zeta}{\pi N_{ch} \tan^2(\beta/2)} \quad (5.12)$$

Gde je:

$N_{ch}$  – faktor nosivosti tla ispod konusa,

$\beta$  – ugao konusa i

$\zeta$  – odnos statičke i dinamičke čvrstoće tla.



Slika 5.11. Šematski prikaz konusa i kliznih linija (Koumoto i Houlsby, 2001)

Za konus ugla 60°, efekat deformacije je zanemarljiv, dok se kod konusa ugla od 30° javljaju greške i do 10% u proceni konstante  $c$ . Koumoto i Houlsby (2001) su za konstantu  $c$  usvojili 0.31 za konus ugla 60°, a za konus ugla od 30° su eksperimentalno dobili vrednost od 0.8-0.85.

Evropski standard, kao i naš standard SRPS EN ISO 17892-6 je usvojio srednje vrednosti višedecenijskih ispitivanja, na osnovu teorijskih i eksperimentalnih analiza sprovedenih u različitim istraživačkim centrima, kako bi se minimizirale greške u proceni nedrenirane čvrstoće tla. Za konus mase 80g i uglom od 30° konstanta  $c$  je 0.8, a za konus mase 60g i uglom od 60° konstanta  $c$  je 0.27. Za neporemećene uzorke konstanta  $c$  je 1.0 za konus tipa 30°/80g, dok za konus od 60°/60g nije data. Iz tog razloga, na osnovu teorija Koumoto i Houlsby (2001), primenjena je vrednost konstante  $c$  od 0,3 za neporemećene uzorke pri ispitivanju konusom tipa 60°/60g. Usvojene vrednosti za konstantu  $c$  u ovim istraživanjima su date u Tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Usvojene vrednosti konstante  $c$

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Konstanta $c$ za neporemećene uzorke	0.3	0.3	1	1	1
Konstanta $c$ za prerađene uzorke	0.27	0.27	0.81	0.8	0.8

Za konus tipa 30°/80g usvojena je konstanta  $c$  od 0.81 da bi vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće na granici tečenja za konus 30°/80g i 60°/60g bile jednake.

Prema empirijskom iskustvu, vrednosti dobijene nedrenirane čvrstoće se mogu korigovati na isti način kao i za opit krilnom sondom. Uvodi se korekcionni faktor  $\mu$  za neporemećene uzorke (SRPS EN ISO 17892-6).

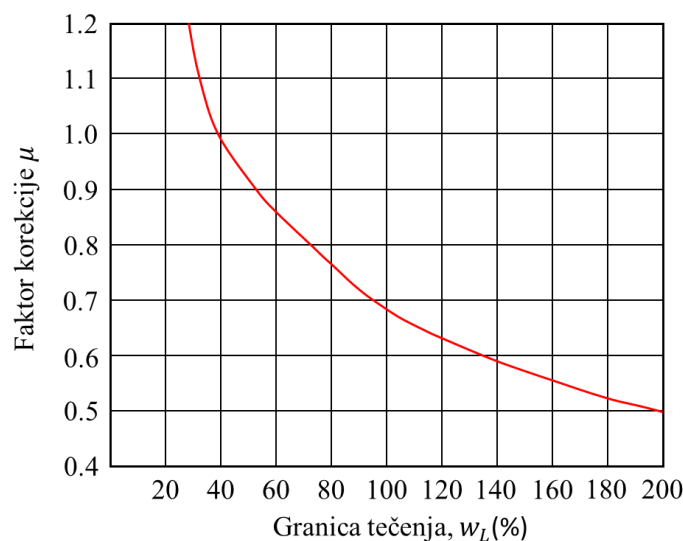
$$c_{ucor} = c_u \cdot \mu \quad \mu = \left( \frac{0.43}{W_L} \right)^{0.45} \quad (5.13)$$

Gde je:

$\mu$  – korekcionni faktor koji se kreće između  $0.5 \leq \mu \leq 1.2$ ,

Ranija istraživanja su davala manje vrednosti korekcionnog faktora  $\mu$  (poglavlje 2.2), ali se ona više odnose na krilnu sondu.

U literaturi postoji veliki broj dijagrama koji daju različite vrednosti za koeficijent  $\mu$ , posebno kada se koristi krilna sonda. Svi dijagrami imaju sličan trend a to je da faktor korekcije  $\mu$  opada sa porastom granice tečenja  $w_L$ . Larsson i sar. su 1984. god. predstavili krivu zavisnosti korekcionog faktora  $\mu$  i granice tečenja  $w_L$  koja se i danas koristi u evropskom standardu, a i kod nas (Slika 5.12.).



Slika 5.12. Odnos faktora  $\mu$  i granice tečenja  $w_L$  (Larsson i sar., 1984)

Prema Karlsson-u (1961) granica tečenja se može odrediti na osnovu jednačine:

$$w_L = M \cdot w + N \quad (5.14)$$

Gde su M i N konstante koje su tabelarno date za odgovarajuću penetraciju koja mora da odgovara opsegu između 7 i 15 mm (Tabela 5.9). Ove vrednosti su relevantne za konus mase 60 g i ugla  $60^\circ$ .

Tabela 5.9. Relevantne vrednosti za konstante M i N za metodu koja koristi konus  $60^\circ/60g$  (Karlsson, 1961)

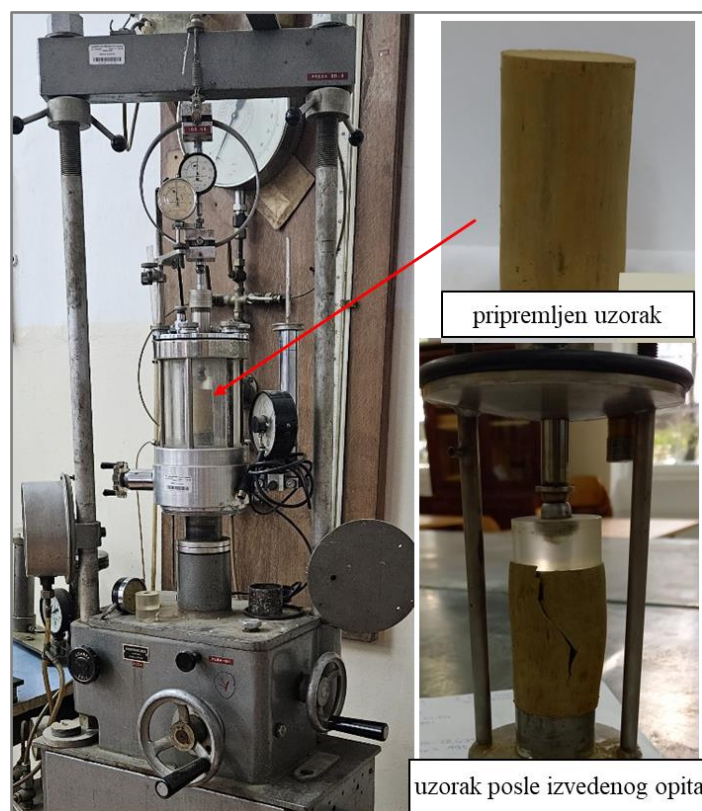
h (mm)	Const.	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
7	M	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.14	1.13
	N	-3.5	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2
8	M	1.12	1.11	1.11	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07	1.07	1.06
	N	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
9	M	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00
	N	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
10	M	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96
	N	$\pm 0.0$	+0.1	+0.2	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.5	+0.6	+0.7
11	M	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92
	N	+0.7	+0.8	+0.9	+0.9	+1.0	+1.1	+1.1	+1.2	+1.3	+1.3
12	M	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89
	N	+1.4	+1.4	+1.5	+1.5	+1.6	+1.7	+1.7	+1.8	+1.8	+1.9
13	M	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86
	N	+1.9	+2.0	+2.0	+2.1	+2.1	+2.2	+2.2	+2.2	+2.3	+2.3
14	M	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84
	N	+2.4	+2.4	+2.5	+2.5	+2.5	+2.6	+2.6	+2.7	+2.7	+2.7

Na rezultate nedrenirane smičuće čvrstoće koji se dobijaju izvođenjem opita padajućeg konusa mogu da utiču: senzitivnost glina (pogotovo one sa visokom senzitivnošću), viskoznost glina (koja se menja sa sadržajem vode), struktura uzorka i brzina deformacija. Zbog brze deformacije tokom opita može doći do povećavanja izmerene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Za materijale koji su na granici plastičnosti i čija je vlažnost mala, kao i za čvrste gline preporučuje se korišćenje težih konusa kako bi se povećala dubina penetracije i kako bi merenja bila preciznija. Prilikom samog računanja vrednosti nedrenirane čvrstoće veliki uticaj ima i odabir konstante  $c$ .

### 5.2.2. Jednoaksijalni opit

Jednoaksijalni opit se prvi put počeo koristiti početkom XX veka. Karl Terzaghi (1925) je konstruisao prvi aparat, koji je kasnije Casagrande (1930-tih) standardizovao, a dalju modernizaciju su sprovedi Skempton i Henkel (1950tih) uvođenjem električne mehanizacije. Jednoaksijalni opit predstavlja jednu od najčešće korišćenih metoda za merenje nedrenirane smičuće čvrstoće. Uz to, posebne benefite donosi brzina izvođenja i sama ugradnja uzorka.

Jednoaksijalni opit se može izvoditi na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla koji su cilindričnog oblika prečnika 38 mm i visine 76 mm prema standardu (SRPS EN ISO 17892-7). Probna tela se ugrađuju u ćeliju aparata i zatim se oni opterećuju vertikalnom silom pritiska preko klipa aparata. Opterećenje se preko klipa nanosi konstantnom brzinom između 1% i 2% od visine uzorka u minuti (Slika 5.13.).



Slika 5.13. Jednoaksijalni opit - ćelija i uzorak pre i posle izvođenja opita (Izvor: Laboratorija RGF-a)

Promene visine ( $\Delta H$ ) uzorka su merene pri svakom koraku povećanja opterećenja tj. vertikalnih napona ( $\sigma$ ), što omogućava da se dobije kriva deformacije tla u zavisnosti od primenjenog opterećenja. Prema pomenutom standardu vertikalne deformacije i vertikalni napon se računaju na osnovu sledećih formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_i} \quad (5.15)$$

$$\sigma = \frac{P(1 - \varepsilon)}{A_i} \quad (5.16)$$

Gde je:

- $\varepsilon$  – relativne vertikalne deformacije,
- $\Delta H$  – promena visine uzorka (mm),
- $H_i$  – početna visina uzorka (mm),
- $P$  – vertikalna sila koja deluje na uzorak (N) i
- $A_i$  – početna površina poprečnog preseka uzorka (mm<sup>2</sup>).

Jednoaksijalna čvrstoća uzorka ( $q_u$ ) ili najveći vertikalni napon u trenutku loma ( $\sigma_1$ ), računa se kao maksimalno vertikalno opterećenje koji uzorak može da izdrži pre loma:

$$q_u = \frac{P_{max}}{A_i} \quad (5.17)$$

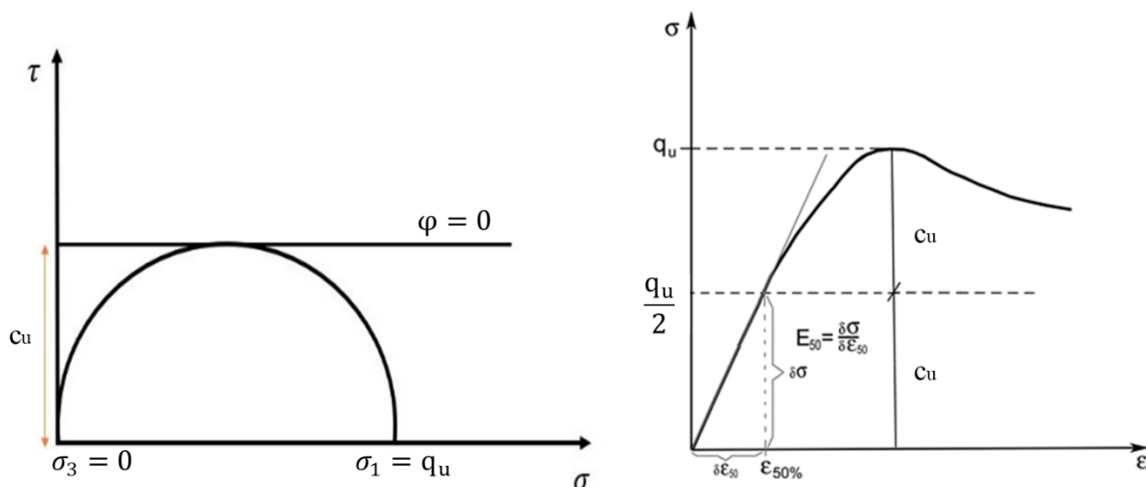
Ukoliko aksijalni napon nije jasno izražena, lom se može definisati najčešće pri 15% aksijalne deformacije.

Ako pogledamo Sliku 5.14, videćemo da se iz Kulon-Morovog kruga napona pri lomu nedrenirana čvrstoća računa kao polovina jednoaksijalne čvrstoće:

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (5.18)$$

Gde je:

- $q_u$  – jednoaksijalna čvrstoća tla (kPa) i
- $c_u$  – nedrenirana smičuća čvrstoća tla (kPa).



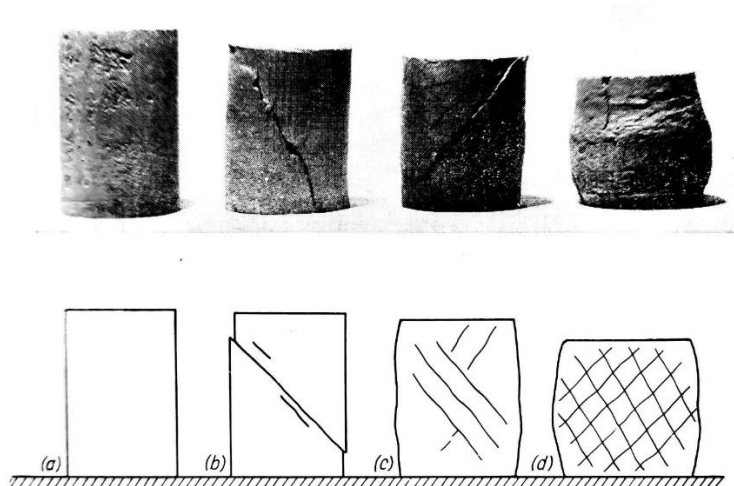
Slika 5.14. Anvelope loma iz jednoaksijalnog opita i dijagram relativnih deformacija

Prema vrednostima jednoaksijalne čvrstoće tla postoji osnovna podela tla prema konzistenciji (Tabela 5.10.)

Tabela 5.10. Odnos jednoaksijalne čvrstoće i konzistencije tla

Konzistencija	Jednoaksijalna čvrstoća tla (kPa)
<i>Veoma mekano</i>	< 25
<i>Mekano</i>	25 – 50
<i>Srednje mekano</i>	50 – 100
<i>Kruto</i>	100 – 200
<i>Veoma kruto</i>	200 – 400
<i>Tvrdo</i>	>400

Nakon izvedenog opita jednoaksijalne kompresije mogu se izdvojiti neki tipični lomovi na uzorcima tla (Slika 5.15). Kod tvrdih krutih materijala lom se najčešće dešava duž jedne definisane površine (Slika 5.15.b) dok se meke plastične gline lome ispupčenjem (Slika 5.15.d), a plastičan lom ima više linija loma (Slika 5.15.c).



Slika 5.15. Karakteristični lomovi a.) Uzorak pre testiranja b.) kruti lom c.) plastični lom d.) plastično tečenje – meki lom (Kezdi, 1974)

### 5.2.3. Džepni penetrometar

Džepni penetrometar prvi put počinje da se koristi tokom 1940-ih i 1950-ih godina, kada je Američka agencija za puteve razvila i standardizovala upotrebu ovog tipa instrumenta za brzu kontrolu kvaliteta sitnozrnog tla na terenu. Džepni penetrometar je posebno koristan u preliminarnim geotehničkim istraživanjima, gde se zahteva jednostavna i efikasna metoda procene nedrenirane smičuće čvrstoće tla. Ovo je jednostavan i prenosivi instrument, male mase i dimenzija koji omogućava da se  $c_u$  direktno odredi na terenu ili u laboratoriji. Tokom ovih istraživanja korišćen je model: CONTROLS Geotester Model 16-T0161 (Slika 5.16.). Sastoji se od čvrstog metalnog dela sa ugrađenim analognim brojčanikom koji se nalazi na glavi. Na brojčaniku je dugme koje služi za resetovanje kazaljke na nulu. Brojčanik poseduje dvostruku skalu koja omogućava precizno očitavanje kako niskih vrednosti penetracijskog otpora, tako i visokih. Unutrašnja skala ima opseg  $0 - 6 \text{ kg/cm}^2$  a spoljašnja  $0 - 11 \text{ kg/cm}^2$ . Na prednjem delu se nalazi navoj na koji može da se naviju nastavci koji imaju različite dimenzije. Nastavci mogu biti sledećih prečnika: 6.35 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm i 25 mm. Ovo omogućava upotrebu džepnog penetrometra za različite vrste tla, od vrlo mekih do tvrdih (Tabela 5.11).

Tabela 5.11. Primena različitih vrhova penetrometra

Prečnik nastavka (mm)	Površina vrha (cm <sup>2</sup> )	Primena
6.35 mm	0.317 cm <sup>2</sup>	Vrlo mekane gline, muljeviti sedimenti
10 mm	0.785 cm <sup>2</sup>	Mekane gline, glinovite prašine
15 mm	1.77 cm <sup>2</sup>	Srednje tvrde gline, slabo zbijeni kohezivni materijali
20 mm	3.14 cm <sup>2</sup>	Tvrde gline, glinoviti materijali sa većim otporom
25 mm	4.91 cm <sup>2</sup>	Gornja granica za ručnu penetraciju u sitnozrnim materijalima, preliminarna procena u zbijenijim glinama



Slika 5.16. Džepni penetrometar (Izvor: Laboratorija RGF-a)

Funkcionisanje penetrometra zasniva se na određivanju otpora koji tlo pruža pri kontrolisanom utiskivanju vrha penetrometra u uzorak tla. Ručnom silom se vrh utiskuje u tlo konstantnom brzinom. Tokom penetracije, otpor tla prenosi se na mehanizam unutar instrumenta, a odgovarajuća vrednost se očitava na brojaniku. Prema preporukama iz tehničkog uputstva proizvođača, vrh manjeg prečnika 6.35 mm se koristi za procenu jednoaksijalne čvrstoće, samim tim i procenu nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ), direktnim merenjem unutrašnje skale na brojaniku, a za vrh prečnika 10 mm se koristi spoljašnja skala na brojaniku.

#### 5.2.4. Džepna krilna sonda

Džepna krilna sonda (Torvane) služi za brzo ispitivanje nedrenirane smičuće čvrstoće. Džepna krilna sonda je lak prenosivi instrument koji omogućava in-situ i laboratorijsku kontrolu kvaliteta uzoraka odmah nakon vađenja uzorka, kada su mehaničke karakteristike tla najbliže prirodnim uslovima. Tokom ovih istraživanja korišćen je model: CONTROLS Geotester Model 16-T0175/A (Slika 5.17.).



Slika 5.17. Džepna krilna sonda (Izvor: Laboratorija RGF-a)

Džepna krilna sonda se sastoji od:

- kućišta sa torzionim mehanizmom (prenos preko opruge),
- merne skale ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) i
- nastavci sa različitim dimenzijama krilaca.

Svaka džepna krilna sonda poseduje tri vrste nastavaka: najveći nastavak koji se koristi kod jako mekih glina i muljeva i može izmeriti veličinu nedrenirane čvrstoće do 20 kPa, srednji nastavak koji se koristi za meke do umereno tvrde gline i meri veličinu nedrenirane čvrstoće do 100 kPa i najmanji nastavak se koristi kod tvrdih glina i meri nedreniranu smičuću čvrstoću do 250 kPa. Krilca na nastavcima imaju malu debljinu, čime se eliminiše vertikalni otpor probijanja i omogućava precizno merenje smičućeg otpora ispod pločice u sistemu opterećenja.

Merenje se izvodi utiskivanjem nastavka s krilcima u tlo, rotacijom kućišta u smeru kazaljke na satu sve dok ne dođe do loma tla. U trenutku loma, kućište naglo popušta pri čemu se očitava napon smicanja usled torzije. Potrebno je održavati aksijalni pritisak i istovremeno polako okrenuti kućište kako bi se primenio sve veći moment uvijanja pri konstantnoj brzini (5-10 sekundi). Nakon što dođe do loma tla tj. do dostizanja granične smičuće čvrstoće, potrebno je izvaditi krilnu sondu i zabeležiti referentnu vrednost. Kako mehanizam sadrži torzionu oprugu, maksimalni obrtni momenat koji se očitava na skali instrumenta se direktno konvertuje u vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće:

$$\tau_u = c_u = M_f K_{TV} \quad (5.19)$$

Gde je:

$M_f$  – maksimalni obrtni momenat ( $\text{kN}\cdot\text{cm}$ ) i

$K_{TV}$  – koeficijent karakterističan za dati nastavak.

Myslinska (2006) je izdvojio vrednosti koeficijenta u zavisnosti od prečnika nastavka (Tabela 5.12).

Tabela 5.12. Dimenzije nastavka i vrednosti koeficijenta koji se koristi prilikom ispitivanja (Myslinska, 2006)

Tip vrha	Konzistencija tla	Prečnik vrha D (mm)	Koeficijent $K_{TV}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
<i>Mali</i>	Polučvrsta do tvrdo plastična	20	2.5
<i>Srednji (normalni)</i>	Tvrdo plastična do plastična	26	1
<i>Veliki</i>	Meko plastična	48	0.2

### 5.3. Terenska ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla ( $c_u$ ) se pored laboratorijskih metoda može odrediti i terenskim opitima (in-situ). Terenskim opitima se ispituje veća zapremina tla u odnosu na laboratorijske opite pa je realno da „in situ“ opiti preciznije odražavaju uticaj makrostrukture na izmerene karakteristike. Postoji više tipova terenskih ispitivanja, od direktnih metoda koje mere nedreniranu smičuću čvrstoću do indirektnih metoda koje koriste empirijske korelacije. Najčešći terenski opiti koji se koriste za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće su: statički penetracioni opit (CPT i CPTu), standardni penetracioni opit (SPT), opit krilne sonde (FVT), presiometarski opit (PMT) i dilatometarski opit (DMT). Prilikom izbora metode za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće treba uzeti u obzir tip tla, dostupnu opremu, ciljeve ispitivanja i budžet. Generalno, nijedna metoda nije univerzalna, a praksa pokazuje da se najbolji rezultati dobijaju kombinovanjem više opita i poređenjem njihovih rezultata sa laboratorijskim ispitivanjima. U doktorskoj disertaciji analizirani su rezultati dobijeni opitom statičke penetracije (CPT) dok su svi navedeni opiti opisani u narednim poglavljima.

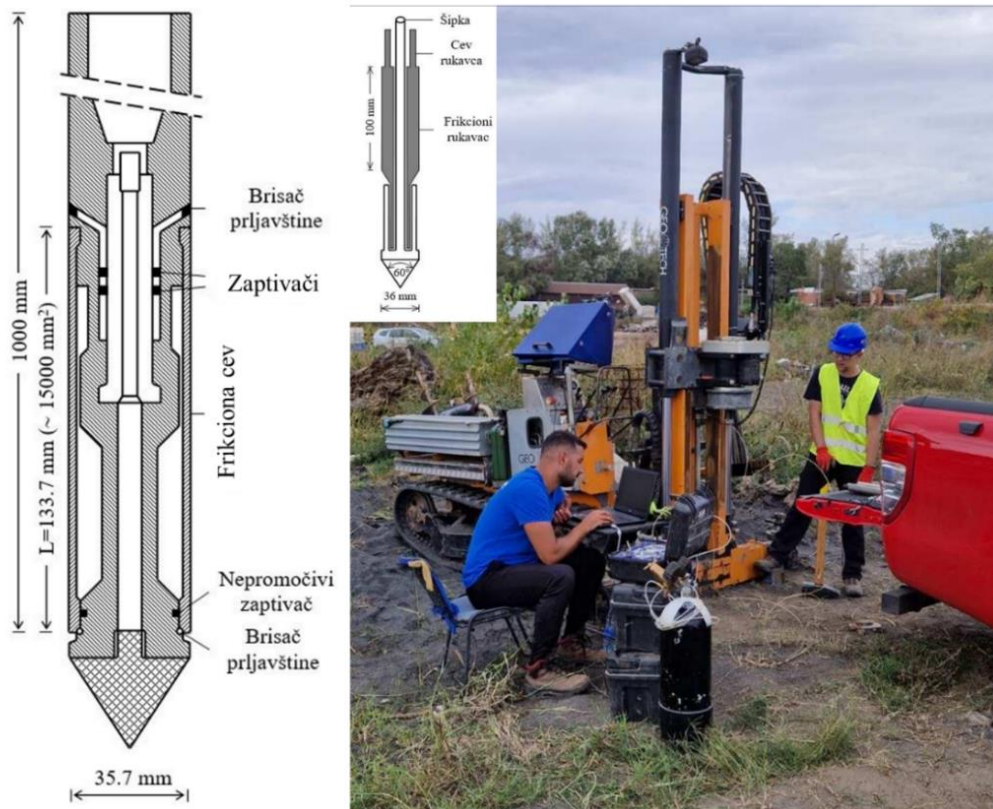
#### 5.3.1. Statički penetracioni opit (CPT i CPTu)

Statički penetracioni opit (CPT) se zasniva na utiskivanju konusa u tlo, pri čemu se meri otpor vrha konusa ( $q_c$ ) i bočno trenje duž omotača ( $f_s$ ) i penetracioni porni pritisci ( $u_2$ ). Opit se ne izvodi u bušotini već sa samostalnim uređajem direktno na terenu. Kod savremenih CPT opita meri se i porni pritisak ( $u$ ) tokom penetracije pomoću posebnih senzora. Uređaj za izvođenje opita sastoji se od hidrauličnog sistema za utiskivanje i izvlačenje konusa i šipki, kao i uređaja za merenje otpora konusa, ukupnog otpora, bočnog trenja i pornih pritisaka (Slika 5.18.) (SRPS EN ISO 22476-1).

Statički penetrometri mogu biti mehanički ili električni, u zavisnosti od vrste konusa koji se koristi i načina na koji se vrši akvizicija podataka.

- **Mehanički penetrometri** mere otpor tla u intervalima dubine od 10 do 20 cm.
- **Električni penetrometri** omogućavaju kontinuirano registrovanje otpora.

Nedrenirana smičuća čvrstoća određuje se primenom empirijskih i teorijskih korelacija na izmerene penetracione otpornosti.



Slika 5.18. Statički penetracioni opit – uređaj i izgled konusa

Prema Robertson-u (2009) statički penetracioni opiti daju pouzdanije rezultate od laboratorijskih ispitivanja pri proceni stvarnih čvrstoća tla. Veliki broj korelacija za računanje nedrenirane smičuće čvrstoće je razvijen koristeći i empirijske i teorijske pristupe. Kod teorijskih razlikujemo par pristupa (Salgado i sar., 2004; Huang i sar., 2004; Herrmann i Mello, 1994):

1. Metoda nosivosti (Bearing Capacity Method – BCM) – oslanja se na klasičnu teoriju nosivosti (Tercagijevu ili Majerhofovu). Kod ove teorije se pretpostavlja da je otpor konusa  $q_c$  analogan otporu temeljne ploče ili šipa u tlu. Nedrenirana čvrstoća smicanja se računa tako što se primeni koeficijent nosivosti  $N_k$  na odnos između  $q_c$  i vertikalnog napona.

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (5.20)$$

2. Metoda širenja šupljine (cavity expansion method - CEM) – ovom metodom se utvrđuje pritisak neophodan za širenje šupljine unutar određenog materijala. Teoriju širenja cilindrične šupljine u elastičnom, savršeno plastičnom materijalu su prvobitno predložili Bishop i sar. (1945), a proširena je od strane Vesića (1972). Teorija ekspanzirajuće šupljine, podrazumeva postojanje početne šupljine u tlu koja se nalazi u stanju statičke ravnoteže s okolnim naponima. Da bi se postiglo dalje širenje, neophodno je kontinuirano povećanje pritiska. Prema teoriji (Drucker i sar., 1951), pritisak u šupljini asimptotski teži graničnoj, odnosno stacionarnoj vrednosti, kako se njen poluprečnik približava beskonačnosti i formiranje šupljine iz nulte tačke (polazi od pretpostavke da u tlu inicijalno ne postoji šupljina), a proces ekspanzije započinje od poluprečnika jednakog nuli. Ovaj proces je matematički ekvivalentan širenju postojeće šupljine do beskonačnosti. Shodno tome, pritisak u novonastaloj šupljini direktno je jednak graničnom, odnosno stacionarnom pritisku. Otpor prodiranja konusa penetrometra liči na radijalno širenje kružne šupljine i kao takav se koristi za meru graničnog pritiska. Tlo se modeluje kao elasto-plastično, pa se može analitički izvesti odnos između

otpora  $q_c$  i nedrenirane čvrstoće smicanja  $c_u$ . Nedrenirana čvrstoća tla se računa po jednačini 5.20, s tim što se vrednost koeficijenta nosivosti  $N_k^{CEM}$  dobija iz analitičkog rešenja CEM-a i zavisi od geometrije konusa i mehaničkih parametara (Poaonovog koeficijenta, OCR-a, modula i dr.).

3. Metoda putanje deformacija (Stress Path Method - SPM) – ova metoda je vrsta analitičke metode koja sumira putanju deformacija kroz koju prolaze čestice tla dok se konus utiskuje u isto. Posmatra se promena naprezanja i deformacija duž tih putanja i povezuje  $q_c$  sa  $c_u$ . Ovakav postupak ispitivanja daje detaljniji uvid u tok naprezanja i deformacija oko konusa, ali je složeniji proračun i zahteva više idealizacija u matematičkom modelu. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla se računa po jednačini 5.20, s tim što vrednost koeficijenta nosivosti  $N_k^{SPM}$  zavisi od deformacione putanje, odnosa napona-deformacije, OCR-a i indeksa plastičnosti i najčešće se određuje iz analitičke SPM derivacije ili kalibracijom na laboratorijskim podacima.
4. Metoda konačnih elemenata (Finite Element Method - FEM) – ova metoda je numerička metoda kojom se penetracija konusa sumira direktno u 2D ili 3D modelu tla koristeći sofisticirane konstitutivne modele tla (npr. elasto-plastične, Cam-Clay). Ovo je je jedan od najrealnijih i najdetaljnijih pristupa od sva četiri. Nedrenirana čvrstoća smicanja  $c_u$  se određuje poređenjem proračunatog  $q_c$  sa merenim vrednostima, tako da se ona ne računa direktno iz jedne formule, već se dobije kao metod inverzne kalibracije. Prvo se pretpostavi konstitutivni model tla i prvobitne vrednosti parametara (uključujući nedreniranu čvrstoću smicanja ili parametre koji određuju nedreniranu čvrstoću), nakon toga se simulira kriva otpora konusa  $q_c^{sim}(z)$  i uporedi se sa merenom krivom otpora konusa  $q_c^{meas}(z)$ . Nakon toga se iterativno podešavaju parametri dok se simulacija ne poklopi sa merenjem.

Teh and Houlsby (1991) su kombinovali metodu putanje deformacije, koja tačno opisuje stanje stalnog toka, sa metodom konačnih elemenata, koja pouzdano izračunava ravnotežu sila. Izraz za  $N_k$  izveden iz analize metodom konačnih elemenata sa putanjom deformacije uključuje i uticaj indeksa krutosti  $I_r$ , hrapavosti konusa i *in-situ* napona.

Kada govorimo o CPTu opitu radi se korekcija otpora konusa tj. mora se uvrstiti porni pritisak u jednačinu 5.21. Jednačina za nedreniranu čvrstoću dobija sledeći oblik:

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (5.21)$$

Gde se otpor konusa računa kao:

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (5.22)$$

Gde je:

$a$  – odnos neto površina vrha konusa i

$u_2$  – porni pritisak koji se meri senzorom iznad vrha konusa.

Ukoliko je tlo plastičnije koeficijent  $N_{kt}$  ima tendenciju da se povećava, a smanjuje se sa povećanjem senzitivnosti tla. Robertson (2012) je predložio da se koeficijent nosivosti  $N_{kt}$  računa po sledećem obrascu:

$$N_{kt} = 10.5 + 7 \log R_f \quad (5.23)$$

Gde je  $R_f$  frikcionni koeficijent ili koeficijent trenja.

Kasnijim istaživanjima Mayne i Peuchen (2022) su dali predlog da se koeficijent nosivosti  $N_{kt}$  može dobiti iz sledeće jednačine:

$$N_{kt} = 10.5 - 4.6 \ln (B_q + 0.1) \quad (5.24)$$

Gde je  $B_q$  parametar pornog pritiska koji se računa kao:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (5.25)$$

Gde je  $u_0$  početni porni pritisak.

U Tabeli 5.13 dat je prikaz parametra  $N_k$  i  $N_{kt}$  više istraživača u odnosu na tip tla i laboratorijski opit koji je korišćen.

*Tabela 5.13. Prikaz vrednosti faktora  $N_k$  i  $N_{kt}$*

<b>Autor</b>	<b>Tip tla</b>	<b>Test</b>	<b><math>N_k</math></b>	<b><math>N_{kt}</math></b>
Terzaghi (1943)	Normalno konsolidovano tlo	Triaksijalni i jednoaksijalni test	9.3	
Meyerhof (1951)	Finozrni materijali	Triaksijalni i jednoaksijalni test	10.4	
Sanglerat (1972)	Normalno konsolidovano tlo	-	15-22	
Lunne i Kleven (1981)	Normalno konsolidovane marinske gline	Terenska krilna sonda	11-19	8-12
Eid i Stark (1998)	Meke do krute, zasićene Čikago gline	Jednoaksijalni test	15.5-16	
Teh i Houlsby (1991)	Marinske gline	Triaksijalni test	15-20	10-15
Rémai (2013)	Mađarske Holocenske gline	Triaksijalni i jednoaksijalni test	10.5-28	12-32
Hong i dr. (2010)	Korejske gline	Triaksijalni test		7-20
Fukasawa i Kusakabe (2001)	Tokijske gline	Jednoaksijalni test		13
Mayne i Kulhawy (1991)	Zasićeni glinoviti sedimenti	Triaksijalni UU test	12-25	10-20
Alshibli i sar. (2012)	Meke glacialne gline	Jednoaksijalni test	12-20	10-15
Oliveira i sar (2010)	Meke gline visoke plastičnosti	Krilna sonda		4-16

Odabir pristupa zavisi od mnogo parametara, kao i vrednost koeficijenta nosivosti koji se može određivati iskustveno i lokalno. Metode uvek mogu da se kombinuju i koriste zajedno. U literaturi je dostupna velika baza empirijskih korelacija i važno je pravilno odabrati korelacioni faktor jer od njega direktno zavise rezultati.

### 5.3.2. Standardni penetracioni opit (SPT)

Standardni penetracioni opit (SPT) je najrasprostranjeniji terenski opit u geotehničkoj praksi, prvenstveno zbog svoje jednostavnosti i dugogodišnje primene. Opit se izvodi sa dna bušotine tako što se SPT cilindar (kašika) utiskuje u tlo udarima malja težine 63.5 kg, koji slobodno pada sa visine od 76 cm. U opitu se meri broj udaraca  $N$  koji je potreban da se cilindar utisne u tlo 45 cm (3 x 15 cm). Penetraciona otpornost predstavlja kumulativni broj udara  $N$  iz poslednje dve serije merenja. Nakon opita, cilindar se izvlači na površinu i iz nje se uzima poremećen uzorak (Slika 5.19.) (SRPS EN ISO 22476-3).



Slika 5.19. Osnovni delovi opreme i princip izvođenja SPT opita

Na osnovu broja udaraca  $N$ , razvijene su empirijske korelacije za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$ . Skempton (1986), Stroud (1989) i Terzaghi i sar. (1996) su predložili sledeću jednačinu za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće:

$$c_u = fN(N_{60}) \quad (5.26)$$

Gde je:

$N_{60}$  – korigovan broj udaraca za energetska efikasnost od 60%,  
 $f$  – empirijski faktor koji zavisi od tipa tla.

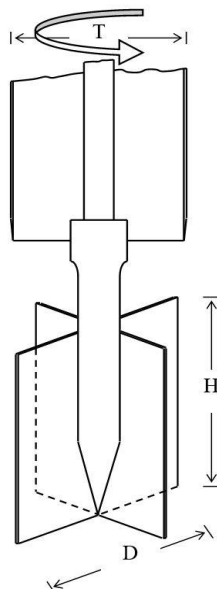
Hara i sar.(1971) su predložili jednačinu:

$$\frac{c_u}{p_a} = 0.29N_{60}^{0.72} \quad (5.27)$$

Gde je  $p_a$  atmosferski pritisak (100 kPa).

### 5.3.3. Terenska krilna sonda (FVT)

Opit terenskom krilnom sondom (Field Vane Test - FVT) je direktna in-situ metoda kojom se dobija nedrenirana smičuća čvrstoća  $c_u$  u sitnozrnim materijalima, naročito mekim i srednje tvrdim glinama, prašinama i muljevima (SRPS EN ISO 22476-9). Prvi put je primenjena u Švedskoj (Carlson, 1948), a standardnu sondu konstruisao je Švedski geotehnički institut.



Slika 5.20. Izgled terenske krilne sonde

Radni deo sonde sastoji se od četiri čelične krilca međusobno postavljenih pod uglom od  $90^\circ$  i metalnog nastavka koji je povezan sa mernom glavom. Visina lopatica uobičajeno iznosi od 1.5 do 2 prečnika, a u praksi se najčešće koristi odnos  $H = 2D$  (Slika 5.20.). U tlo se direktno utiskuje sonda koja se rotira kontrolisanom brzinom, obično  $6^\circ$  do  $12^\circ$  u minuti, kako bi se ostvarili nedrenirani uslovi, sve dok ne dođe do loma tla. Tako se određuje moment torzije potreban da se tlo smakne duž površine oko krilaca. Opit može da se izvodi u intervalima od 0.5m. Nedrenirana smičuća čvrstoća se direktno dobija iz momenta torzije i računa se na osnovu sledeće formule:

$$c_u = \frac{2T_{max}}{\pi D^2 \left( H + \frac{D}{3} \right)} \quad (5.28)$$

Gde je

$T_{max}$  – maksimalni momenat torzije (kN·m),

D – prečnik i

H – visina cilindrične površine, krilaca.

Ovako dobijene vrednosti nedrenirane čvrstoće, treba korigovati odgovarajućim koeficijentima, koji se definišu na osnovu lokalno stečenog iskustva. Jedan od primera faktora korekcije za meku i normalno konsolidovanu glinu je prikazan na Slikama 2.9. ili 5.12. Ova metoda je brza i jednostavna i ne zahteva vađenje uzorka. Nije primenljiva u krupnozrnim materijalima.

### 5.3.4. Presiometarski opit (PMT)

Presiometarski opit (Pressuremeter Test - PMT) se koristi u bušotinama koje moraju da imaju glatke zidove i prethodno pripremljenu etažu za ispitivanje ukoliko se radi u glinovitom tlu. Sonda koja se spušta u pripremljenu etažu sastoji se od tri ćelije. U sredini sonde se nalazi centralna, merna ćelija koja je napunjena vodom, i povezana je sa volumetrom preko sistema paralelnih kablova i creva. Sigurnosne ćelije nalaze se iznad i ispod centralne ćelije, a njihova uloga je da osiguraju ravnomernu radijalnu deformaciju merne ćelije. Opit se sastoji u merenju promene zapremine sonde/etaže u funkciji pritiska. Pritisak gasa i vode povećava se u jednakim vremenskim intervalima, a rezultirajuće promene zapremine očitane na volumetru beleže se na 15 s, 30 s i 60 s nakon primene svakog povećanja pritiska (Slika 5.21.) (SRPS EN ISO 22476-4).



Slika 5.21. Izgled presiometarskog aparata – kontrolna jedinica

Na osnovu krive u funkciji pritiska i promene zapremine ćelije, mogu se odrediti parametri deformabilnosti tla, a indirektno i nedrenirana smičuća čvrstoća. Opit je osetljiv i zahteva visoku obučenost operatera. S obzirom na kompleksnost istraživanja, potrebno je posebnu pažnju usmeriti na interpretaciju i tumačenje rezultata jer je praksa pokazala česte greške. Da bi se odredila nedrenirana smičuća čvrstoća ( $c_u$ ) iz presiometarskog opita, najpre je potrebno nacrtati presiometarsku krivu i odrediti Menardov granični pritisak ( $p_L$ ). Zatim se koriste korelacije zasnovane na faktorima nosivosti i početnom horizontalnom naponu ili na graničnom pritisku šupljine. Opšta formula glasi (Menard, 1957):

$$c_u = \frac{p_L - \sigma_0}{N} \quad (5.29)$$

Gde je:

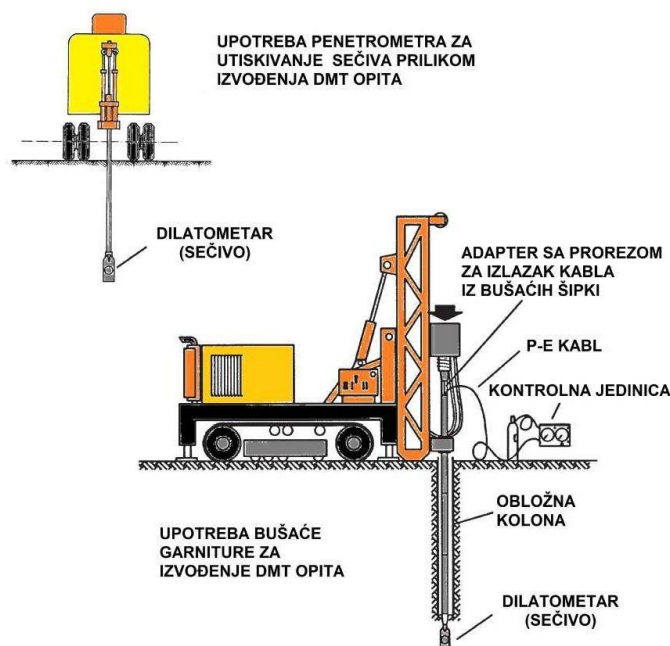
$p_L$  – Menardov granični pritisak dobijen sa krive,

$\sigma_0$  – horizontalni napon u bušotini na datoj dubini i

$N$  – koeficijent koji zavisi od pretpostavljenih modela tla (prema Menardu 5.5 za meke do umereno tvrde gline).

### 5.3.5. Dilatometerski opit (DMT i SDMT)

Razlikujemo dve vrste dilatometra: seizmički i mehanički. Seizmičkim dilatometarskim opitom (SDMT) određuju se isti parametri kao i kod mehaničkog dilatometarskog opita (DMT) sa dodatkom još jednog parametra, a to je brzina smičućih talasa. Dilatometerski opit se izvodi utiskivanjem sečiva, koje na jednom licu ima fleksibilnu čeličnu membranu prečnika 60 mm, u tlo. Ovaj opit je najprikladniji za upotrebu u glini, prašini i pesku (SRPS EN ISO 22476-11). Veoma je koristan za upotrebu na terenima u kojima ne može da se uzme neporemećeni uzorak za laboratorijska ispitivanja. Na Slici 5.22. je prikazana oprema koja se koristi za izvođenje dilatometarskog opita na kopnu. Ona se sastoji od: sečiva, kontrolne jedinice, pneumatsko-električnih kablova, adapter za izlazak kabla, statički penetrometar ili bušaća garnitura pomoću koga se izvodi opit (Berisavljević, 2017).



Slika 5.22. Šematski prikaz dilatometarskog opita (Berisavljević, 2017)

Kod dilatometarskog opita se određuje kontaktni pritisak tla  $p_0$ , na membranu, i pritisak potreban da se membrana proširi za 1.10 mm u središnjem delu -  $p_1$ . Nakon toga se određuju prelazni parametri ( $I_D$ ,  $K_D$  i  $E_D$ ) iz kojih se određuju geotehnički parametri. Standardni postupak interpretacije podrazumeva da je poznat *in situ* porni pritisak  $u_0$  i efektivni vertikalni napon  $\sigma'_v$ .

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla koja se dobija dilatometarskim opitom direktno zavisi i od istorije opterećenja i stepena prekonsolidacije OCR. Osnovna jednačina koja se koristi za interpretaciju nedrenirane smičuće čvrstoće iz dilatometarskog opita data je izrazom:

$$c_u = 0.22\sigma'_v(0.5K_D)^{1.25} \quad (5.30)$$

Gde je  $K_D$  indeks horizontalnog napona, a  $I_D < 1.2$ .

Novija istraživanja ukazuju da jednačina 5.30 može da predvidi i vrednosti  $c_u$  koje su na strani sigurnosti ali i vrednosti na strani nesigurnosti. Iz tog razloga potrebno je dati specifične korelacije za tlo koje se istražuje (Berisavljević, 2017).

## 5.4. METODE STATISTIČKE OBRADU

U okviru ove disertacije sprovedena je statistička obrada podataka radi analize odnosa između nedrenirane smičuće čvrstoće tla i drugih relevantnih fizičko–mehaničkih parametara. Cilj primene statističkih metoda jeste kvantifikovanje stepena povezanosti između posmatranih promenljivih, kao i razvoj pouzdanih prediktivnih modela koji omogućavaju procenu nedrenirane smičuće čvrstoće na osnovu dostupnih ulaznih podataka. U tom smislu, primenjene su metode korelacione i regresione analize. Korelaciona analiza, zasnovana na Pirsonovom koeficijentu korelacije, korišćena je za ispitivanje jačine i smera linearne veze između pojedinačnih parametara tla, dok je regresiona analiza primenjena radi formiranja prediktivnih modela. Da bi se ocenila tačnost i pouzdanost regresionih modela, korišćeni su sledeći statistički pokazatelji: koeficijent determinacije ( $R^2$ ), srednja kvadratna greška (RMSE) i srednja apsolutna greška (MAE). Ovi pokazatelji omogućavaju kvantitativnu procenu kvaliteta modela i stepena slaganja između predviđenih i stvarnih vrednosti. Statistička obrada podataka sprovedena je korišćenjem softverskog paketa Microsoft Office – Excel.

### 5.4.1. Koeficijent determinacije ( $R^2$ )

Koeficijent determinacije, označen kao  $R^2$ , predstavlja meru koja pokazuje koliki deo ukupne varijabilnosti zavisne promenljive može da se objasni korišćenjem nezavisnih promenljivih koje su uključene u model. Vrednost  $R^2$  se kreće od 0 do 1. Koeficijent determinacije se definiše kao:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.31)$$

Gde je:

- $y_i$  – stvarna vrednost,
- $\hat{y}_i$  – predviđena vrednost,
- $\bar{y}$  – srednja vrednost stvarnih vrednosti,
- $n$  – broj posmatranja.

Koeficijent determinacije može da varira, ako je 1 označava savršeno slaganje modela sa podacima. Jedna od podela jačine veze data je u tabeli 5.14.

Tabela 5.14. Kvalitet modela na osnovu koeficijenta determinacije (Hair i sar., 2010).

Vrednost $R^2$	Tumačenje kvaliteta modela
0.75 – 1.00	Značajna povezanost, ima vrlo jaku (0.9-1) i jaku vezu (0.75-0.9)
0.50 – 0.75	Umerena povezanost
0.25 – 0.50	Slaba povezanost
0.00 – 0.25	Veoma slaba ili bez povezanosti (model ne objašnjava podatke)

### 5.4.2. Srednja kvadratna greška (RMSE)

RMSE (Root Mean Square Error) je pokazatelj koji meri prosečnu veličinu greške između predviđenih i stvarnih vrednosti. Računa se kao kvadratni koren prosečne kvadratne razlike između tih vrednosti:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.32)$$

Niža vrednost RMSE ukazuje na bolju preciznost modela. RMSE je osetljiv na ekstremne vrednosti jer kvadrira greške.

#### 5.4.3. Srednja apsolutna greška (MAE)

MAE (Mean Absolute Error) predstavlja prosečnu apsolutnu razliku između stvarnih i predviđenih vrednosti:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5.33)$$

Za razliku od RMSE, MAE ne kvadrira greške, pa je manje osetljiv na ekstremne vrednosti. MAE daje intuitivnu predstavu o prosečnoj grešci modela u istim jedinicama kao i zavisna promenljiva.

#### 5.4.4. Srednja apsolutna procentualna greška (MAPE)

MAPE (Mean Absolute Percentage Error) predstavlja prosečno apsolutno procentualno odstupanje između stvarnih i predviđenih vrednosti:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100\% \quad (5.34)$$

U odnosu na MAE i RMSE, MAPE izražava grešku u relativnom, procentualnom obliku, što omogućava jednostavniju interpretaciju i poređenje modela nezavisno od broja podataka, ali istovremeno ima ograničenja jer je neprimenljiv kada se analiziraju nulte ili vrlo male stvarne vrednosti i asimetrično pridaje veću težinu greškama, dok MAE ravnomerno tretira sva odstupanja, a RMSE dodatno naglašava uticaj velikih grešaka.

#### 5.4.5. Koeficijent korelacije – Pirsonov koeficijent

Koeficijent korelacije predstavlja meru koja nam pokazuje koliko su neki parametri međusobno povezani linearnom vezom. Pirsonov koeficijent korelacije se najčešće koristi kada između varijabli (u ovom slučaju parametara tla) modela postoje linearne zavisnosti. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta se kreću od -1 do +1. Ako ne postoji linearna veza vrednost je nula. Pirsonov koeficijent se u literaturi označava sa  $r$  i računa se prema jednačini:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.35)$$

$$r = \frac{\sum XY}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (5.36)$$

Gde je:

$r$  – Pirsonov koeficijent korelacije,

$n$  – broj podataka,

$X$  – skup podataka  $x$ ,

$x_i$  – pojedinačna vrednost iz niza  $X$ ,

$\bar{x}$  – srednja vrednost iz niza  $X$ ,

$Y$  – skup podataka  $y$ ,

$y_i$  – pojedinačna vrednost iz niza  $Y$ ,

$\bar{y}$  – srednja vrednost iz niza  $Y$ ,

$\sigma_x$  – standardna devijacija varijable  $X$ ,

$\sigma_y$  – standardna devijacija varijable  $Y$ .

Phoon i Ching (2015) naglašavaju da je prilikom usvajanja empirijskih korelacija neophodno kritički razmotriti vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije, kao i koeficijenta determinacije.

#### 5.4.6. Prediktivni modeli

Prediktivni model predstavlja matematički ili statistički okvir kojim se opisuje i predviđa vrednost zavisne promenljive na osnovu poznatih ulaznih podataka. Suština prediktivnog modela je da otkrije obrazac ili zakonitost u postojećim podacima i da ga iskoristi za predviđanje budućih ili nepoznatih vrednosti. Prediktivni model se može zapisati kao:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (5.37)$$

Gde je:

$y$  – zavisna promenljiva (cilj),

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – nezavisne promenljive (prediktori),

$f$  – funkcionalna forma modela,

$\varepsilon$  – slučajna greška.

Prediktivni modeli se koriste u različitim disciplinama, od ekonomije i medicine, do inženjerstva pa i geotehnike, kako bi se unapredila tačnost procena i smanjila potreba za skupim ili dugotrajnim eksperimentalnim ispitivanjima. Prema Seal-u (1967), linearna regresija predstavlja metod modelovanja odnosa između jedne ili više zavisnih promenljivih ( $y$ ) i jedne ili više nezavisnih promenljivih ( $x$ ), pri čemu model ima linearnu zavisnost od nepoznatih parametara koji se procenjuju na osnovu podataka. Kada se u analizi koristi samo jedna nezavisna promenljiva, govori se o

jednostavnoj linearnoj regresiji, dok se u slučaju uključivanja dve ili više nezavisnih promenljivih primenjuje višestruka linearna regresija.

#### 5.4.6.1. *Jednostavna linearna regresija*

Jednostavna linearna regresija je najosnovniji oblik prediktivnog modela. Ona opisuje vezu između jedne zavisne promenljive ( $y$ ) i jedne nezavisne promenljive ( $x$ ) kroz linearnu funkciju:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (5.38)$$

Gde je:

$\beta_0$  – konstanta (intercept),

$\beta_1$  – koeficijent nagiba krive,

$\varepsilon$  – greška modela.

Ovaj model se koristi kada pretpostavljamo da postoji linearna zavisnost između dve promenljive. U geotehnici, na primer, jednostavna linearna regresija može da poveže nedreniranu smičnu čvrstoću sa sadržajem vode u tlu.

#### 5.4.6.2. *Višestruka linearna regresija*

Višestruka linearna regresija proširuje koncept jednostavne regresije tako da uključuje više nezavisnih promenljivih istovremeno. Opšti oblik modela je:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (5.39)$$

Gde je:

$\beta_0$  – konstanta,

$\beta_i$  – regresioni koeficijenti za svaku nezavisnu promenljivu,

$\varepsilon$  – greška modela.

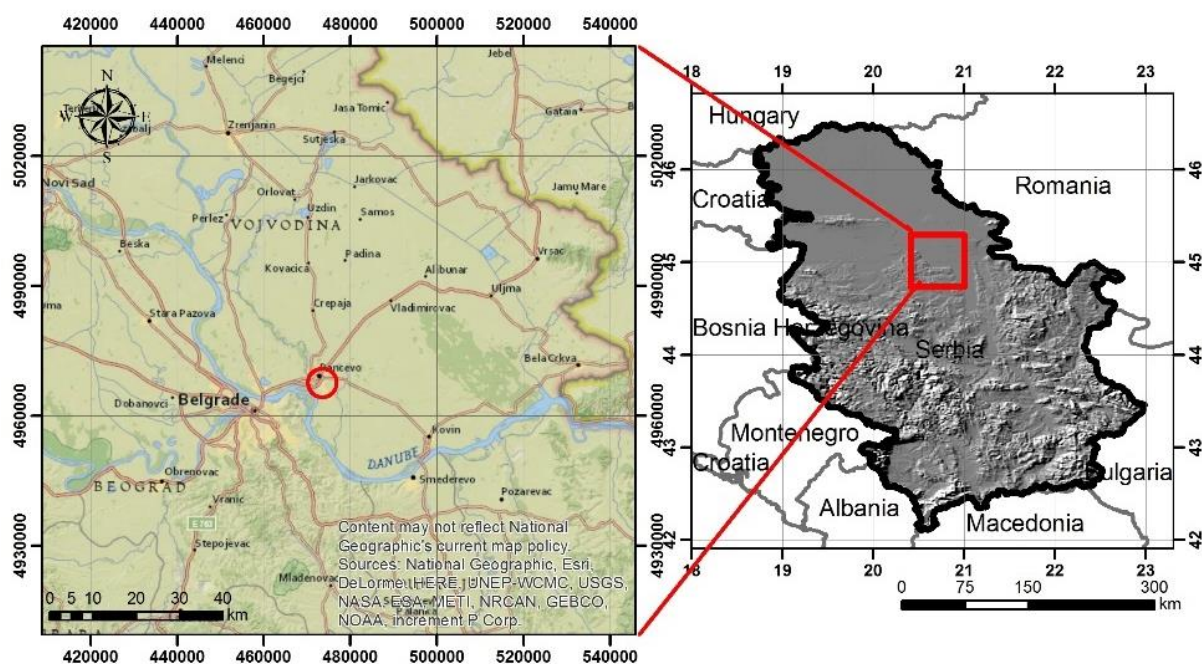
Ovaj pristup omogućava da se obuhvati kompleksnija struktura podataka i da se istovremeno proceni uticaj više faktora na zavisnu promenljivu. U kontekstu nedrenirane smičuće čvrstoće, višestruka linearna regresija može da uključi sadržaj vode, efektivni napon, indeks plastičnosti i druge relevantne parametre tla. Statističke analize u ovoj disertaciji su vršene između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vlažnosti (WCR), indeksa plastičnosti ( $I_p$ ), zapreminske težine ( $\gamma$ ) i stepena prekonsolidacije (OCR).

## 6. INTERPRETACIJA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom poglavlju prikazaće se rezultati obavljenih ispitivanja i njihova interpretacija. Na samom početku je dat opis područja odakle su uzorci uzeti, nakon toga je urađena njihova identifikacija i klasifikacija. Naponsko-deformacijske karakteristike su izdvojene preglednom tabelom, kako bi se dobio opšti uvid u izabrane uzorke. Nedrenirana smičuća čvrstoća je izdvojena za sve uzorke preglednim dijagramima i tabelama.

### 6.1. Opšti prikaz područja ispitivanja

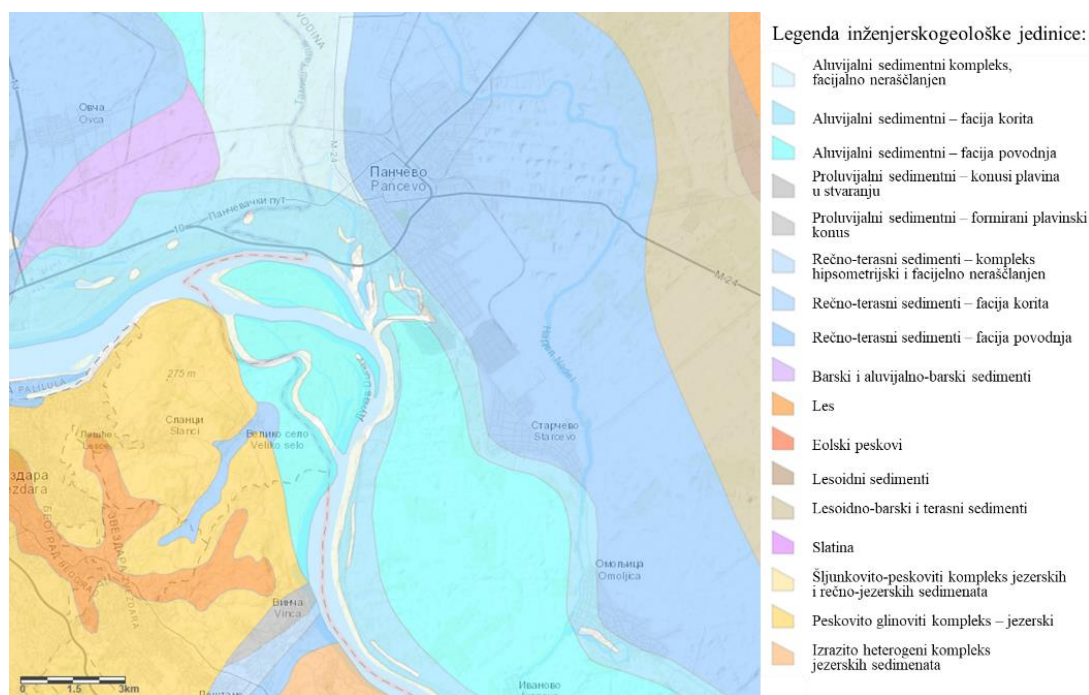
Istraživano područje nalazi se u severnom delu Republike Srbije, u okviru južnog oboda Panonskog basena, odnosno na prostoru Banata. U užem prostornom smislu, predmetni teren obuhvata deo leve obale Dunava, između Beograda i Pančeva, u zoni koja geomorfološki i geološki pripada južnom obodu Banatske depresije. Šire istražno područje prikazano je na Slici 6.1.



Slika 6.1. Šire istražno područje

Prostorne i geološke karakteristike ovog prostora mogu se adekvatno sagledati kroz koncept inženjerskogeološke regionalizacije. Inženjerskogeološka regionalizacija predstavlja proces izdvajanja prostornih celina koje se primarno definišu na osnovu svojih strukturno-tektonskih karakteristika i sastava terena. Savremeni pristup ovom problemu na teritoriji Srbije više se ne oslanja isključivo na tradicionalni model geosinklinala, već integriše i modernu koncepciju terena. Ovakav kombinovani model omogućava detaljnije sagledavanje geološke sredine, uzimajući u obzir razvoj Zemljine kore, starost stena, stepen njihove kristalizacije, kao i magmatske procese koji su oblikovali prostor. Ipak, inženjerskogeološki uslovi ne zavise samo od geološke prošlosti. Da bi se dobila realna slika terena, neophodno je u analizu uključiti i brojne druge faktore koji direktno utiču na stabilnost i nosivost tla. To su, pre svega, geomorfološke karakteristike reljefa, hidrogeološki uslovi, režim podzemnih voda i klimatski faktori. Poseban značaj u modernom dobu pridaje se antropogenom faktoru, odnosno uticaju ljudske delatnosti na promenu prirodne sredine. Na osnovu ovih kriterijuma Jevremović i sar. (2021) su na teritoriji Republike Srbije izdvojili nekoliko specifičnih regiona: region

Panonske nizije, region terciarnih basena i kotlina, region geosinklinalnih tvorevina i srpskog kristalastog jezgra i region magmatskih i ultramagmatskih masiva. Područje istraživanja pripada regionu Panonske nizije, a širi istražni prostor pripada južnom obodu Banatske depresije (L34-114-list Pančevo). Geološku građu terena čine sedimentne tvorevine krede, neogena i kvartara, uz pojave magmatskih stena i serpentinita. Najveće rasprostranjenje imaju kvartarni sedimenti, koji zahvataju oko 95% površine i predstavljeni su aluvijalnim, deluvijalnim, barskim i eolskim naslagama, kao i aluvijalno-jezerskim sedimentima. Neogeni sedimenti, izgrađeni od glina, peskova i peščara, su značajni u južnom delu terena (Slika 6.2).

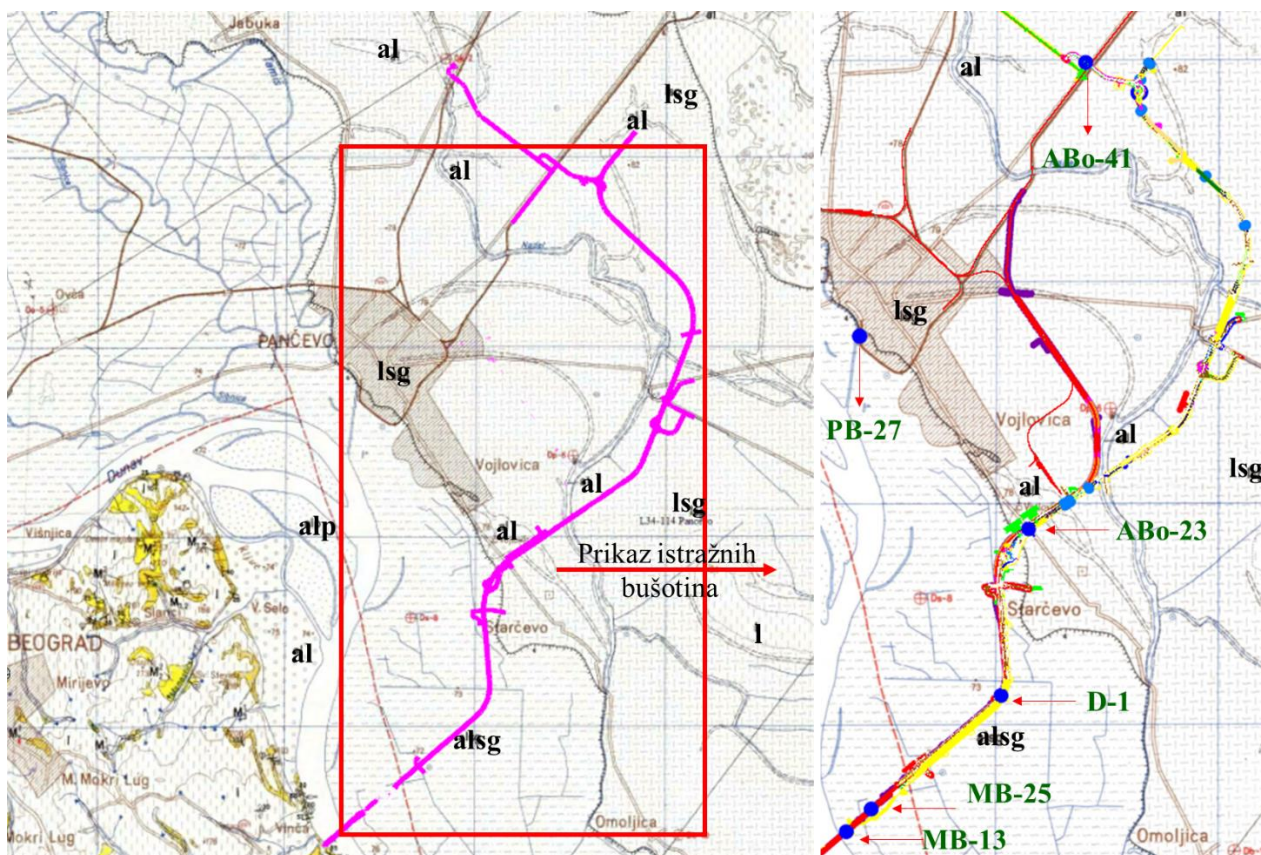


Slika 6.2. Inženjersko-geološka karta Srbije 1:300000 (Geološki informacioni sistem Srbije)

U geomorfološkom smislu izdvajaju se dva jasno diferencirana terena: ravničarski prostor Banatske ravnice severno od Dunava i brežuljkasto-brdski teren južno od Dunava. Severni deo karakterišu lesni i lesoidni platoi, aluvijalne ravni Dunava i Tamiša i deo Deliblatske peščare sa izraženim eolskim oblicima reljefa. Južni deo terena odlikuje se većom vertikalnom razuđenošću, erozionim procesima i pojavom klizišta, naročito u zoni neogenih sedimenata i priobalja Dunava. Hidrogeološke karakteristike terena uslovljene su litološkim sastavom. Aluvijalne peskovito-šljunkovite naslage Dunava i Tamiša odlikuju se dobrom propusnošću i formiranom izdani plitkog nivoa, što ima značajan uticaj na uslove izgradnje. Lesni i lesoidni sedimenti pokazuju osetljivost na provlaživanje, pri čemu dolazi do smanjenja njihove nosivosti. U južnom delu terena, vode u neogenim sedimentima predstavljaju važan faktor nestabilnosti padina. Prirodni uslovi ovog prostora u značajnoj meri su određeni kvartarnim naslagama, plitkim podzemnim vodama i izraženom morfološkom podelom na ravničarski i brdski deo.

U skladu sa navedenim regionalnim geološkim i geomorfološkim karakteristikama, istraživanja sprovedena u okviru ove doktorske disertacije realizovana su na delu terena severno od Dunava, u zoni fluvijalnih i eolskih tvorevina. Izabrani uzorci tla predstavljaju deo šireg istražnog programa u okviru projekta izgradnje obilaznice oko Beograda i Pančeva, na trasi od Bubanj Potoka do državnog puta I reda Pančevo–Vršac. Uzorkovanje je izvršeno na deonici trase koja se nalazi na levoj obali Dunava, gde su dominantno zastupljeni kvartarni sedimenti aluvijalnog i eolskog porekla (Slika 6.3.)

U geološkoj građi terena, šireg istražnog područja na levoj obali Dunava, zastupljeni su sedimenti kvartara: aluvijalni i aluvijalno jezerski, eolski, barski i recentni aluvijalni sedimenti. Najstariji izdvojeni kvartarni sedimenti su jezersko-aluvijalni ( $al-j^{p^s}$ ), koji su utvrđeni istražnim bušenjem na dubini većoj od 15 m u odnosu na površinu terena. Predstavljani su peskovito-šljunkovitim, sitno do srednjezrnim materijalima, sa čestim međusobnim gradacionim prelazima. Aluvijalni sedimenti su predstavljeni suglinama (glinom peskovitom -  $al^{gl,p}$ , glinom prašinsto-peskovitom -  $al^{gl,prp}$ , glinom prašinsto-peskovitom, stišljivom -  $al^{gl,prp,m}$ ) i peskovima (peskom prašinstim -  $al^{p,pr}$  i peskom -  $al^p$ ). Eolski sedimenti (lesoidi) taloženi su u vodenoj sredini, utvrđeni su u koridoru od Starčeva do Đurđevca i predstavljeni su lesoidnom prašinstom glinom ( $lg^{l,pr}$ ). Aluvijalni recentni sedimenti ( $al^{sp}$ ) izdvojeni su lokalno na karti. Oni predstavljaju stare zone plavljenja terena vodama Dunava i u okviru njih izdvojeni su glinovito-prašinsti materijali lokalno peskoviti, sa muljevitim organskim proslojcima. Na levoj obali Dunava teren ima izrazito ravničarski karakter, sa kotama u koridoru autoputa oko 70 mnm. Hidrografski sistem područja čini veći broj melioracionih kanala koji se ulivaju u vodotok reke Nadel, a potom u Dunav. U mikroreljefu su prisutna brojna manja depresiona udubljenja, koja su usled zadržavanja površinskih voda transformisana u bare obrasle bujnom vegetacijom. Zbog zaštite od plavljenja, duž leve obale Dunava izgrađen je obaloutvrđni nasip visine približno 5 m. Maksimalna zabeležena kota nivoa Dunava iznosi 73.25 mnm, dok je srednji vodostaj oko 68 mnm, što ukazuje na značajan uticaj fluvijalnih procesa i visokog nivoa podzemnih voda na uslove u terenu.



Legenda: al - aluvijalni sedimenti, mgs - barske gline, lsg - lesoidne gline, alsg – aluvijalne sugline, alp – aluvijalni peskovi, l - les  
 Slika 6.3. Osnovna geološka karta šire zone istraživanja (Saobraćajni Institut CIP (grupa autora) – prilagođeno)

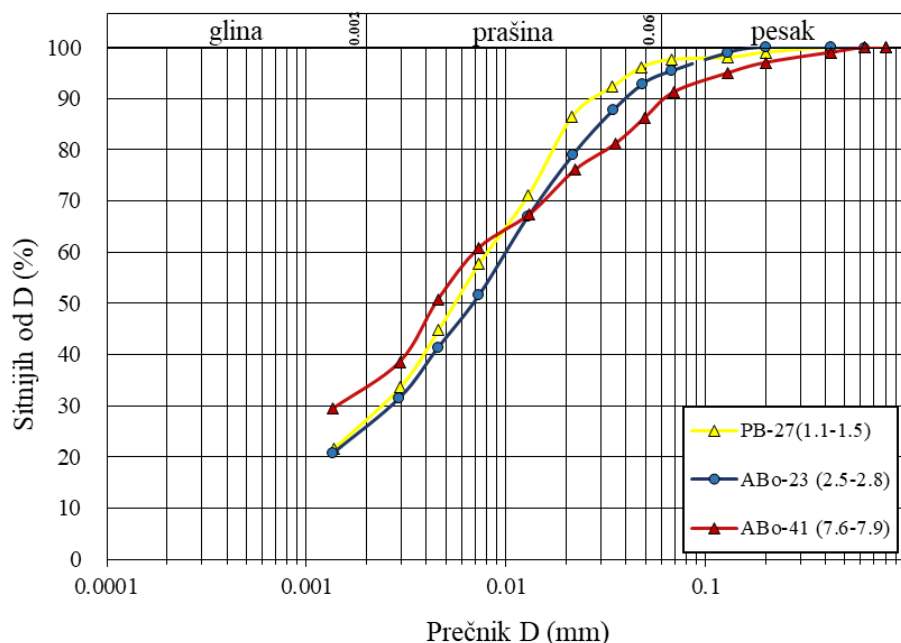
Ispitivani materijali se mogu podeliti u dve kategorije: aluvijalne gline prašinsto peskovite i lesoidne gline. Prema hidrogeološkoj funkciji ovi materijali spadaju u hidrogeološke kolektore sprovodnike, intergranularne i subkapilarne poroznosti u zavisnosti od granulometrijskog sastava. Eolski sedimenti

(lesoidne prašinate gline) odlikuju se izraženom poroznošću i osetljivošću na promenu vlažnosti. Recentni aluvijalni sedimenti su uglavnom normalno konsolidovani dok stariji mogu biti slabo (blago) prekonsolidovani. Visok nivo podzemne vode kao i specifične karakteristike izdvojenih sedimenata su razlog odabira istih za detaljna laboratorijska ispitivanja u okviru ove doktorske disertacije.

Za potrebe istraživanja korišćeni su podaci i uzorci dobijeni iz istražnih bušotina izvedenih duž trase autoputa. Sedimenti eolskog porekla analizirani su iz uzoraka izdvojenih u bušotinama PB-27 (1.1–1.5 m), ABo-23 (2.5–2.8 m) i ABo-41 (7.6–7.9 m), dok su aluvijalni materijali uzorkovani iz bušotina MB-25 (1.3–1.6 m), MB-13 (1.5–1.8 m), D-1 (2.0–2.2 m), PB-27 (4.3–4.6 m) i ABo-41 (12.7–13.0 m).

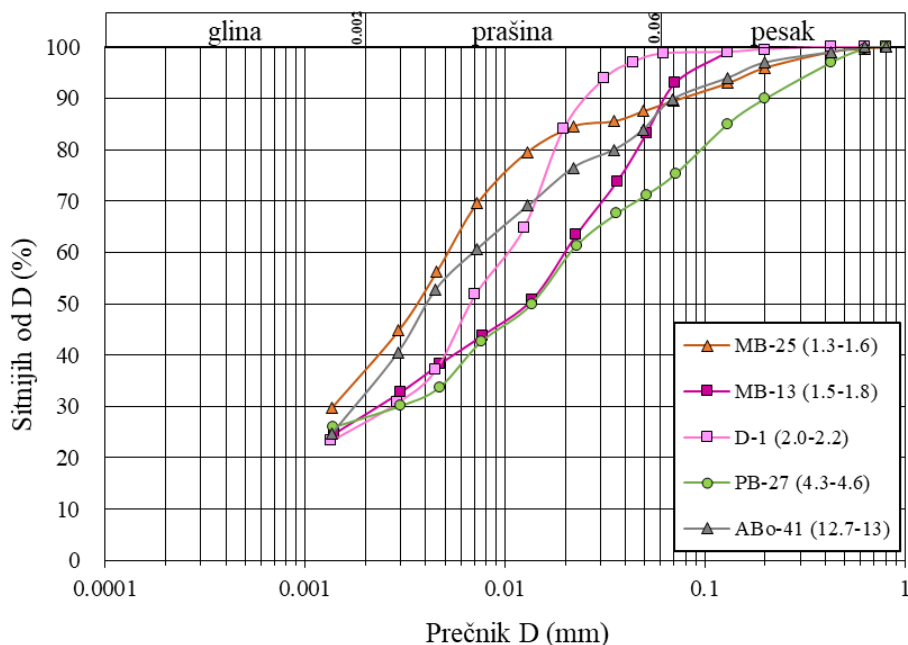
## 6.2. Identifikaciono-klasifikacione karakteristike tla

Sprovedena analiza granulometrijskog sastava je urađena na lesoidnim glinama. Uzorci sadrže 26-34% frakcija gline, 56-70% frakcija prašine i 3-10% frakcije peska (Slika 6.4.).



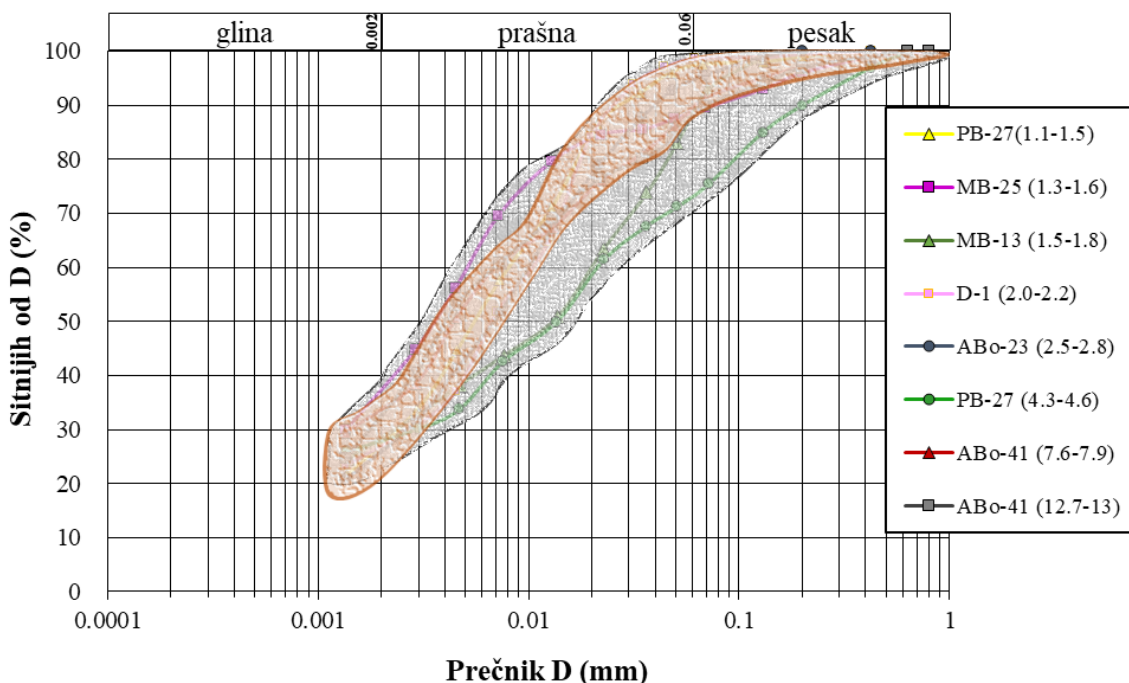
Slika 6.4. Dijagram granulometrijskog sastava lesoidnih gline

Sprovedena analiza granulometrijskog sastava urađena na aluvijalnim glinama pokazuje da uzorci sadrže 27-37% frakcija gline, 52-71% frakcija prašine i 2-26% frakcije peska (Slika 6.5.).



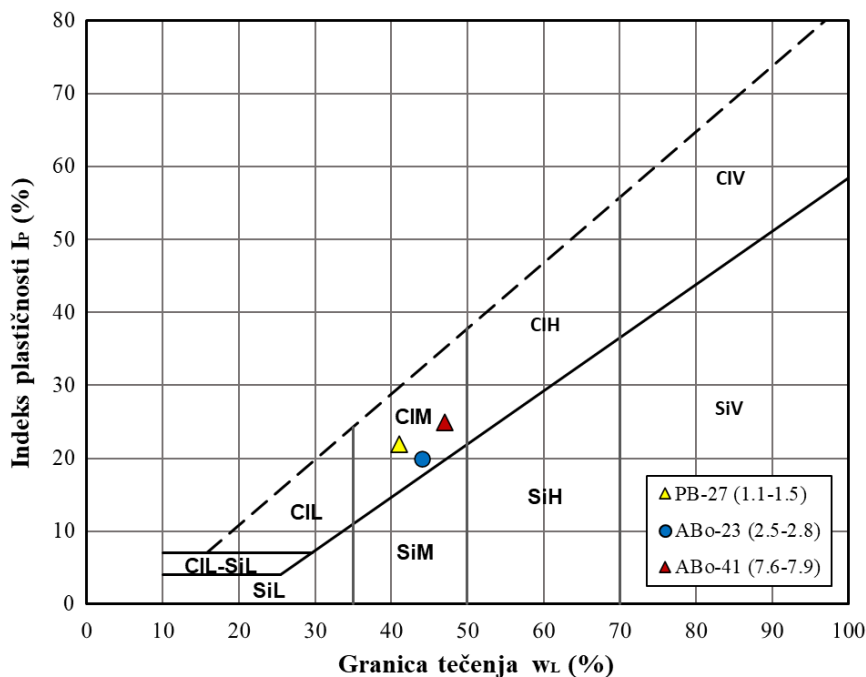
Slika 6.5. Dijagram granulometrijskog sastava aluvijalnih glina

Na osnovu granulometrijskog sastava uzorci se delimično razlikuju po sadržaju krupnozrnih i prašinih frakcija. Uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) sadrži 26% frakcije peska, što ga čini peskovitijim u odnosu na sve posmatrane uzorke. Sadržaj glinovitih frakcija je dosta sličan za obe sredine, što se vidi i na zbirnom dijagramu na Slici 6.6.



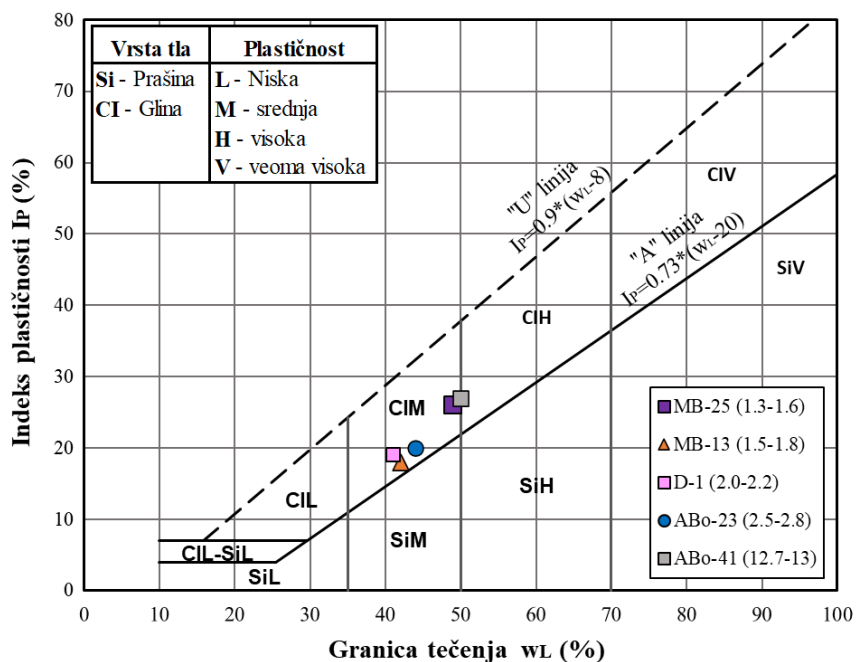
Slika 6.6. Zbirni prikaz granulometrijskog sastava

Nakon granulometrijskog sastava određene su i plastične karakteristike tla za lesoidne gline. Granica tečenja nalazi se u opsegu  $w_L = 41-47\%$ , a granica plastičnosti u opsegu  $w_P = 19-24\%$ . Vrednosti indeksa plastičnosti su u opsegu  $I_p = 20-25\%$ , dok su vrednosti indeksa konzistencije u opsegu  $I_c = 0.907-0.965$  (Slika 6.7.).



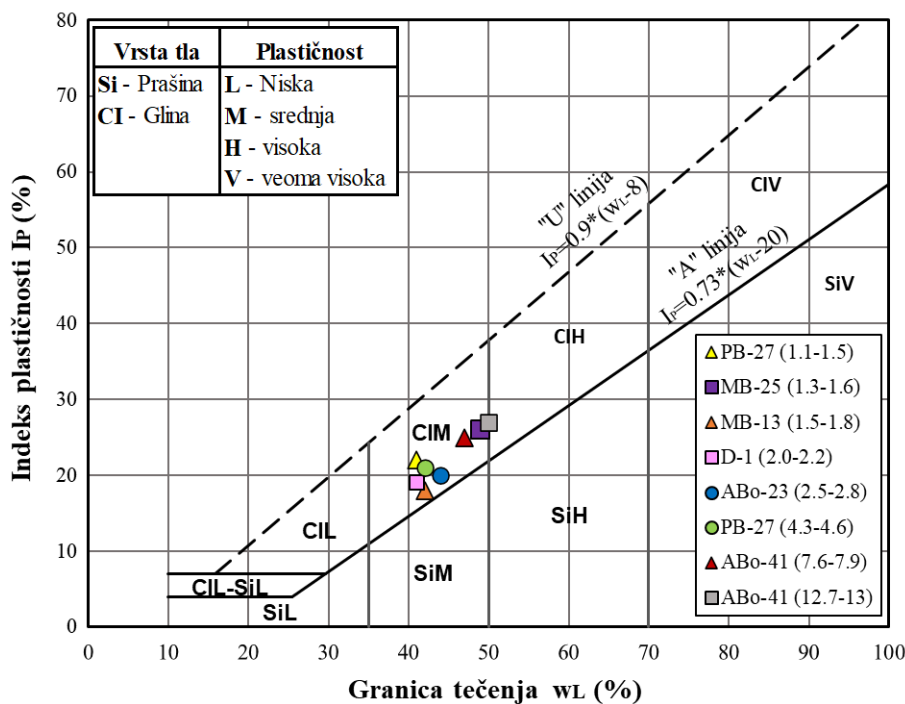
Slika 6.7. Dijagram plastičnosti za lesoidne gline

Nakon granulometrijskog sastava određene su i plastične karakteristike tla za aluvijalne gline. Granica tečenja iznosi  $w_L = 40\text{--}50\%$ , a granica plastičnosti  $w_P = 21\text{--}24\%$ . Vrednosti indeksa plastičnosti se kreću u rasponu  $I_p = 18\text{--}28\%$  a indeks konzistencije  $I_c = 0.450\text{--}0.996$  (Slika 6.8.).



Slika 6.8. Dijagram plastičnosti za aluvijalne gline

Zbirni dijagram plastičnosti dat je na Slici 6.9. Prema standardu SRPS EN ISO 14688-2, na osnovu vrednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti, svi uzorci pripadaju klasi CIM, a prema USCS klasifikaciji pripadaju grupi CI – što su zapravo srednje plastične gline.



Slika 6.9. Zbirni dijagram plastičnosti

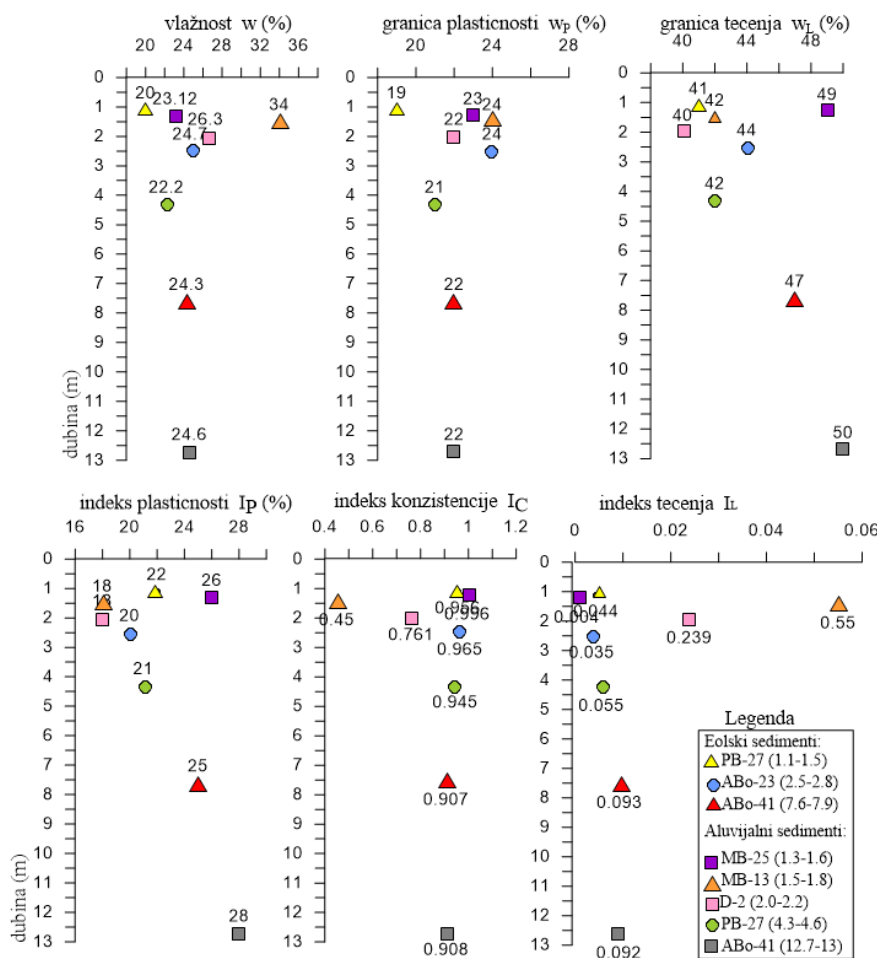
Osnovne identifikaciono-klasifikacione karakteristike tla izdvojene su u Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Osnovne identifikaciono-klasifikacione karakteristike tla

Uzorak (m)	$\gamma$	$\gamma_d$	w	$G_s$	e	Sr	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	Frakcija (mm)		
	kN/m <sup>3</sup>		%	-	-	%	%	%	%	%	<0.002	0.002 -0.06	>0.06
<b>Eolski sedimenti – Lesoidne gline</b>													
PB-27 (1.1-1.5)	20.2	16.7	20	2.58	0.512	100	41	19	22	0.956	27	70	3
ABo-23 (2.5-2.8)	19.7	15.8	24.7	2.63	0.632	100	44	24	20	0.965	26	68	6
ABo-41 (7.6-7.9)	20.1	16.3	24.3	2.59	0.558	100	47	22	25	0.907	34	56	10
<b>Aluvijalni sedimenti – Aluvijalne gline</b>													
MB-25 (1.3-1.6)	19.8	16.2	23.1	2.57	0.563	100	49	23	26	0.996	37	52	11
MB-13 (1.5-1.8)	18.1	13.8	34	2.54	0.805	100	42	24	18	0.450	28	61	11
D-1 (2.0-2.2)	19.7	16.0	26.3	2.61	0.624	100	40	22	18	0.761	27	71	2
PB-27 (4.3-4.6)	19.6	16.1	22.2	2.57	0.567	100	42	21	21	0.945	28	46	26
ABo-41 (12.7-13)	20.4	16.7	24.6	2.62	0.538	100	50	22	28	0.908	33	55	12

Na osnovu prikazanih parametara može se uočiti da eolski sedimenti (lesoidne gline) i aluvijalni sedimenti (aluvijalne gline) pokazuju vrlo slične vrednosti osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika. Vrednosti prirodne vlažnosti (w), granica plastičnosti (w<sub>L</sub>) i tečenja (w<sub>P</sub>), kao i indeks plastičnosti (I<sub>p</sub>) i konzistencije (I<sub>c</sub>), kreću se u umerenim rasponima i ne pokazuju značajne razlike između dve sredine. Takođe, zapeminske težine ( $\gamma$ ,  $\gamma_d$ ), specifična težina čvrstih čestica ( $G_s$ ), poroznost (e) i stepen zasićenosti (Sr) ukazuju na homogeno ponašanje. Distribucija frakcija po granulometrijskim klasama potvrđuje da obe sredine imaju dominantan udeo sitnih frakcija, što

dodatno naglašava njihovu sličnu prirodu. S obzirom na ove pokazatelje, eolski i aluvijalni sedimenti se u nastavku ne razmatraju odvojeno, već se analiziraju kao jedinstvena grupa glinovitih tla. Zbirni prikaz osnovnih faznih pokazatelja tla prema dubini je prikazan Slikom 6.10.



Slika 6.10. Zbirni prikaz osnovnih faznih pokazatelja tla prema dubini

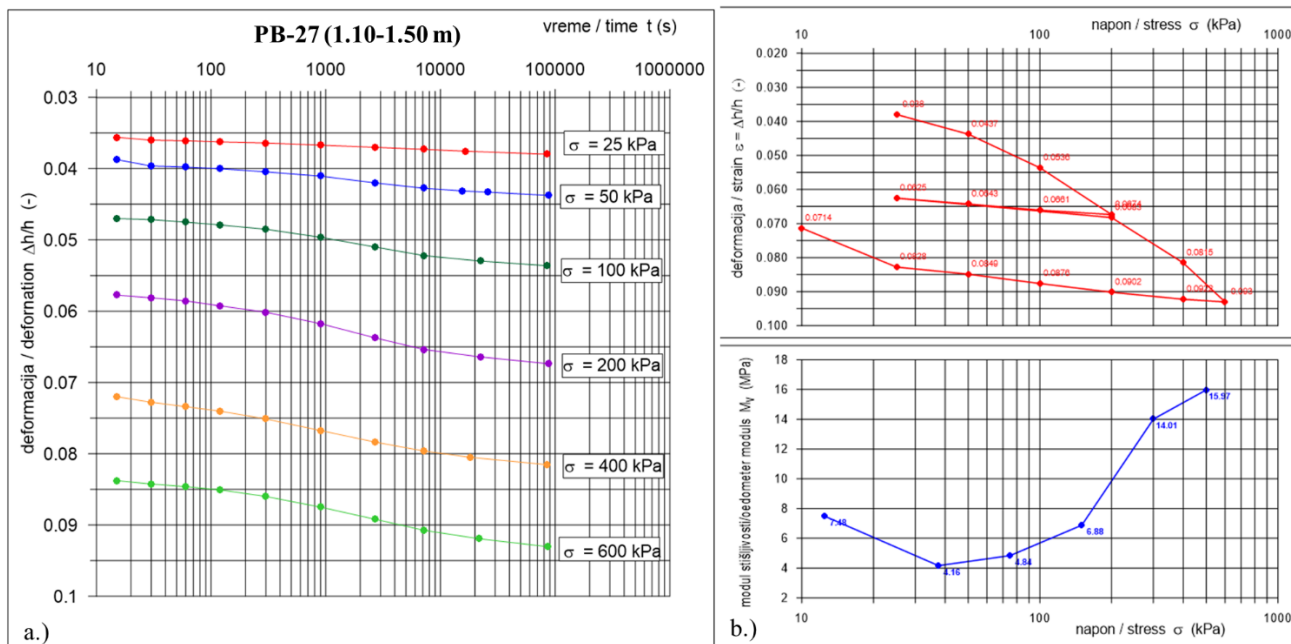
Na Slici 6.10 su prikazani indeksi konzistencije i Aterbergove granice u funkciji dubine. Uočava se da u površinskom delu vlažnost nešto varira, da je blago povećana i sa dubinom postaje umerena. Granica tečenja raste sa porastom dubine kao i indeks plastičnosti. Generalno, raspodela parametara potvrđuje litološku heterogenost profila i ukazuje na promene ponašanju tla sa dubinom.

### 6.3. Stišljivosti tla i naponsko-deformacijske karakteristike tla

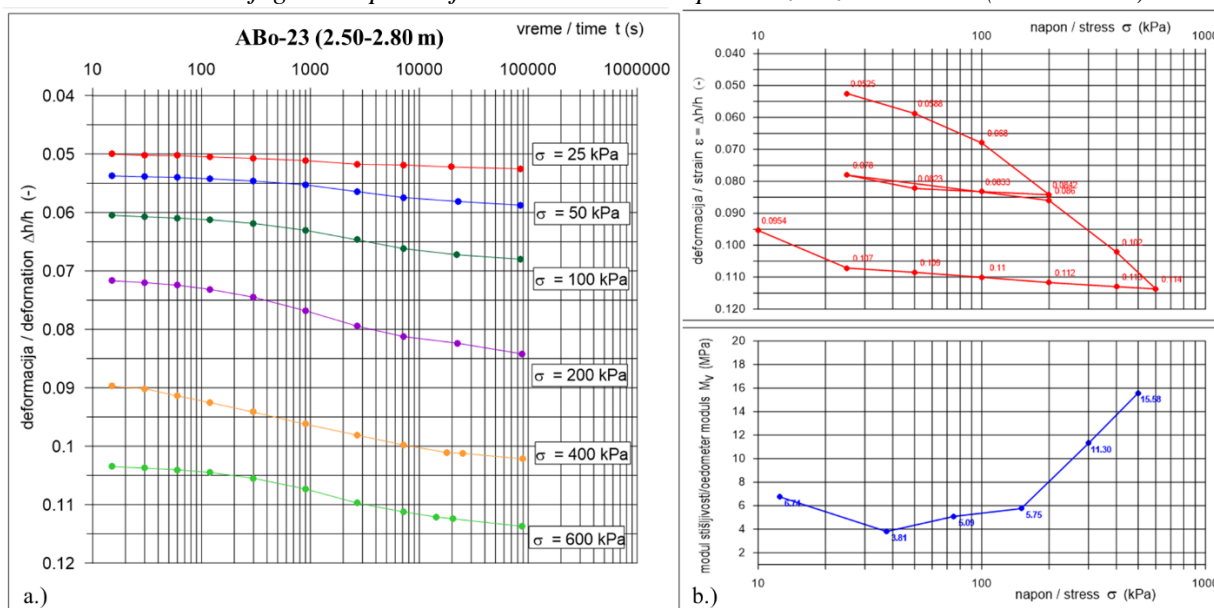
Edometarski opit je izvršen na uzorcima prirodnog tla u cilju određivanja njegovih parametara stišljivosti i konsolidacije. Uzorci su vodosasićeni i ispitani stepenastim opterećivanjem u edometru, pri čemu je maksimalno primenjeno vertikalno opterećenje iznosilo 600 kPa. Opterećenje je nanošeno stupnjevito, redosledom od 25, 50, 100, 200, 400 i 600 kPa. Tokom ispitivanja kontinuirano su praćene vertikalne deformacije svakog uzorka u zavisnosti od vremena. Na svim uzorcima prvo rasterećenje je urađeno na 200 kPa, i to 100, 50 i 25, a poslednje na 600 kPa i to: 400, 200, 100, 50, 25 i 0.

To znači da je tok ispitivanja za sve uzorke bio jedinstven i to: 25-50-100-200-100-50-25-50-100-200-400-600-400-200-100-50-25-0 kPa. Step en prekonsolidacije je računat na osnovu opisa u

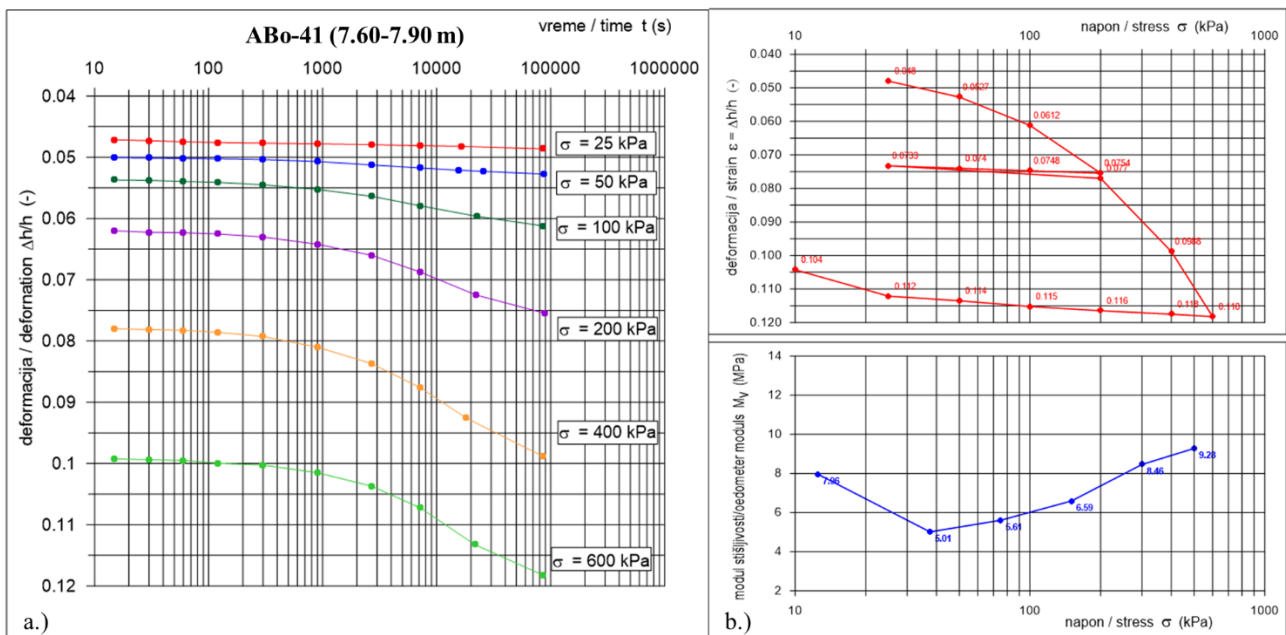
poglavlju 4, a indeks kompresije i rekompresije su računati na osnovu jednačina koje su prikazane ranije u Poglavlju 5. Rezultati ispitivanja stišljivosti u edometarskom aparatu za eolske sedimente su izdvojeni na Slikama 6.11 – 6.13.



Slika 6.11. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak PB-27 (1.10-1.50 m)



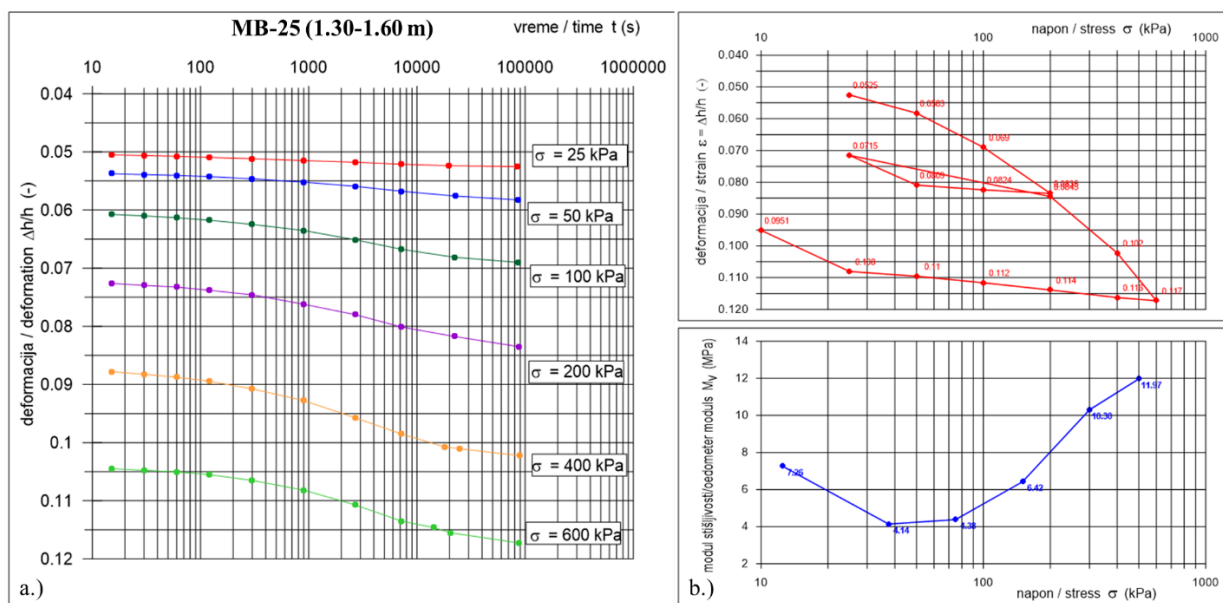
Slika 6.12. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-23 (2.50-2.80 m)



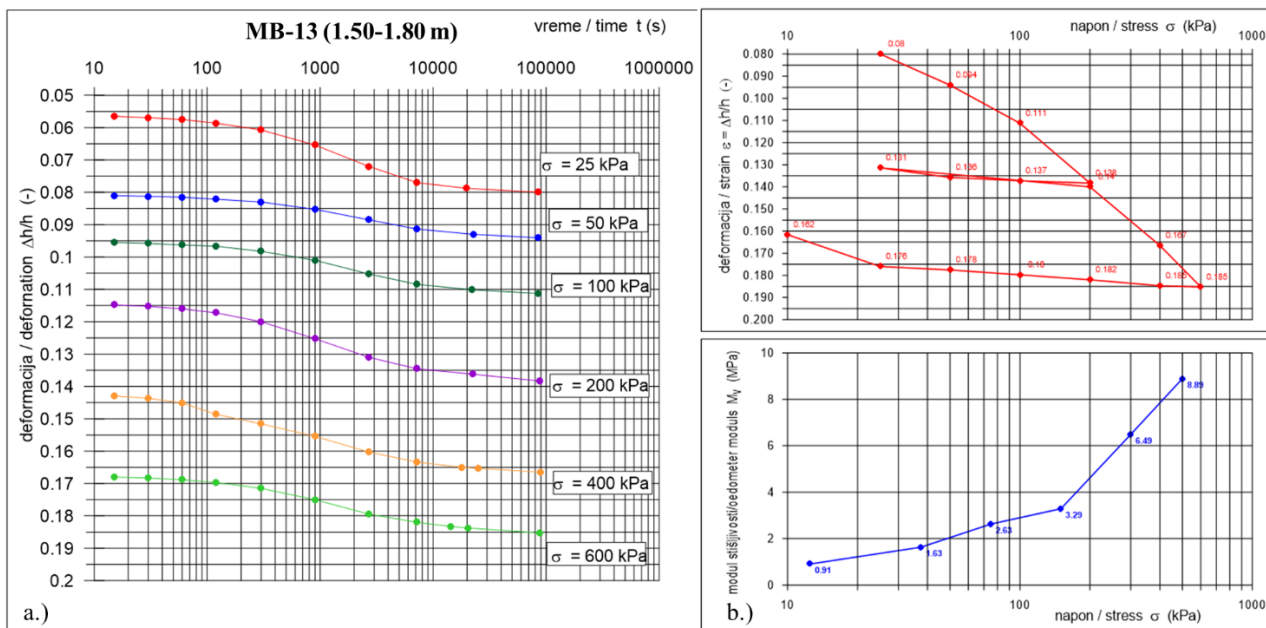
Slika 6.13. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-41 (7.60-7.90 m)

Rezultati edometarskih ispitivanja eolskih sedimenata ukazuju na sistematski porast modula stišljivosti ( $M_v$ ) sa povećanjem naponskog nivoa. U intervalu napona 25-50 kPa vrednosti  $M_v$  kreću se od 3.81 do 5.01 MPa, dok pri višim naponskim nivoima (400-600 kPa) dostižu vrednosti od 9.28 do 15.97 MPa. Vrednosti stepena prekonsolidacije ( $OCR = 1-2.6$ ) ukazuju da su ispitivani uzorci u stanju normalne konsolidacije do slabe prekonsolidacije. Najviši OCR registrovan je kod uzorka PB-27 (1.1-1.5 m), što može ukazivati na prethodna naponska stanja. Indeks kompresije ( $C_c = 0.078-0.134$ ) ukazuje na nisko do srednje plastične gline sa umerenim potencijalom stišljivosti, dok su veoma niske vrednosti indeksa rekompresije ( $C_r = 0.004-0.011$ ) pokazatelj izražene razlike između primarne konsolidacije i faze rasterećenja i ponovnog opterećenja.

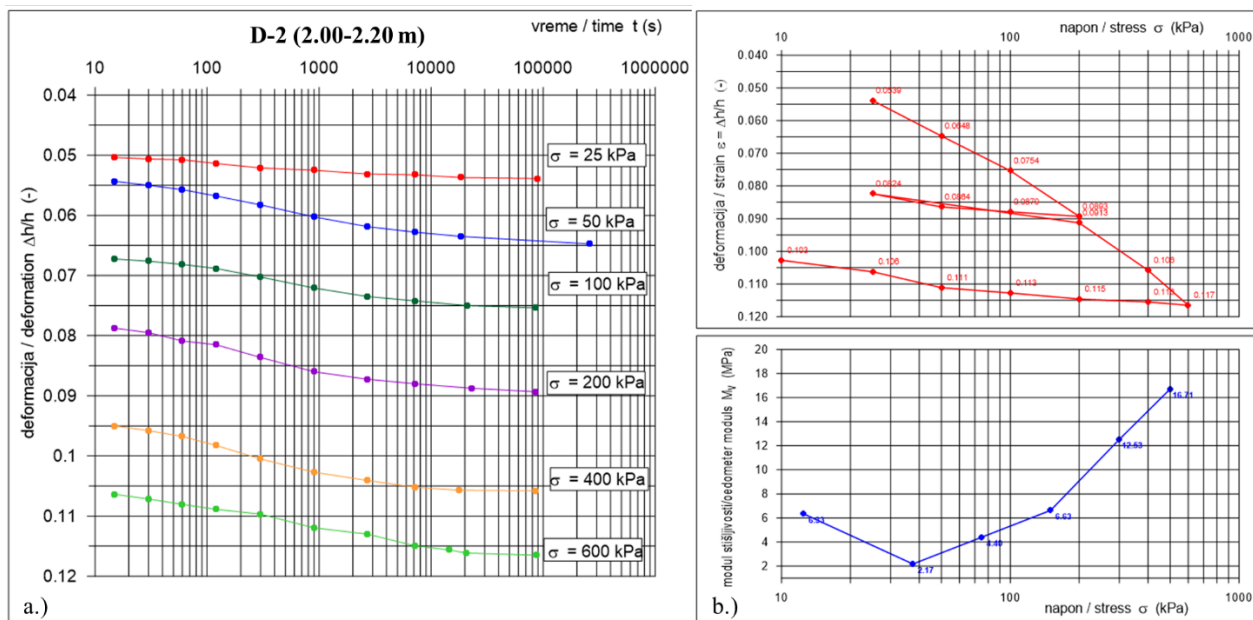
Rezultati ispitivanja stišljivosti u edometarskom aparatu za aluvijalne sedimente su izdvojeni na Slikama 6.14 – 6.18.



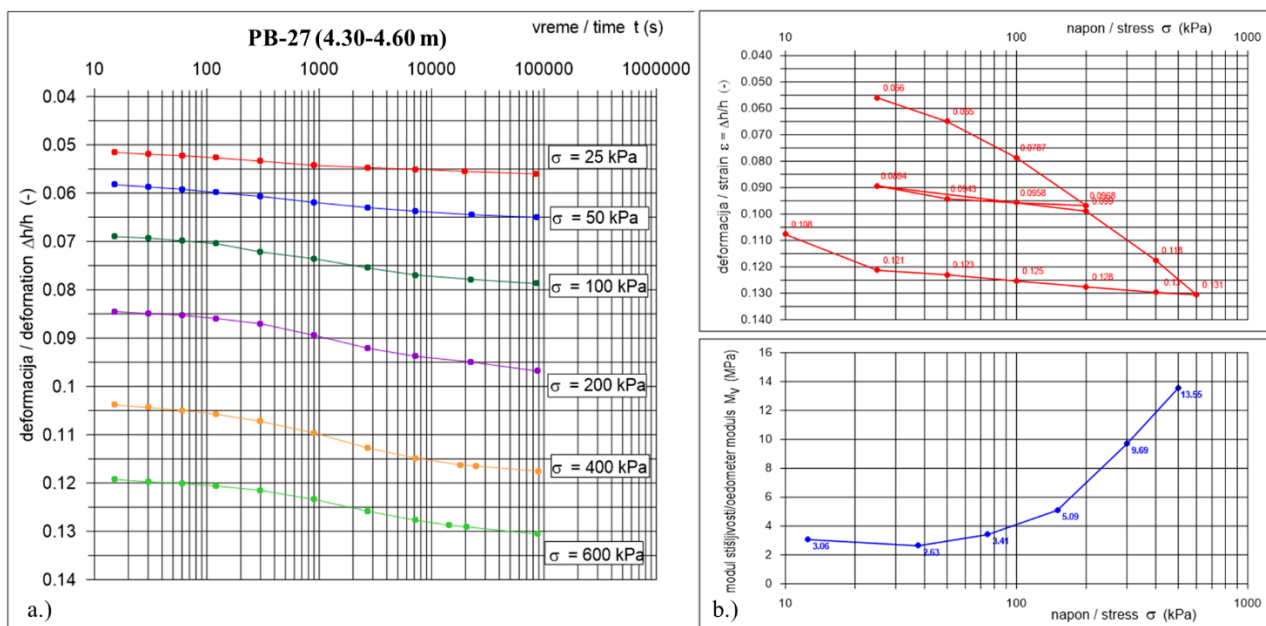
Slika 6.14. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak MB-25 (1.30-1.60 m)



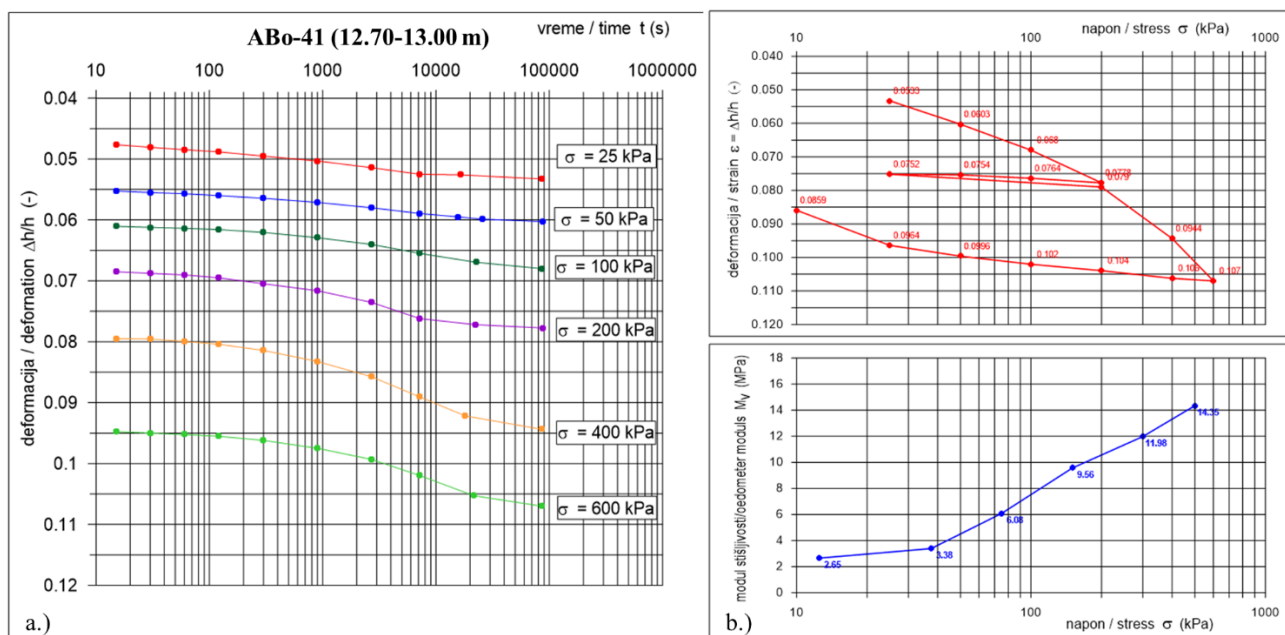
Slika 6.15. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak MB-13 (1.50-1.80 m)



Slika 6.16. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak D-2 (2.00-2.20 m)



Slika 6.17. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak PB-27 (4.30-4.60 m)



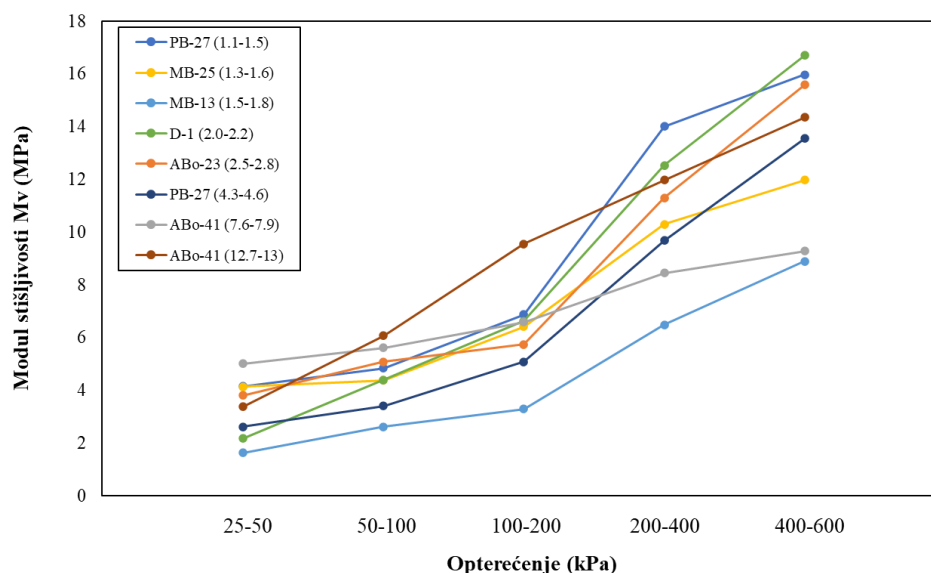
Slika 6.18. Dijagrami ispitivanja u edometarskom aparatu za uzorak ABo-41 (12.70-13.00 m)

Kod aluvijalnih sedimenata takođe je registrovan porast  $M_v$  sa povećanjem naponskog nivoa. U početnom naponskom intervalu (25-50 kPa) vrednosti  $M_v$  variraju od 1.63 do 4.14 MPa, dok pri naponskom nivou 400-600 kPa dostižu 8.89-16.71 MPa. U poređenju sa eolskim sedimentima, jedino uzorak MB-13 pokazuju niže početne vrednosti modula, dok su ostali uzorci veoma slični. Vrednosti OCR-a se kreću od 1 do 2.6 i potvrđuju normalno konsolidovano do slabo prekonsolidovano stanje. Indeks kompresije koji dostiže višu vrednost  $C_c = 0.172$  ukazuje na povećanu plastičnost i veću ukupnu stišljivost u odnosu na lesoidne gline, tako da nam i ovaj parametar ukazuje da se uzorak MB-13 ponaša drugačije u odnosu na ostale uzorke. Niske vrednosti indeksa rekompresije  $C_r = 0.004-0.021$  ukazuju na izraženu razliku između primarne konsolidacije i faze ponovnog opterećenja. Tabela je prikazana vrednost svih rezultata ispitivanja, eolskih i aluvijalnih sedimenata, koji su dobijeni u edometarskom aparatu (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Prikaz rezultata dobijenih iz edometarskog opita

Uzorak (m)	Edometarski modul stišljivosti $M_v$ (MPa)					OCR	Cc	Cr
	25-50	50-100	100-200	200-400	400-600			
<i>Eolski sedimenti – Lesoidne gline</i>								
PB-27 (1.1-1.5)	4.16	4.84	6.88	14.01	15.97	2.6	0.078	0.008
ABo-23 (2.5-2.8)	3.81	5.09	5.75	11.30	15.58	1.4	0.094	0.011
ABo-41 (7.6-7.9)	5.01	5.61	6.59	8.46	9.28	1	0.134	0.004
<i>Aluvijalni sedimenti – Aluvijalne gline</i>								
MB-25 (1.3-1.6)	4.14	4.38	6.42	10.30	11.97	2.5	0.109	0.021
MB-13 (1.5-1.8)	1.63	2.63	3.29	6.49	8.89	2.1	0.172	0.013
D-1 (2.0-2.2)	2.18	4.4	6.63	12.53	16.71	1.5	0.083	0.009
PB-27 (4.3-4.6)	2.63	3.41	5.09	9.69	13.55	1	0.105	0.013
ABo-41 (12.7-13)	3.38	6.08	9.56	11.98	14.35	1	0.092	0.004

Kod svih uzoraka uočen je porast  $M_v$  sa povećanjem naponskog nivoa, što je karakteristično za obe vrste materijala. Vrednosti stepena prekonsolidacije (OCR) nam ukazuju da su ispitivani materijali normalno konsolidovani do blago prekonsolidovani. Koeficijenti kompresije (Cc) ukazuju na nisko do srednje plastične gline, dok je kod uzorka MB-13 veći i upućuje na povećanu plastičnost i veću stišljivost. Niske vrednosti koeficijenta rekompresije (Cr), ukazuju na prisustvo strukturnih efekata i jasno izraženu razliku između ponašanja tla u primarnoj konsolidaciji i tokom rasterećenja i ponovnog opterećenja. Na Slici 6.19. je prikazan objedinjen dijagram modula stišljivosti i stepena opterećenja za sve uzorke.



Slika 6.19. Modul stišljivosti za različit stepen opterećenja

Na prikazanom dijagramu evidentan je jasan i gotovo paralelan porast modula stišljivosti ( $M_v$ ) sa povećanjem naponskog nivoa kod svih ispitivanih uzoraka, nezavisno od njihove geneze. Iako se radi o materijalima različitog genetskog porekla, sve krive pokazuju izraženo međusobno slaganje, naročito u srednjim i višim naponskim intervalima. Ovakvo ponašanje sugerise da, uprkos razlikama u sedimentacionoj genezi, dominantni faktor u višim naponskim intervalima postaje kompakcija i zatvaranje pora, dok se inicijalne strukturne razlike postepeno gube. Na osnovu ispitanih parametara stišljivosti tla i naponsko-deformacijskog ponašanja, obe vrste sedimenata se mogu analizirati kao jedinstvena celina.

## 6.4. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla ( $c_u$ ) je određena laboratorijskim i terenskim istraživanjima. U laboratoriji je nedrenirana smičuća čvrstoća određena na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla primenom četiri metode određivanja: opitom padajućeg konusa, jednoaksijalnim opitom, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom. Primenom statičkog penetracionog opita terenski je određena nedrenirana smičuća čvrstoća. Rezultati ispitivanja prikazani su pojedinačno za svaki opit, tabelarno i grafički.

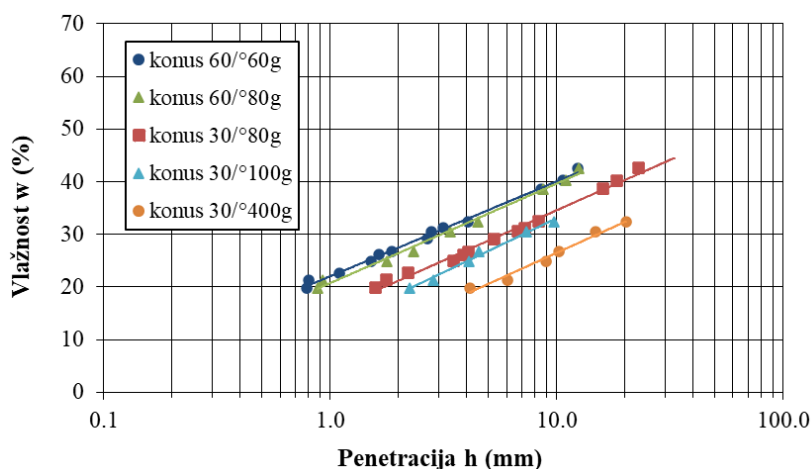
### 6.4.1. Opit padajućeg konusa

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla opitom padajućeg konusa urađena je na prerađenim i neporemećenim uzorcima. Opiti su izvedeni prema standardu (SRPS EN ISO 17892-6), a na svim uzorcima je merena nedrenirana smičuća čvrstoća sa više tipova konusa:  $60^\circ/60g$ ,  $60^\circ/80g$ ,  $30^\circ/80g$ ,  $30^\circ/100g$ ,  $30^\circ/400g$ . Nedrenirana smičuća čvrstoća je računata prema jednačini 5.10, a za svaku vlažnost ( $w_i$ ) je računata penetracija konusa ( $h_i$ ) do prirodne vlažnosti ( $w$ ). Pojedinačni dijagrami su prikazani u narednom tekstu.

#### 6.4.1.1. Eolski sedimenti – lesoidne gline

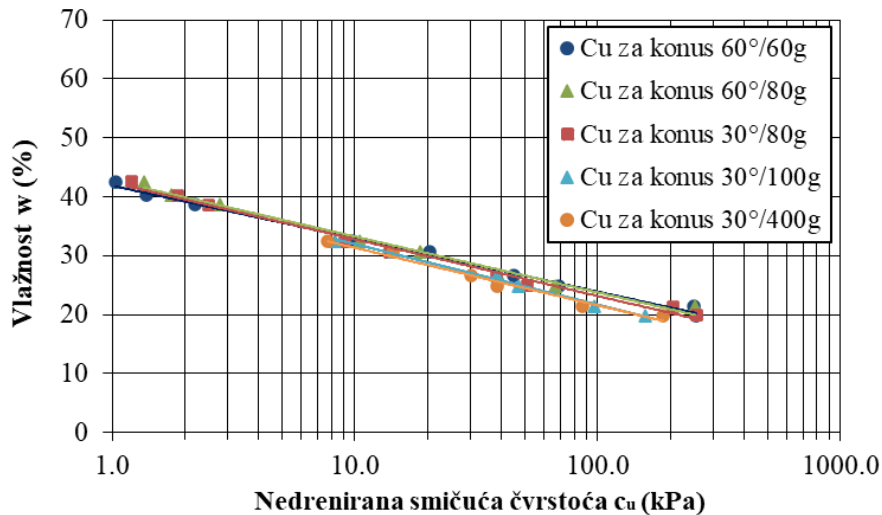
##### Uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća je rađena na prerađenim i neporemećenim uzorcima. Na prerađenim uzorcima je merena penetracija za različite vlažnosti (Slika 6.20.).



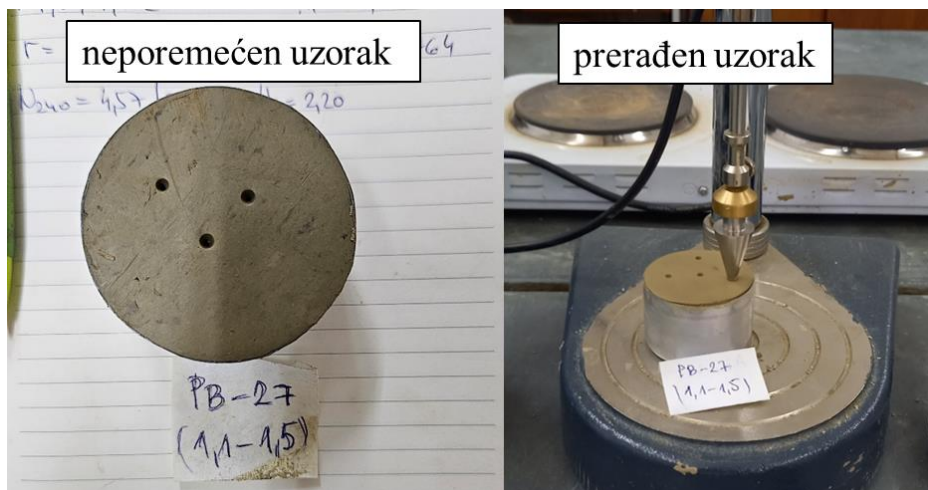
Slika 6.20. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Za konus tipa 60°/60g urađeno je 13 opita, 60°/80g urađeno je 9 opita, za konus tipa 30°/80g urađeno je 13 opita, za konus tipa 30°/100g urađeno je 6 opita i za konus najveće gramaže 30°/400g urađeno je 6 opita, tako da je na ovom uzorku urađeno ukupno 47 opita sa različitim konusima i vlažnostima. Nakon dobijenih vrednosti penetracija za date vlažnosti uzorka računala se nedrenirana smičuća čvrstoća čije su vrednosti prikazane na Slici 6.21. U tabeli 6.3. su prikazane vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenih uzoraka za vlažnost koja je približna prirodnoj vlažnosti.



Slika 6.21. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Na neporemećenom uzorku prirodne vlažnosti je merena nedrenirana smičuća čvrstoća za pet tipova konusa: 60°/60g, 60°/80g, 30°/80g, 30°/100g, 30°/400g. Vrednosti dobijenih nedreniranih smičućih čvrstoća za neporemećene uzorke prikazane su u Tabeli 6.3, a na Slici 6.22 je prikazano ispitivanje na neporemećenom i prerađenom uzorku za konus tipa 30°/100g.



Slika 6.22. Neporemećen i prerađen uzorak PB-21 (1.1-1.5 m) za konus 30°/100g

Tabela 6.3. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za PB-27 (1.1–1.5 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka $c_u$ (kPa)	274.66	281.21	333.74	319.91	401.48
Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka $c_{up}$ (kPa)	248.32	273.63	254.64	160.32	184.94
Senzitivnost $St$	1.05	1.03	1.31	2.00	2.17

U Tabeli 6.3 je istaknuta i senzitivnost materijala. Vrednosti se za različite tipove konusa kreću od 1.03 do 2.17. Prema Rosenqvist (1953) pripadaju grupi blago osetljivih glina, dok po Skemptonu i Northeyu (1952) pripadaju slabo osetljivim glinama. Nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenim i neporemećenim uzorcima sračunata je po jednačini 5.11, koja je prikazana i objašnjena u Prilogu 5. Prilikom računanja nedrenirane smičuće čvrstoće korišćene su vrednosti konstante  $c$  izdvojene u Tabeli 6.4, koje su različite za prerađene i neporemećene uzorke. Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenih uzoraka se prema standardu (SRPS EN ISO 17892-6) koriguje sa koeficijentom  $\mu$  koji se računa prema jednačini 5.13. U tabeli 6.4. je prikazan kompletan način definisanja nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i poremećene uzorke.

Tabela 6.4. Postupak definisanja nedrenirane smičuće čvrstoće kod uzorka PB-27 (1.1–1.5 m)

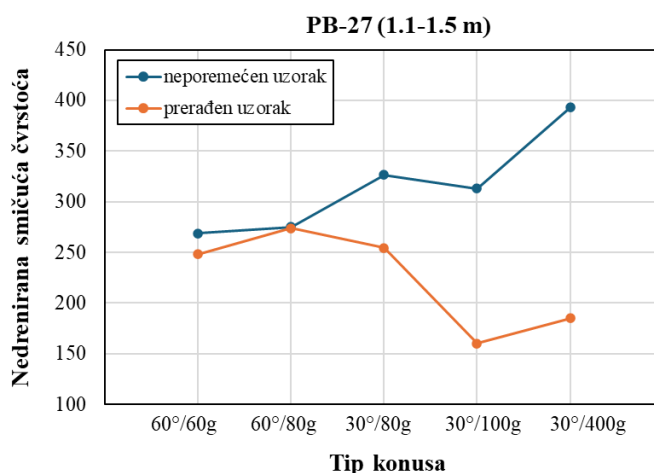
Tip konusa	Konstanta $c$		$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$m$ (kg)	$h_p$ (mm)	$h$ (mm)	$\mu$	$c_{up}$ (kPa)	$c_u$ (kPa)	$c_{ucor}$ (kPa)
	prerađen	neporemećen								
60°/60g	0.27	0.3	9.81	0.06	0.79	0.81	1.0217	261.21	268.84	274.66
60°/80g	0.27	0.3	9.81	0.08	0.88	0.92		273.63	275.25	281.21
30°/80g	0.81	1	9.81	0.08	1.58	1.55		254.64	326.66	333.74
30°/100g	0.8	1	9.81	0.1	2.24	1.77		160.32	313.13	319.91
30°/400g	0.8	1	9.81	0.4	4.12	3.16		184.94	392.97	401.48

\*  $h_p$  i  $h$  – penetracija konusa na prerađenom i neporemećenom uzorku

\*\*  $c_{up}$  i  $c_u$  – nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenom i neporemećenom uzorku

\*\*\*  $c_{ucor}$  – korigovana nedrenirana smičuća čvrstoća na neporemećenom uzorku

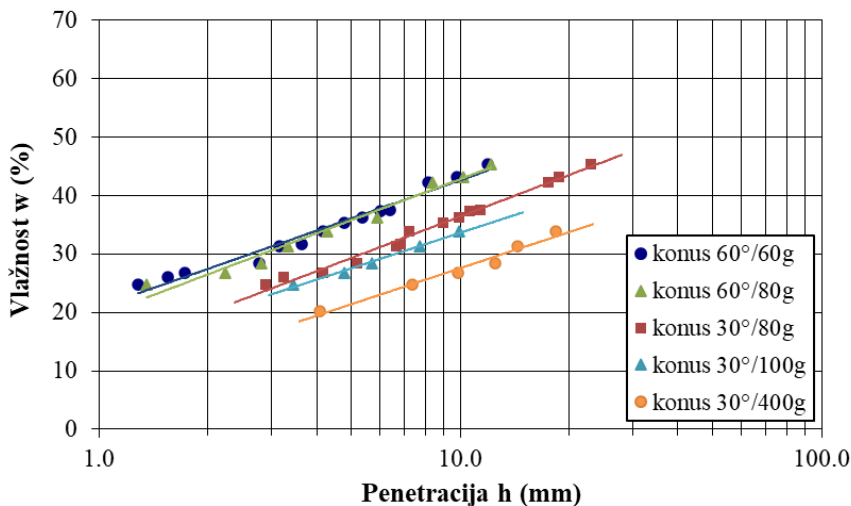
Na Slici 6.23. je prikazan dijagram vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za konuse sa uglom od 60° su jako slične dok se kod konusa sa uglom od 30° one razilaze i dosta razlikuju.



Slika 6.23. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

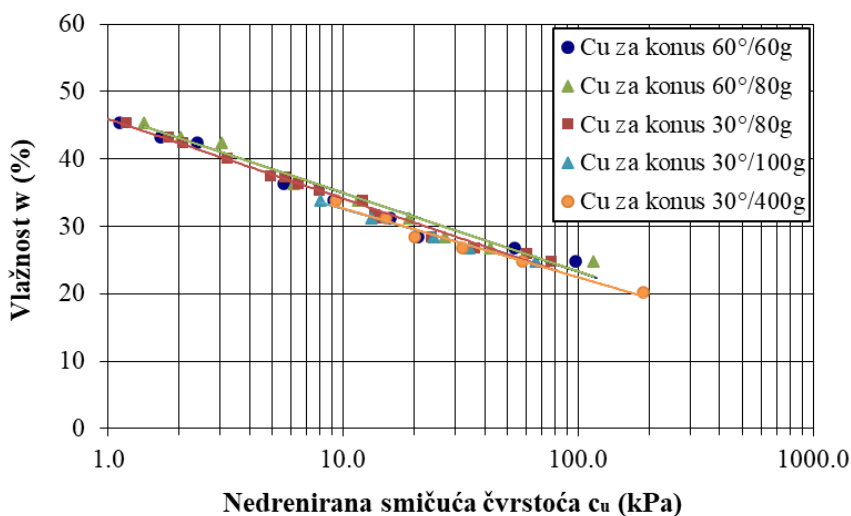
### Uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

Prilikom ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće na prerađenim uzorcima urađeno je ukupno 50 opita, za konus 60°/60g – 14 opita, za konus 60°/80g – 9 opita, za konus 30°/80g – 15 opita, za konus 30°/100g – 6 opita i za konus 30°/400g – 6 opita. Dijagram zavisnosti penetracije konusa i vlažnosti su prikazane na Slici 6.24.



Slika 6.24. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Nedrenirana smičuća čvrstoća je računata za svaku vlažnost posebno i za sve tipove konusa (Slika 6.25.) a njene vrednosti su istaknute u Tabeli 6.5.



Slika 6.25. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim uzorcima su prikazane u Tabeli 6.5. Na neporemećenom uzorcima vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za konus ugla 60° su slične – skoro identične, ali manje u odnosu na nedreniranu smičuću čvrstoću koja je dobijena konusom ugla 30°. Sve vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za konus ugla 30° su skoro iste. Na Slici 6.27 je prikazano ispitivanje na neporemećenom i prerađenom uzorku za konus 60°/80g.

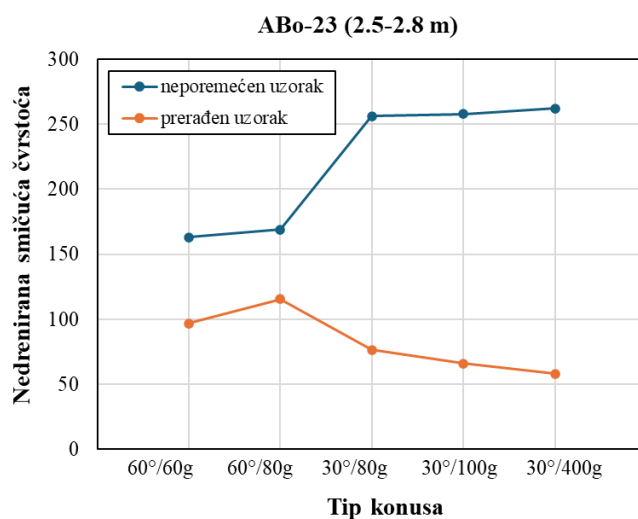
Tabela 6.5. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-23 (2.5-2.8 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka $c_u$ (kPa)	161.58	167.35	253.62	255.33	259.30
Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka $c_{up}$ (kPa)	97.00	115.41	76.64	65.94	58.11
Senzitivnost $S_t$	1.67	1.45	3.31	3.87	4.46



Slika 6.26. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) za konus 60°/80g

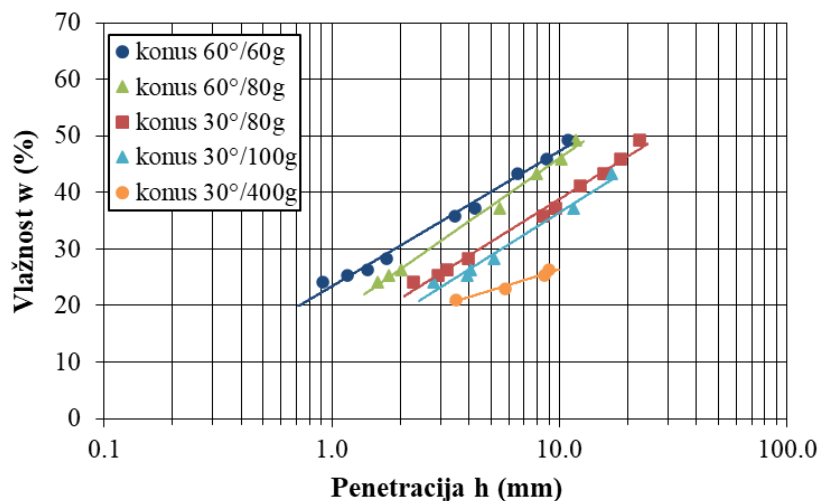
Vrednosti senzitivnosti tla se kreću od 1.45 – 4.46 i time pripadaju kategoriji slabo do srednje osetljivih glina. Vrednosti senzitivnosti variraju zavisno od upotrebe konusa. Ukoliko se koriste konusi ugla 60° vrednosti senzitivnosti su manje, samim tim i vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih i prerađenih uzoraka. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće neporemećenih uzoraka su korigovane koeficijentom  $\mu$  od 0.99. Postupak dobijanja vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće je isti kao i kod uzorka PB-27 (1.1-1.4), koji se nalazi u Tabeli 6.4. Na Slici 6.27. je prikazan dijagram vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za konuse sa uglom od 30° na neporemećenim uzorcima pokazuju nagli skok vrednosti, dok kod prerađenih uzoraka naglo padaju.



Slika 6.27. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

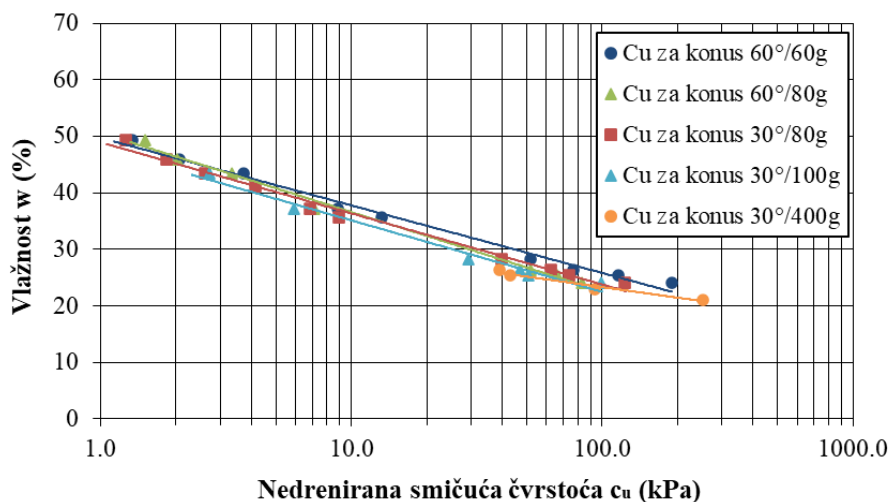
### Uzorak ABo-41(7.6-7.9 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća uzorka ABo-41 sa dubine 7.6–7.9 m određena je metodom padajućeg konusa na prerađenim i neporemećenim uzorcima. Na prerađenim uzorcima, ispitivanja su sprovedena za više nivoa vlažnosti, pri čemu je uočen jasan trend da sa porastom vlažnosti raste i penetracija konusa (Slike 6.28.).



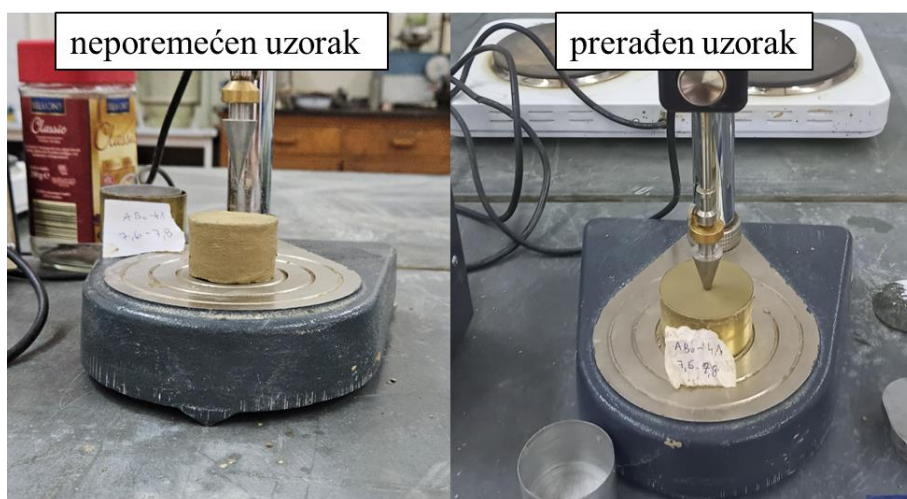
Slika 6.28. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene na prerađenim uzorcima (Slika 6.29.) pokazuju izraženu zavisnost od tipa konusa, pri čemu su najveće vrednosti registrovane za konus 60°/60g, dok su kod konusa veće mase i manjeg ugla zabeležene niže vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće (Tabela 6.6).



Slika 6.29. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Na neporemećenom uzorku prirodne vlažnosti dobijene su znatno veće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na prerađen uzorak (Tabela 6.6). Posebno su izražene razlike kod konusa manjeg ugla (30°), gde očuvana struktura tla značajno doprinosi povećanoj otpornosti na penetraciju. Uporedni prikaz ispitivanja za konus 30°/100g (Slika 6.30.) jasno ilustruje uticaj poremećaja strukture na smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće.

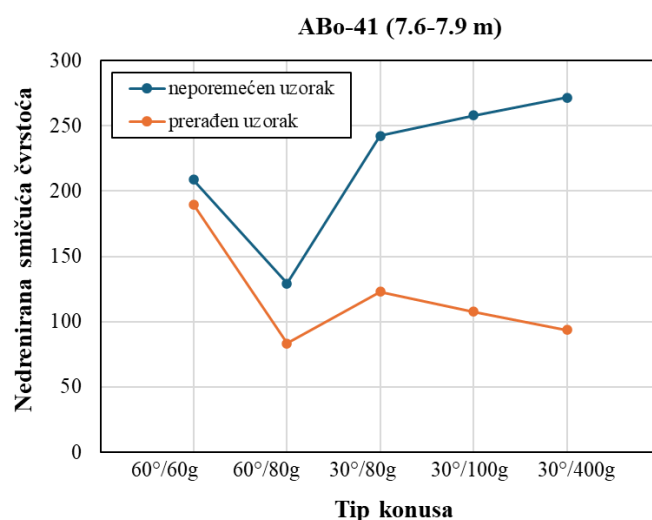


Slika 6.30. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-41(7.6-7.9 m) za konus 30°/100g

Tabela 6.6. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-41 (7.6-7.9 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka $c_u$ (kPa)	200.43	124.12	232.72	247.87	261.08
Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka $c_{up}$ (kPa)	189.82	83.29	122.82	99.39	93.64
Senzitivnost $S_t$	1.06	1.49	1.89	2.49	2.79

Prema vrednostima senzitivnosti (1.06-2.49), tlo sadrži slabo osetljive gline. Postupak dobijanja svih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće je prikazan u Tabeli 6.4, s tim što je veličina penetracije  $h$  različita i koeficijent  $\mu$  koji za ovaj uzorak iznosi 0.961. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za oba tipa uzorka su prikazani i grafički na Slici 6.31. Kod neporemećenih uzoraka jasan je trend opadanja vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće sa povećavanjem mase konusa, dok je kod neporemećenih obrnuto.

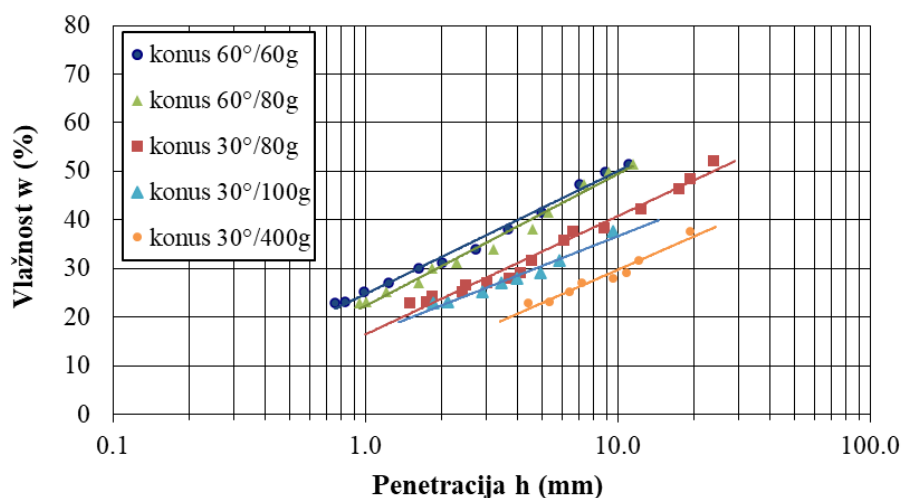


Slika 6.31. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

### 6.4.1.2. Aluvijalni sedimenti – aluvijalne gline

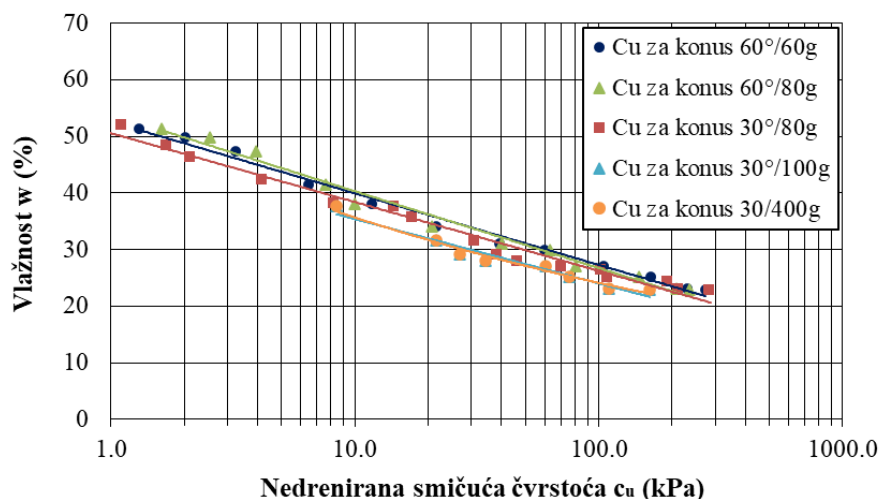
Uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

Na Slici 6.32. je prikazan odnos vlažnosti i penetracije konusa za prerađen uzorak.



Slika 6.32. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Za konus tipa 60°/60g i 60°/80g urađeno je po 12 opita, za konus tipa 30°/80g urađeno je 16 opita, za konus tipa 30°/100g urađeno je 8 opita i za konus najveće gramaže 30°/400g urađeno je 8 opita. Za ukupno 56 opita računala se nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenim uzorcima čije su vrednosti prikazane na Slici 6.33, a u Tabeli 6.7. su date vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za vlažnost koja je približna prirodnoj vlažnosti.

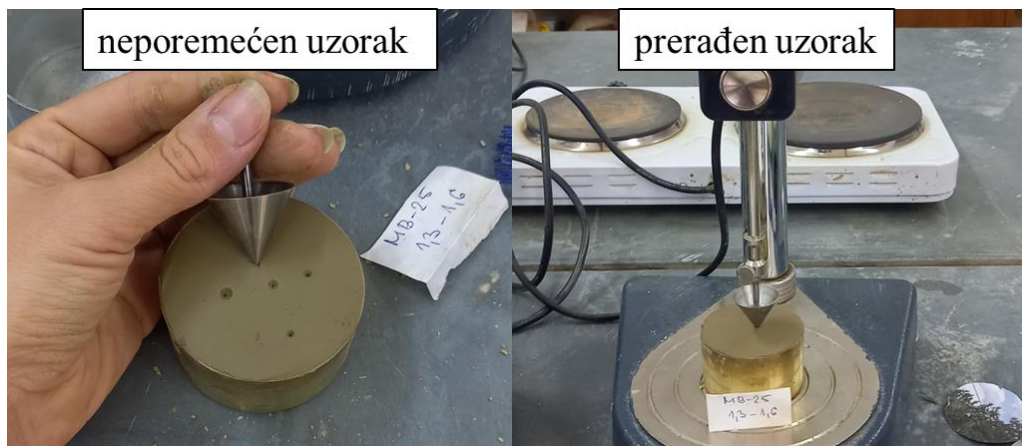


Slika 6.33. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Tabela 6.7. prikazuje vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene uzorke prirodne vlažnosti, a Slika 6.34. prikazuje primenu konusa 60°/60g na neporemećenim i prerađenim uzorcima. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su za sve tipove konusa slične, dok za najteži konus od 400g odstupaju, kako za neporemećeni uzorak tako i za prerađeni.

Tabela 6.7. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za MB-25 (1.3-1.6 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka $c_u$ (kPa)	313.97	285.99	294.89	300.73	424.78
Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka $c_{up}$ (kPa)	230.69	207.72	209.96	174.62	110.09
Senzitivnost $St$	1.36	1.38	1.40	1.72	3.86



Slika 6.34. Neporemećen i prerađen uzorak MB-25 (1.3-1.6 m) za konus 60°/60g

U Tabeli 6.8 su istaknute vrednosti konstante  $c$  koje su korišćene prilikom računanja nedrenirane smičuće čvrstoće kao i vrednosti penetracije konusa koje su dobijene na neporemećenim i prerađenim uzorcima. Na osnovu jednačine 5.11 dobijene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenom uzorku su korigovane sa koeficijentom  $\mu$ .

Tabela 6.8. Postupak definisanja nedrenirane smičuće čvrstoće kod uzorka MB-25 (1.3-1.6 m)

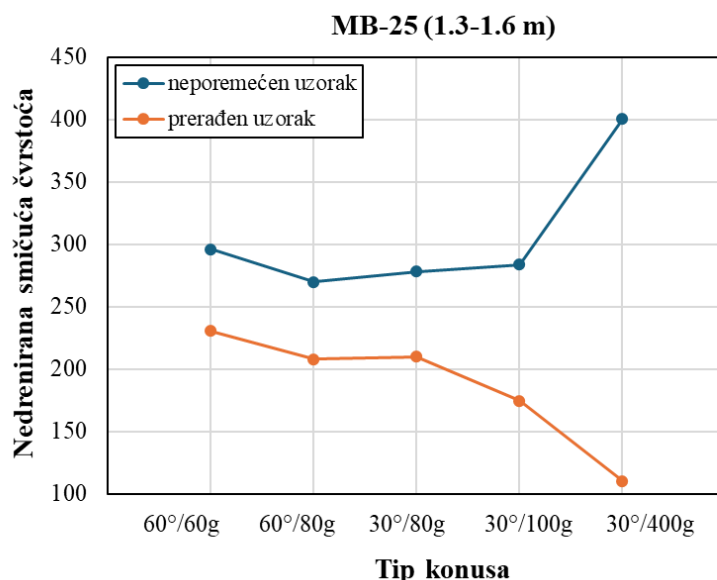
Tip konusa	Konstanta $c$		$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$m$ (kg)	$h_p$ (mm)	$h$ (mm)	$\mu$	$c_{up}$ (kPa)	$c_u$ (kPa)	$c_{ucor}$ (kPa)
	prerađen	neporemećen								
60°/60g	0.27	0.3	9.81	0.06	0.83	0.77	230.69	296.05	313.97	
60°/80g	0.27	0.3	9.81	0.08	1.01	0.94	207.72	269.66	285.99	
30°/80g	0.81	1	9.81	0.08	1.74	1.68	209.96	278.06	294.89	
30°/100g	0.8	1	9.81	0.1	2.12	1.86	174.62	283.56	300.73	
30°/400g	0.8	1	9.81	0.4	5,34	3.13	110.09	400.53	424.78	

\*  $h_p$  i  $h$  – penetracija konusa na prerađenom i neporemećenom uzorku

\*\*  $c_{up}$  i  $c_u$  – nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenom i neporemećenom uzorku

\*\*\*  $c_{ucor}$  – korigovana nedrenirana smičuća čvrstoća na neporemećenom uzorku

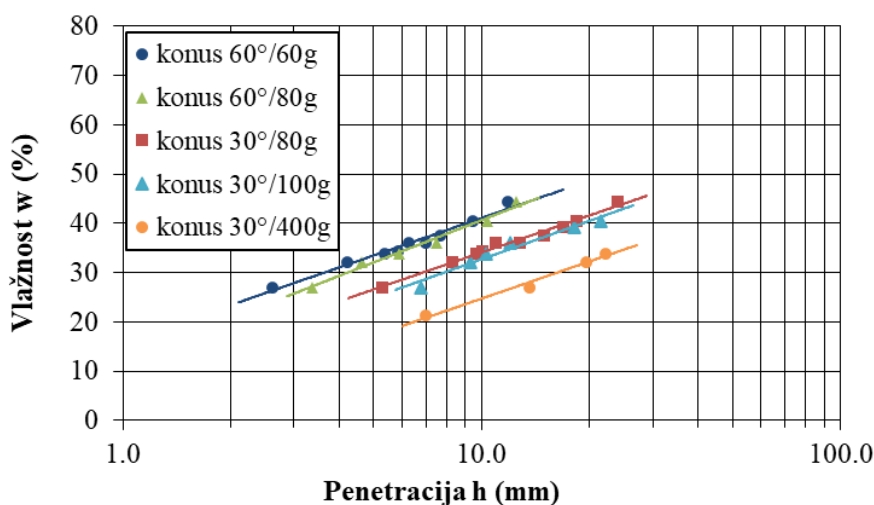
Na Slici 6.35. je prikazan dijagram vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke. Trend porasta nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka i opadanja kod prerađenih isti je kao i kod eolskih sedimenata.



Slika 6.35. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

### Uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Za razliku od prethodnog uzorka, uzorak MB-13 je mekog stanja konzistencije i mnogo veće vlažnosti. Prilikom ispitivanja urađeno je manje proba nego za ostale uzorke jer konusi većih masa nisu bili primenjivani za vlažnost koja je veća od prirodne. Na prerađenim uzorcima je merena penetracija za različite vlažnosti (Slika 6.36.).

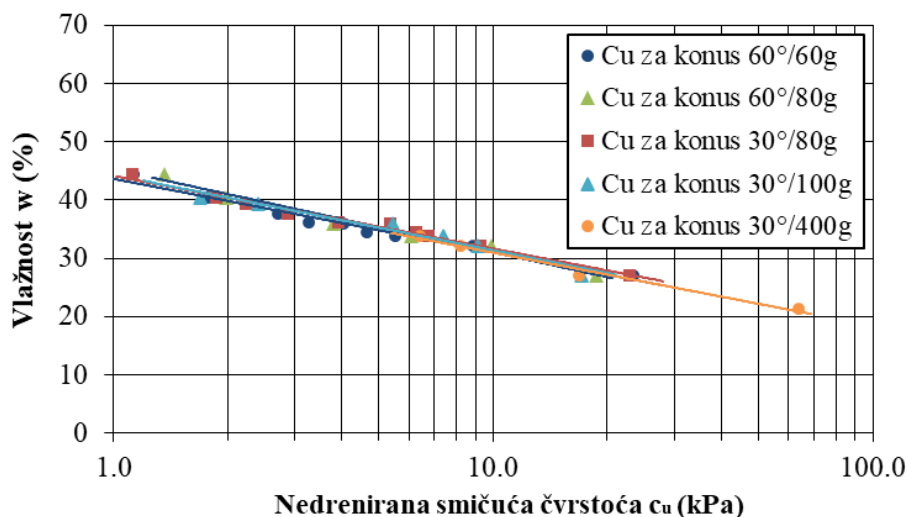


Slika 6.36. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Za konus tipa 60°/60g urađeno je 9 opita, za konus tipa 60°/80g urađeno je 6 opita, za konus tipa 30°/80g urađeno je 10 opita, za konus tipa 30°/100g urađeno je 6 opita i za konus najveće gramaže 30°/400g urađeno je 4 opita. Nakon dobijenih vrednosti penetracija za date vlažnosti uzorka računala se nedrenirana smičuća čvrstoća čije su vrednosti prikazane na Slici 6.37. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene i neporemećene uzorke za prirodnu vlažnost su izdvojene u Tabeli 6.9.

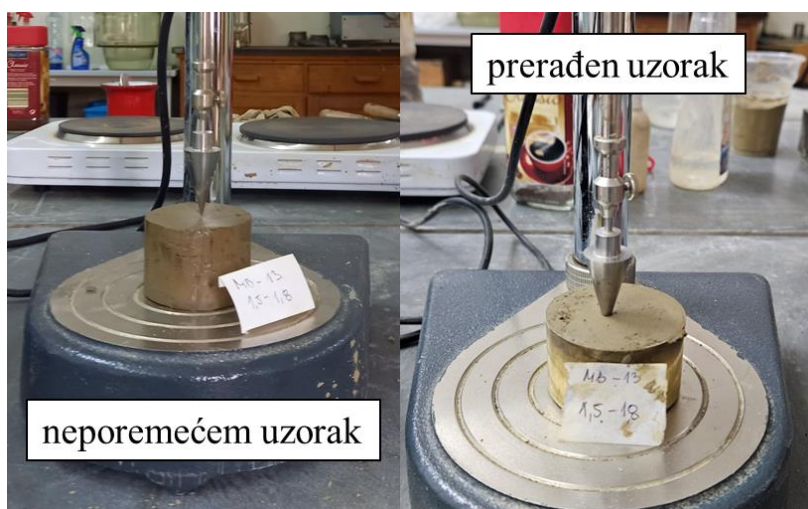
Tabela 6.9. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za MB-13 (1.5-1.8 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za neporemećen uzorak	62.66	64.78	63.65	72.42	80.70
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za prerađen uzorak	5.53	6.09	6.76	7.37	6.42
Senzitivnost St	11.33	10.64	9.42	9.83	12.57



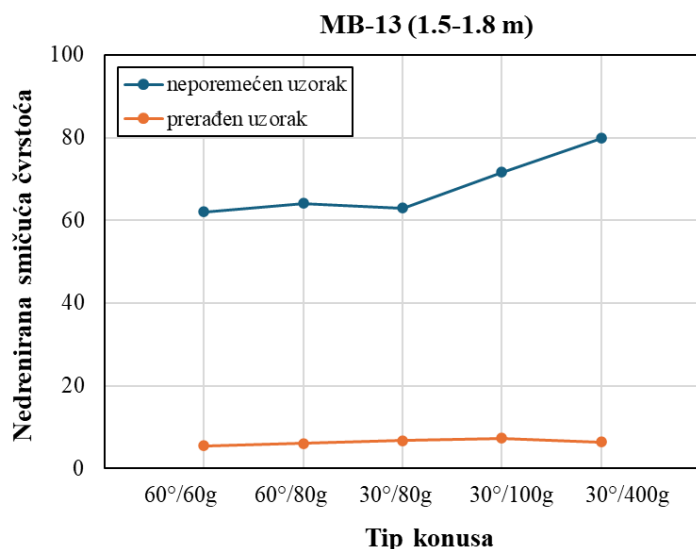
Slika 6.37. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Vrednosti nedrenirane čvrstoće na prerađenim uzorcima su jako male. Senzitivnost ovih uzoraka je mnogo veća nego kod ostalih. Prema Rosenqvist (1953) ova vrsta tla pripada izuzetno osetljivim – „sporim glinama“, dok po Skemptonu i Northey (1952) pripadaju veoma osetljivim glinama. Na Slici 6.38 je prikazano ispitivanje na neporemećenom i prerađenom uzorku za konus 30°/80g.



Slika 6.38. Neporemećen i prerađen uzorak MB-13 (1.5-1.8 m) za konus 30°/80g

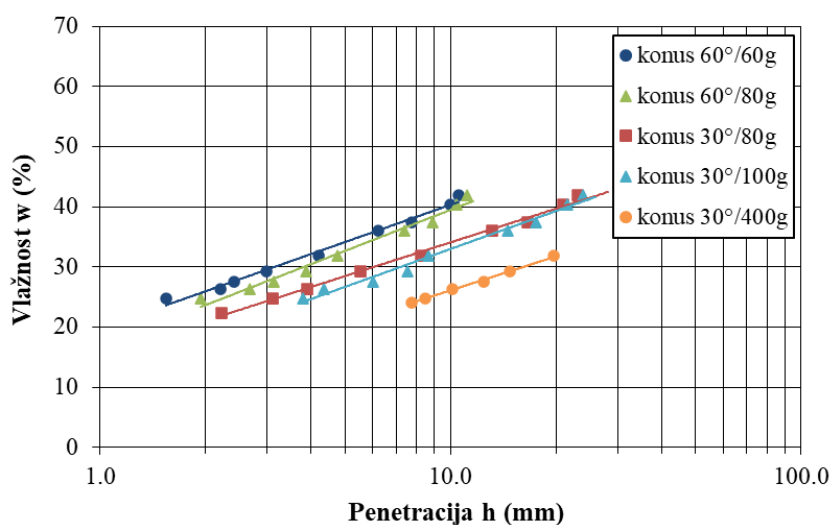
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su korigovane koeficijentom  $\mu = 1.011$ , a računata su prema svim stavkama iz Tabele 6.8. Drastične razlike u dobijenim vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće su vidljive i na Slici 6.39.



Slika 6.39. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

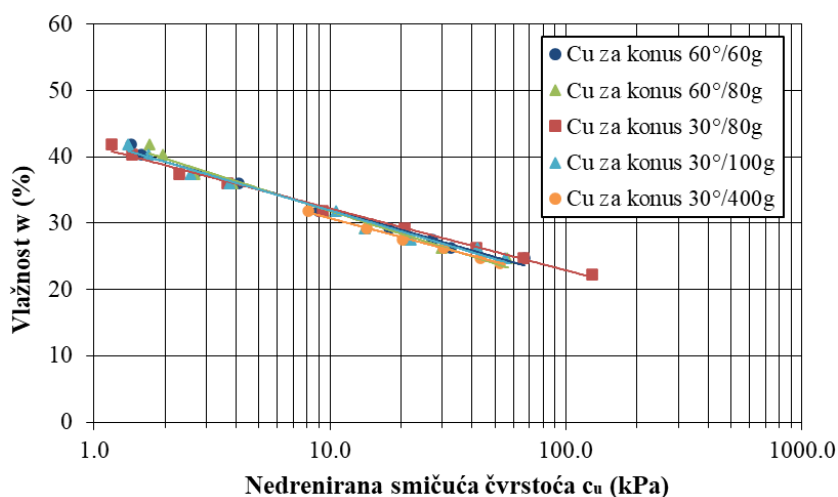
#### Uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenim i neporemećenim uzorcima je prikazana u Tabeli 6.10. Na prerađenim uzorcima je merena penetracija za različite vlažnosti (Slika 6.40.).



Slika 6.40. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Za konuse tipa 60°/60g, 60°/80g, 30°/80g i 30°/100g urađeno je po 9 opita, a za konus najveće gramaže 30°/400g urađeno je 6 opita. Ukupno je izvedeno 42 opita. Nakon dobijenih vrednosti penetracija za date vlažnosti uzorka računala se nedrenirana smičuća čvrstoća čije su vrednosti prikazane na Slici 6.41.

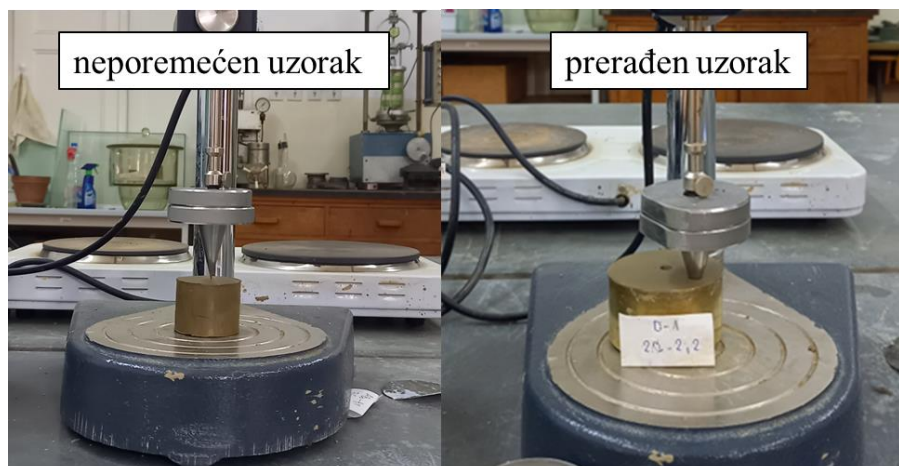


Slika 6.41. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Tabela 6.10. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za D-1 (2.0-2.2 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

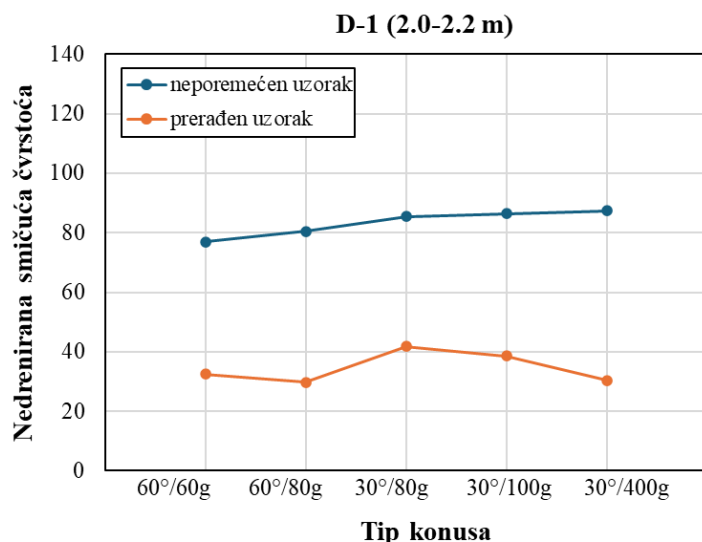
Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka $c_u$ (kPa)	79.49	83.18	88.31	89.24	90.30
Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka $c_{up}$ (kPa)	32.54	29.72	41.79	38.55	30.47
Senzitivnost $S_t$	2.44	2.80	2.11	2.31	2.96

Prema računatoj senzitivnosti uzorci priradaju srednje osetljivim glinama. Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenog uzorka računata je na osnovu iznetih parametara u Tabeli 6.8., a korigovana je koeficijentom  $\mu = 1.033$ . Na Slici 6.42. je prikazano ispitivanje na neporemećenom i prerađenom uzorku za konus 30°/400g.



Slika 6.42. Neporemećen i prerađen uzorak D-1 (2.0-2.2 m) za konus 30°/400g

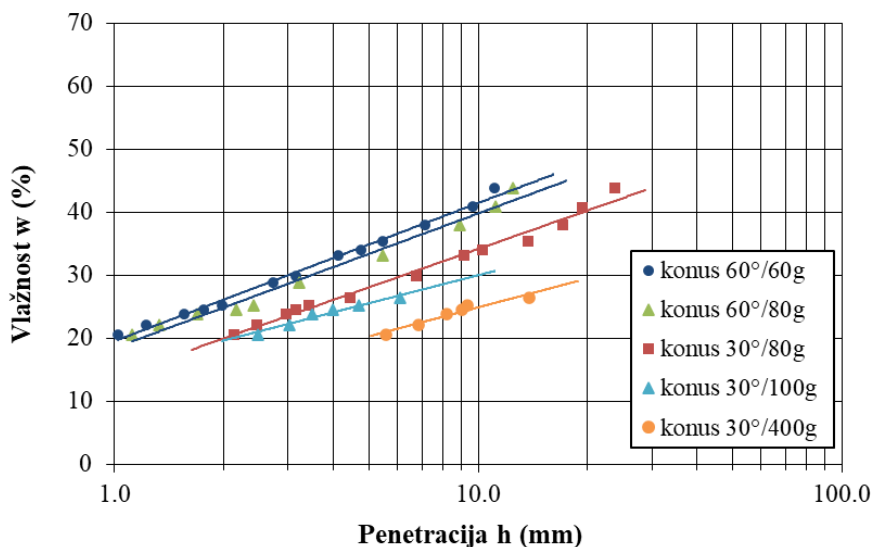
Grafički prikaz porasta i opadanja vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke je prikazan na Slici 6.43.



Slika 6.43. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

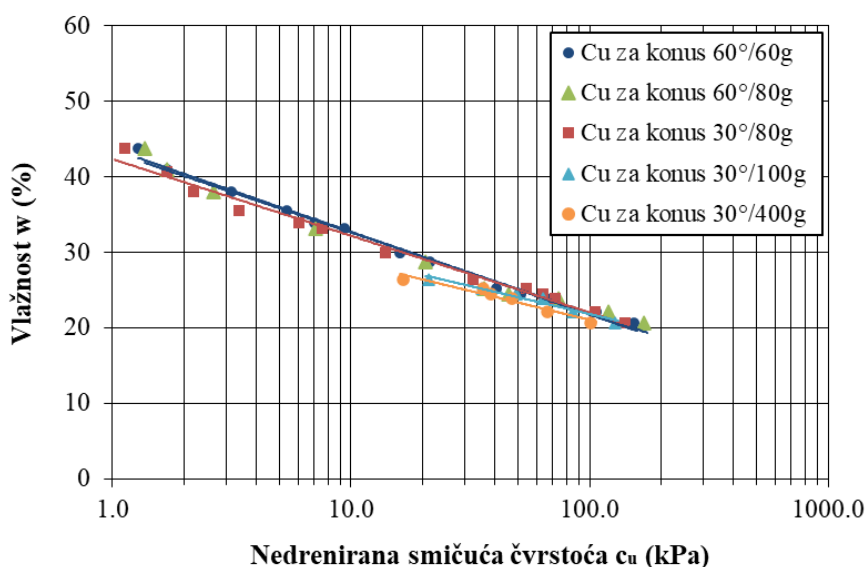
#### Uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Kao i za sve uzorke i za PB-27 (4.3-4.6 m) je prvo merena penetracija konusa za različite vlažnosti (Slika 6.44.). Ukupno je urađeno 48 opita, gde je za konus tipa 60°/60g urađeno je 13 opita, za konus tipa 60°/80g urađeno je 10 opita, za konus tipa 30°/80g urađeno je 13 opita, za konus tipa 30°/100g urađeno je 6 opita i za konus 30°/400g urađeno je 6 opita.



Slika 6.44. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Nakon dobijenih vrednosti penetracija za date vlažnosti uzorka računala se nedrenirana smičuća čvrstoća (Slika 6.45.) čije su vrednosti računane prema definisanim parametrima iz Tabele 6.8.



Slika 6.45. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Razlike nedrenirane smičuće čvrstoće na prerađenim i neporemećenim uzorcima su prikazane u Tabeli 6.11. Nedrenirana smičuća čvrstoća neporemećenih uzoraka je korigovana, uvećana je za 1.011. Na Slici 6.46. je prikazano ispitivanje na neporemećenom i prerađenom uzorku za konus 60°/60g.

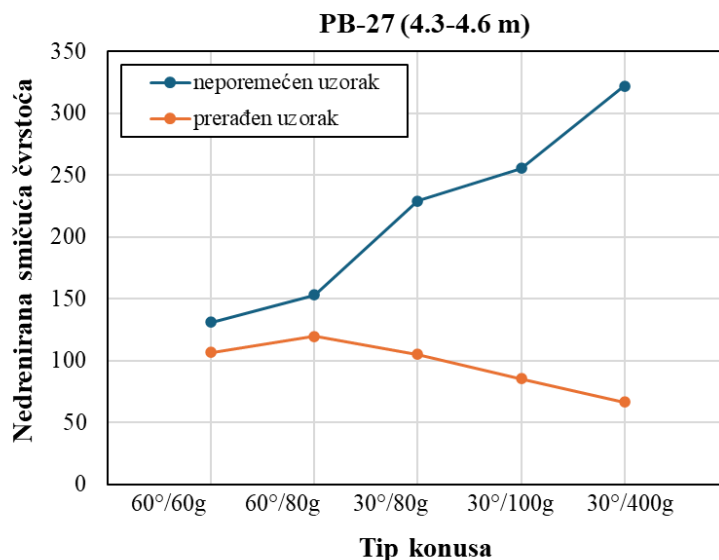
Tabela 6.11. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za PB-27 (4.3-4.6 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za neporemećen uzorak	132.63	154.75	231.75	258.08	325.59
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za prerađen uzorak	106.77	119.79	105.04	85.48	66.51
Senzitivnost $S_t$	1.24	1.29	2.21	3.02	4.90



Slika 6.46. Neporemećen i prerađen uzorak PB-27 (4.3-4.6 m) za konus 60°/60g

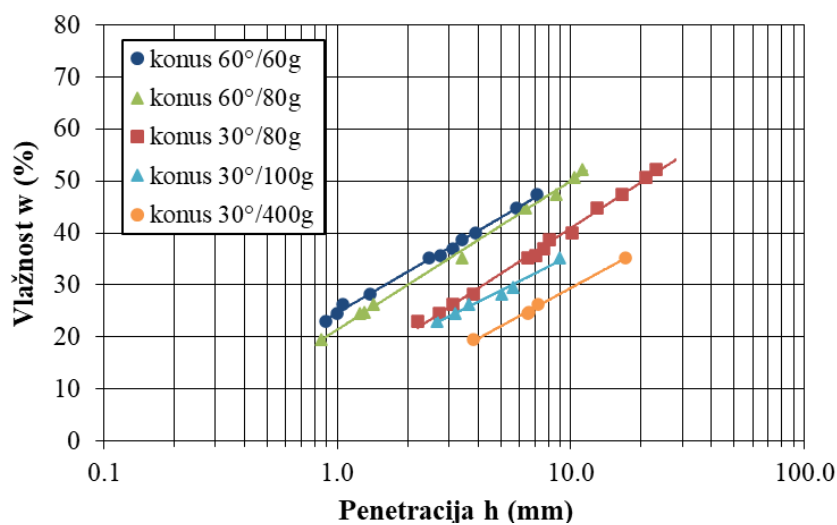
Na Slici 6.47. prikazan je nagli porast nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka, dok je za prerađene izražen pad nedrenirane smičuće čvrstoće sa porastom mase konusa.



Slika 6.47. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

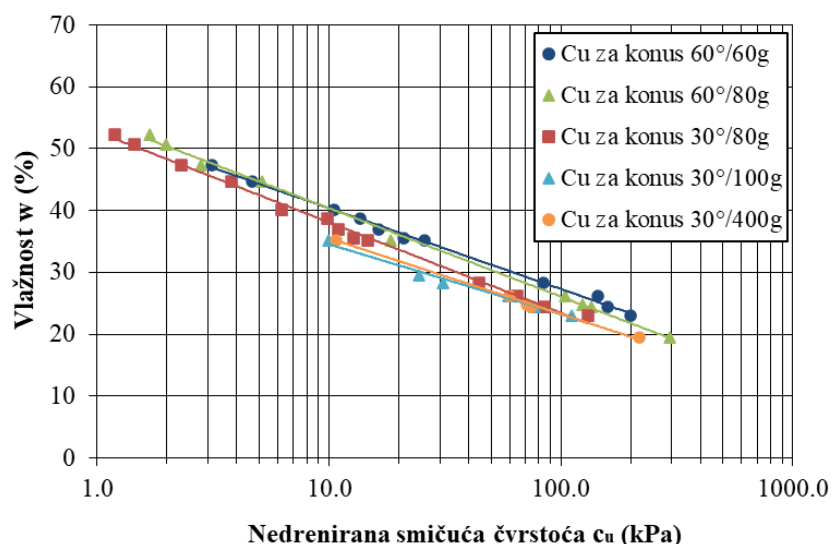
Uzorak ABo-41(12.7-13 m)

Uzorak ABo-41 sa veće dubine (12.7–13.0 m) pokazuje slično mehaničko ponašanje u poređenju sa plićim uzorkom istog profila. Zavisnost penetracije konusa i vlažnosti je prikazan Slikom 6.48.



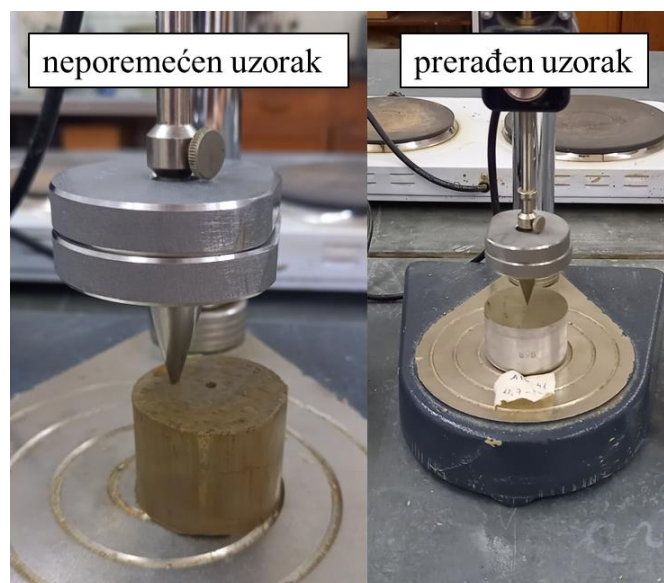
Slika 6.48. Dijagram zavisnosti dubine penetracije ( $h$ ) od vlažnosti ( $w$ )

Na prerađenom uzorku uočen je izražen pad vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće sa porastom vlažnosti (Slike 6.49.).



Slika 6.49. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$

Neporemećeni uzorci sa ove dubine pokazuju visoke i relativno ujednačene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za sve tipove konusa (Tabela 6.12). Najveće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene su za konuse manjeg ugla i veće mase, što potvrđuje značajan doprinos očuvane strukture. Uporedni prikaz ispitivanja za konus 30°/400g (Slika 6.50.) prikazuje razliku između prerađenog i neporemećenog stanja.

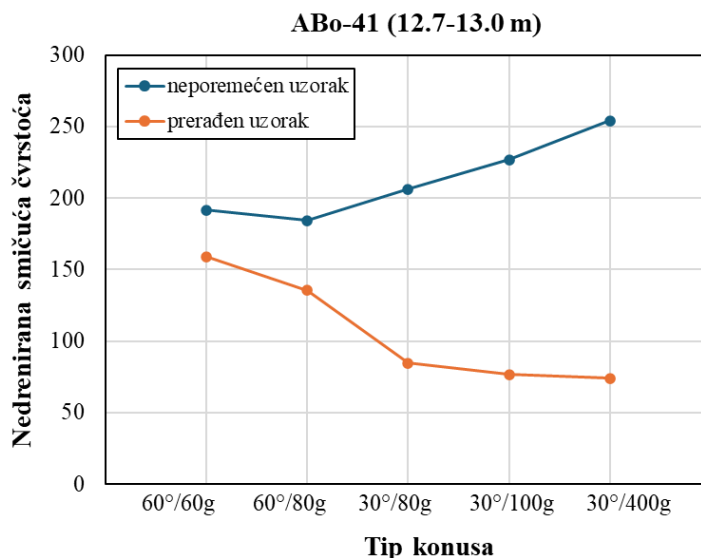


Slika 6.50. Neporemećen i prerađen uzorak ABo-41(12.7-13 m) za konus 30°/400g

Tabela 6.12. Nedrenirana smičuća čvrstoća i senzitivnost tla za ABo-41(12.7-13 m) na prerađenim i neporemećenim uzorcima pri prirodnoj vlažnosti

Tip konusa	60°/60g	60°/80g	30°/80g	30°/100g	30°/400g
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za neporemećen uzorak	197.94	190.48	213.22	234.25	262.46
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za prerađen uzorak	158.92	135.61	84.67	76.64	74.07
Senzitivnost $S_t$	1.25	1.40	2.52	3.06	3.54

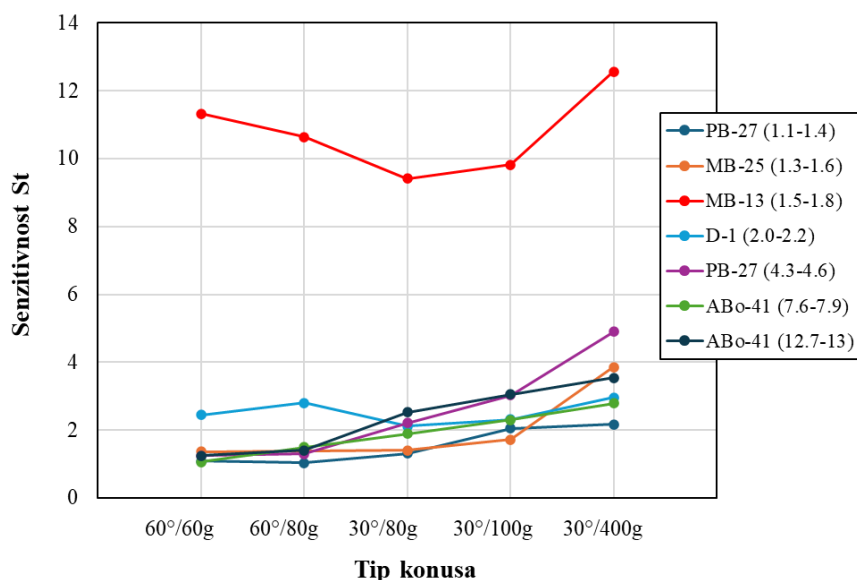
Na Slici 6.51. prikazan je odnos nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenog i prerađenog uzorka. Isti je trend rasta i opadanja nedrenirane smičuće čvrstoće kao kod svi ispitivanih uzoraka.



Slika 6.51. Grafički prikaz nedrenirane smičuće čvrstoće na neporemećenim i prerađenim uzorcima

Rezultati svih analiziranih uzoraka, kako eolskih (lesoidne gline), tako i aluvijalnih sedimenata (aluvijalne gline), pokazuju jasno definisan trend ponašanja tla. Kod prerađenih uzoraka registrovan je pad nedrenirane smičuće čvrstoće sa porastom vlažnosti, što je u skladu sa očekivanim smanjenjem međuzrnske sile usled povećanja sadržaja vode. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su kod neporemećenih uzoraka u svim slučajevima veće u odnosu na prerađene uzorke, što ukazuje na značaj prirodne strukture tla. Prilikom merenja nedrenirane smičuće čvrstoće posebno je izražen uticaj geometrije i mase konusa. Konusi manjeg ugla ( $30^\circ$ ), a veće mase (100 g i 400 g), daju veće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka, dok je kod prerađenih uzoraka obrnuto – sa porastom mase konusa opadaju vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Ovakvo ponašanje možemo pripisati strukturnim vezama u samom tlu koje su izražene kod konusa manjeg ugla ili odabirom konstanti  $c$  koja se uzima prilikom računanja nedrenirane smičuće čvrstoće.

Vrednosti senzitivnosti pokazuju da većina ispitivanih uzoraka pripada kategoriji slabo do srednje osetljivih gline, sem za uzorak MB-13. Ovaj uzorak se izdvaja kao izuzetno osetljiv (ekstremno osetljive gline) sa veoma visokim vrednostima senzitivnosti (Slika 6.52.).



Slika 6.52. Senzitivnost ispitivanih uzoraka

Iako su rasponi senzitivnosti različiti, opšti trend kod svih uzoraka potvrđuje da poremećaj strukture dovodi do smanjenja nedrenirane smičuće čvrstoće. U poređenju eolskih i aluvijalnih sedimenata može se zaključiti da, i pored različitog porekla i manjih varijacija u vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće, ispitivani materijali pokazuju veoma slično ponašanje. Kod svih uzoraka uočava se:

- porast penetracije sa porastom vlažnosti,
- smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće kod prerađenih uzoraka u odnosu na neporemećene,
- uticaj geometrije i mase konusa na procenu mehaničkog ponašanja tla u prerađenom stanju,
- veće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka,
- porast senzitivnosti sa primenom konusa manjeg ugla ( $30^\circ$ ) i veće mase.

Ovakva ujednačenost trendova ukazuje da ispitivani materijali, iako podeljeni prema genetskom tipu na eolske i aluvijalne sedimente, imaju slične inženjerskogeološke karakteristike i sličan odgovor na poremećaj strukture. Razlike se pre svega ogledaju u stepenu senzitivnosti i dobijenim vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće, ali je mehanizam ponašanja u osnovi isti. Iz tih razloga će se uzorci prilikom verifikacije (Poglavlje 9) razmatrati i tumačiti zajedno, po dubini uzorkovanja.

Ukupno posmatrano, rezultati potvrđuju da metoda padajućeg konusa predstavlja pouzdanu ali osetljivu metodu za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće i procenu senzitivnosti glinovitih sedimenata, pri čemu izbor tipa konusa kao i konstante  $c$  značajno utiče na interpretaciju dobijenih rezultata. Standardom SRPS EN ISO 17892-6 nije tačno definisana konstanta  $c$  za konuse većih masa, ona se teorijski pretpostavlja da je u funkcija samo geometrije konusa ali ne i mase, pa je usvojena ista kao za konus  $30^\circ/80g$ . U odnosu na referentni konus ( $30^\circ/80g$ ), neporemećeni uzorci za konus od 100g daju blago povećane vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće (za oko 5%). Konus od 400g sistematski daje više vrednosti. Kod prerađenih uzoraka varijabilnost je veća, ali je efekat mase manje izražen nego kod neporemećenih uzoraka. Ipak, konus od 400 g pokazuje značajna odstupanja (15-30 %). Ovakvo ponašanje se može pripisati većom penetracijom kod težih konusa, promenom mehanizma smicanja u zoni oko konusa gde se aktivira šira zona deformacije i delom zbog odabira konstante  $c$ . Primena konusa  $60^\circ/80g$  pokazala se kao pouzdana i prihvatljiva, iako u standardu nije uvršćena za upotrebu.

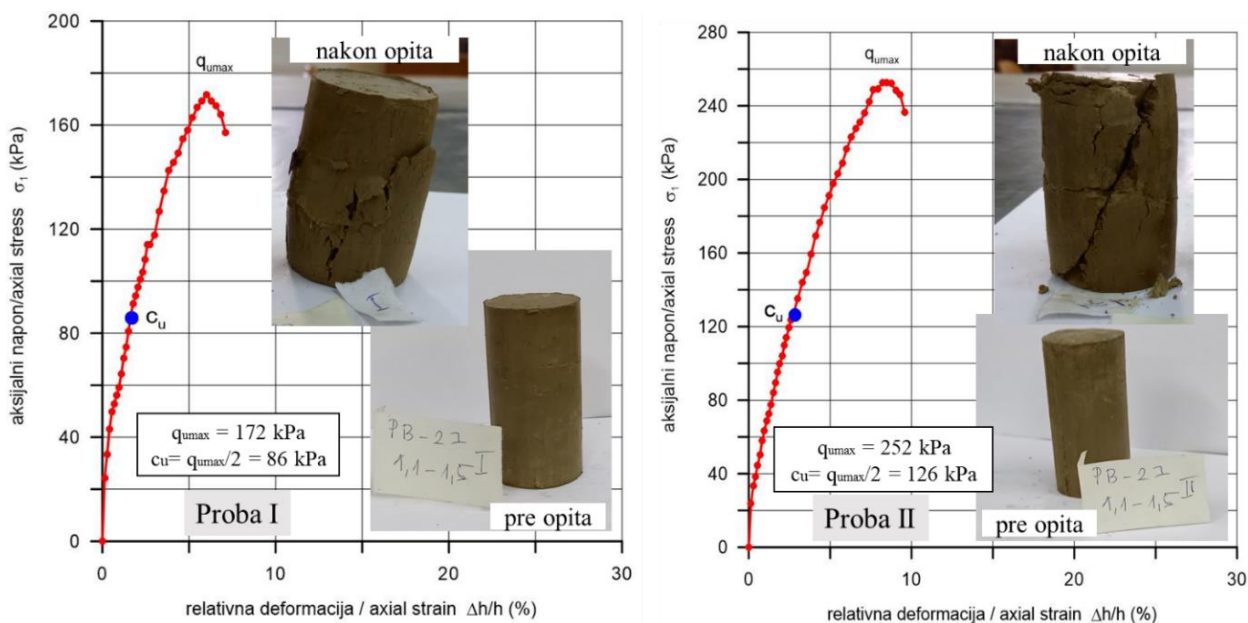
## 6.4.2. Jednoaksijalni opit

Na istim materijalima na kojima su izvršeni opiti sa padajućim konusom, izvršeni su i opiti jednoaksijalne kompresije, koji su prikazani u nastavku sa pripadajućim dijagramima, gde je nedrenirana smičuća čvrstoća ispitana na neporemećenim i prerađenim uzorcima tla.

### 6.4.2.1. Eolski sedimenti – lesoidne gline

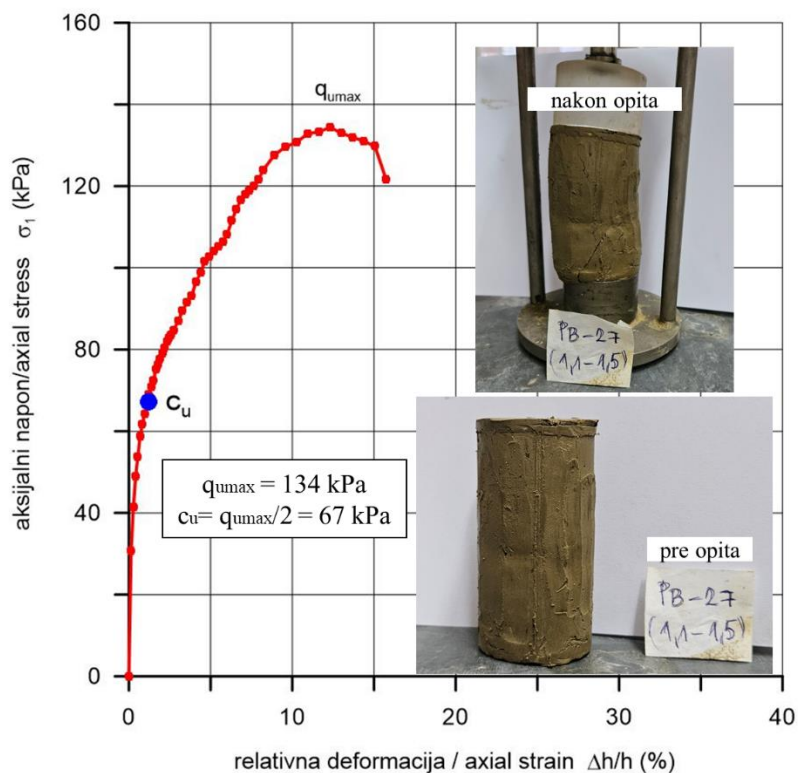
#### Uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Prilikom određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće izdvojena su dva neporemećena probna tela za analizu. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku na kome je prikazan i način interpretacije nedrenirane smičuće čvrstoće (polovina jednoaksijalne čvrstoće), sa jasno vidljivim ravnima loma, je prikazan za obe probe na Slici 6.53.



Slika 6.53. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku PB-27 (1.1-1.5 m)

Pored neporemećenih uzoraka, jednoaksijalni opit je urađen i na prerađenom uzorku (Slika 6.54.).



Slika 6.54. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

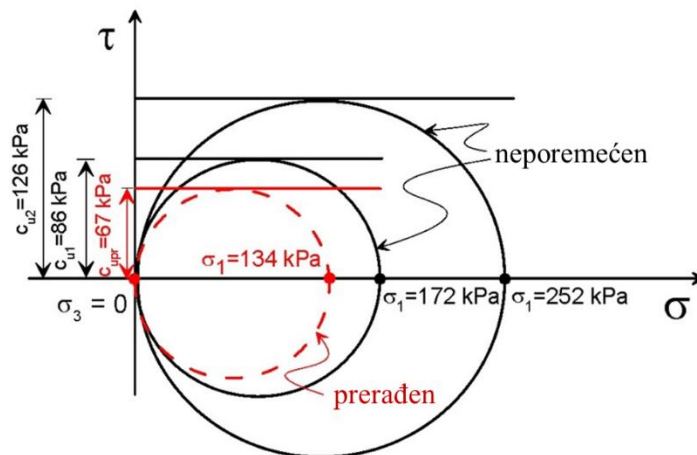
Jednoaksijalni opit izveden je na tri probna tela: dva neporemećena i jedan prerađen. Tokom ispitivanja registrovane su vrednosti aksijalne sile i promene visine uzorka, na osnovu kojih su izračunate vrednosti aksijalnog napona ( $\sigma_1$ ) i relativne deformacije ( $\epsilon$ ), određena jednoaksijalna čvrstoća na pritisak ( $q_u$ ), kao i nedrenirana smičuća čvrstoća ( $c_u$ ). Svi parametri su računati prema Jednačinama 5.15-18 iz Poglavlja 5.2.2. Vrednosti jednoaksijalne čvrstoće i nedrenirana smičuća čvrstoća, kao i senzitivnost tla su prikazane u Tabeli 6.13. Nedrenirana smičuća čvrstoća kod neporemećenog uzorka se za dve probe razlikuje, tako da je za dalju analizu uzeta srednja vrednost koja iznosi 106 kPa.

Tabela 6.13. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	172	252	106	134	1.58
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	86	126		67	

Vidljivo je da prerađeni uzorak ima manju nedreniranu čvrstoću u odnosu na neporemećeni uzorak. Smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće posledica je razaranja prirodne strukture tla, prekida veza između čestica i gubitka strukturne kohezije unutar probnog tela. Iz tih razloga maksimalni napon kod prerađenog uzorka dostiže se pri većim relativnim deformacijama, dok je kod neporemećenog uzorka za dostizanje maksimalnog napona potrebna manja relativna deformacija. Budući da je kod prerađenog uzorka izmenjena originalna struktura, ne dolazi do izraženog naglog loma, za razliku od neporemećenog uzorka. Grafički prikaz Mohr-ovih krugova konstruisanih na osnovu maksimalnih napona ( $\sigma_1$ ) dobijenih u jednoaksijalnom opitu prikazan je na Slici 6.55. S obzirom na to da je u ovom opitu  $\sigma_3 = 0$ , centar kruga nalazi se na polovini vrednosti  $\sigma_1$ , dok je radijus jednak  $c_u = q_u/2$ . Razlika u veličini krugova jasno ilustruje smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće kod prerađenog uzorka u

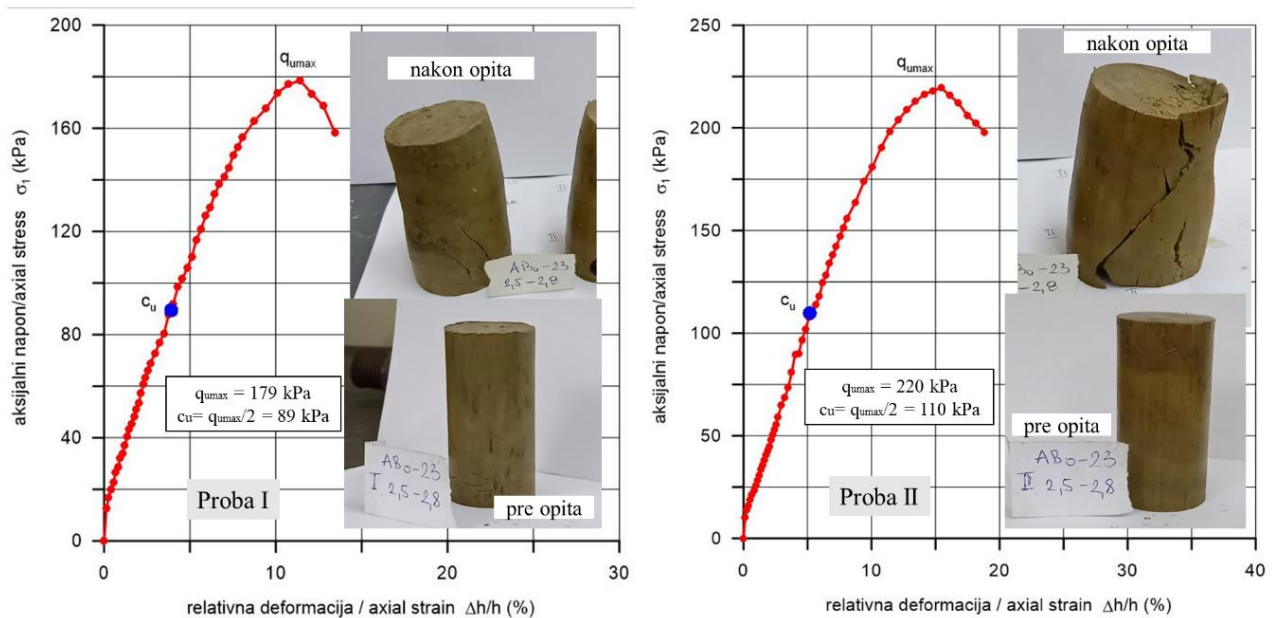
odnosu na neporemećene uzorke. Isti postupak interpretacije primenjen je i za ostale uzorke, te se isti prikaz neće ponavljati.



Slika 6.55. Grafička interpretacija rezultata određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$

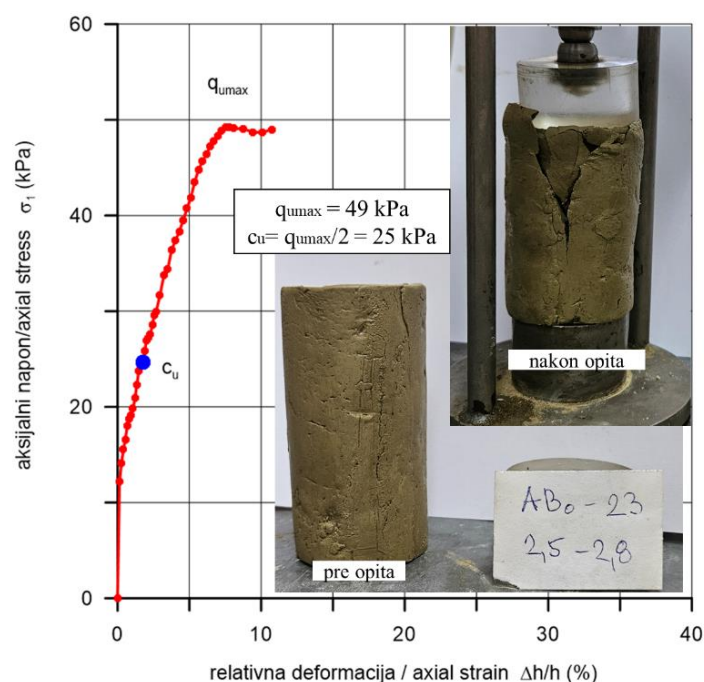
### Uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

Neporemećena probna tela uzorka ABo-23 (2.5-2.8 m) pokazuju međusobno uporedive vrednosti jednoaksijalne čvrstoće, pri čemu je kod Probe II registrovana nešto veća nedrenirana smičuća čvrstoća u odnosu na Probu I. Razlika između dve probe ukazuje na umerenu prirodnu heterogenost, ali i na dobru ponovljivost rezultata. Iz dobijenih vrednosti jednoaksijalne čvrstoće izračunate vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće potvrđuju konzistentan odnos između ove dve čvrstoće, karakterističan za glinovita tla u neporemećenom stanju (Slika 6.56.).



Slika 6.56. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-23 (2.5-2.8 m)

Dijagram na Slici 6.57 je vezan za prerađeni uzorak.



Slika 6.57. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

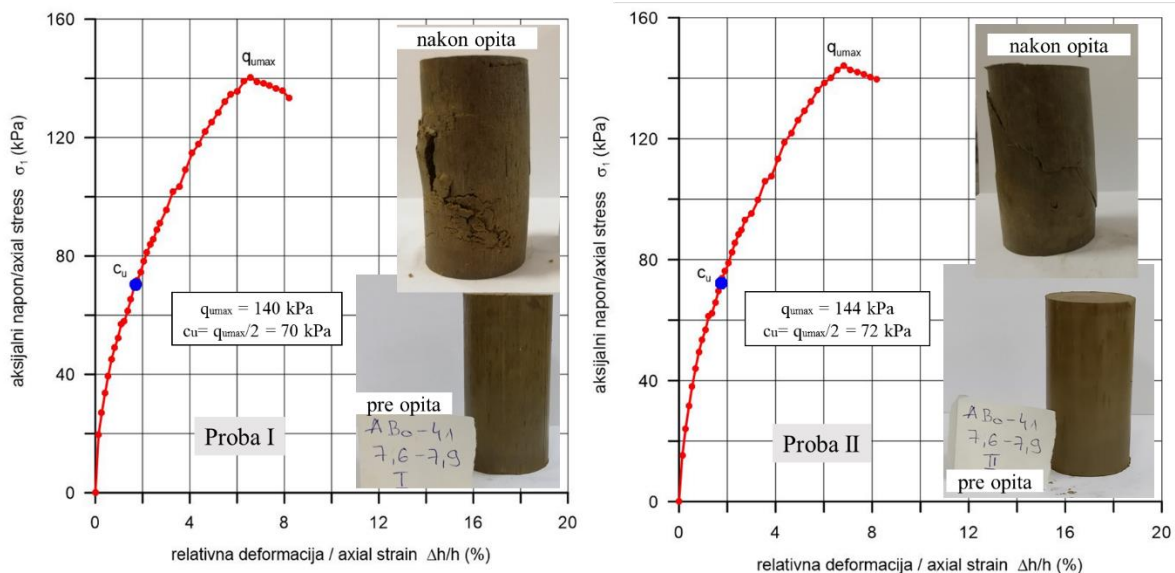
Vrednosti jednoaksijalne čvrstoće i nedrenirane smičuće čvrstoće su prikazane u Tabeli 6.14. Smanjenje čvrstoće kod prerađenog uzorka je veliko i može se pripisati gubitku prirodne strukture tla usled pripreme, što potvrđuje izraženu strukturnu komponentu. To se znatno odrazilo i na relativne deformacije gde je jednoaksijalna čvrstoća u slučaju prerađenog uzorka mobilisana ranije nego kod neporemećenih uzoraka. Senzitivnost je 4, i ovi materijalai prema ovom parametru pripadaju srednje osetljivim glinama.

Tabela 6.14. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	179	220	100	49	4.00
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	89	110		25	

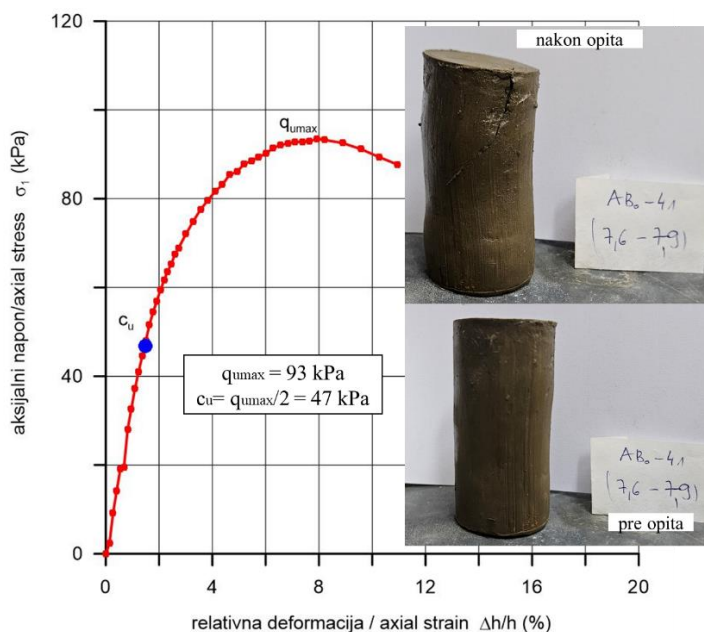
#### Uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

Rezultati jednoaksijalne čvrstoće za Probu I i Probu II uzorka ABo-41 (7.6-7.9 m) su gotovo identične, što ukazuje na homogeno mehaničko ponašanje materijala na ovoj dubini i dobru ponovljivost ispitivanja (Slika 6.58).



Slika 6.58. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-41 (7.6-7.9 m)

Prerađen uzorak pokazuje niže vrednosti kako jednoaksijalne, tako i nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na neporemećena probna tela. Razlika u odnosu na neporemećene uzorke je umerena (Slika 6.59).



Slika 6.59. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

U Tabeli 6.15. su izdvojene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće.

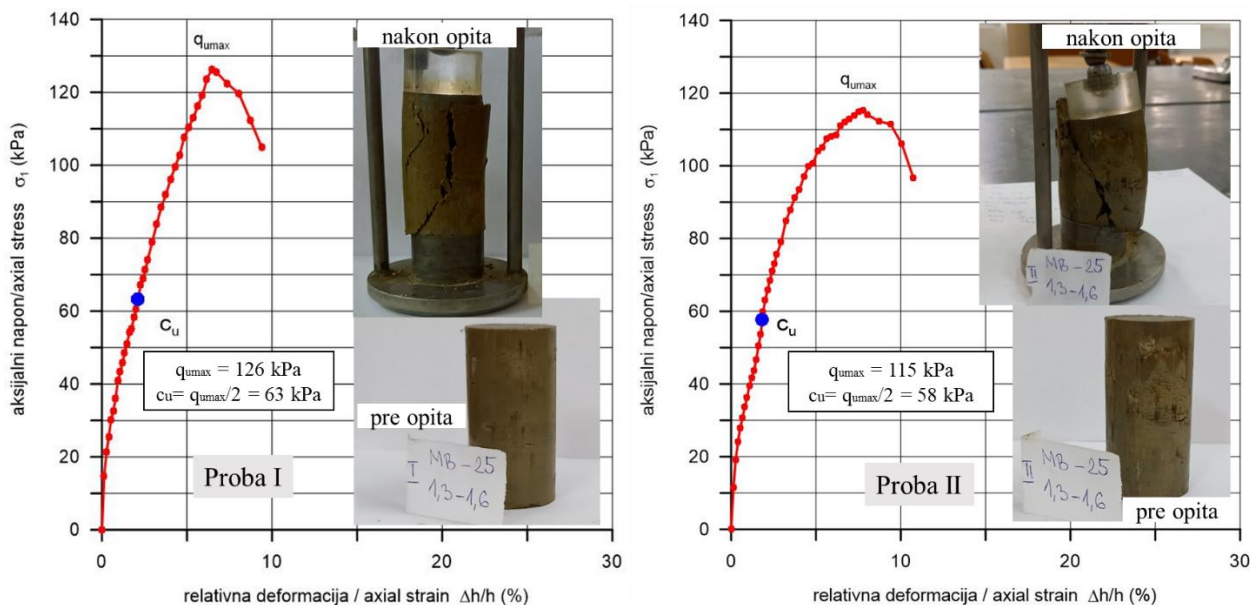
Tabela 6.15. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	140	144	71	93	1.51
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	70	72			

### 6.4.2.2. Aluvijalni sedimenti – aluvijalne gline

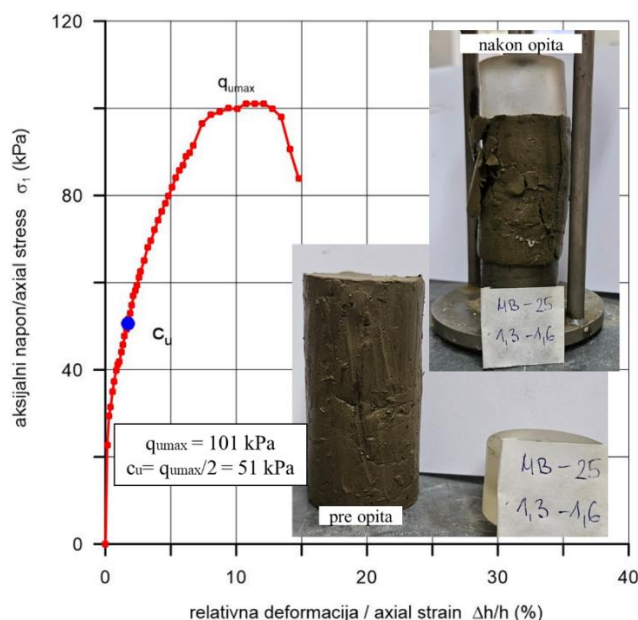
#### Uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

Na Slici 6.60. su prikazani neporemećeni uzorci – dve probe, na kojima se može zapaziti da je lom za oba probna tela bio krt.



Slika 6.60. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku MB-25 (1.3-1.6 m)

Dijagram jednoaksijalne čvrstoće na prerađenom uzorku je predstavljen Slikom 6.61.



Slika 6.61. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

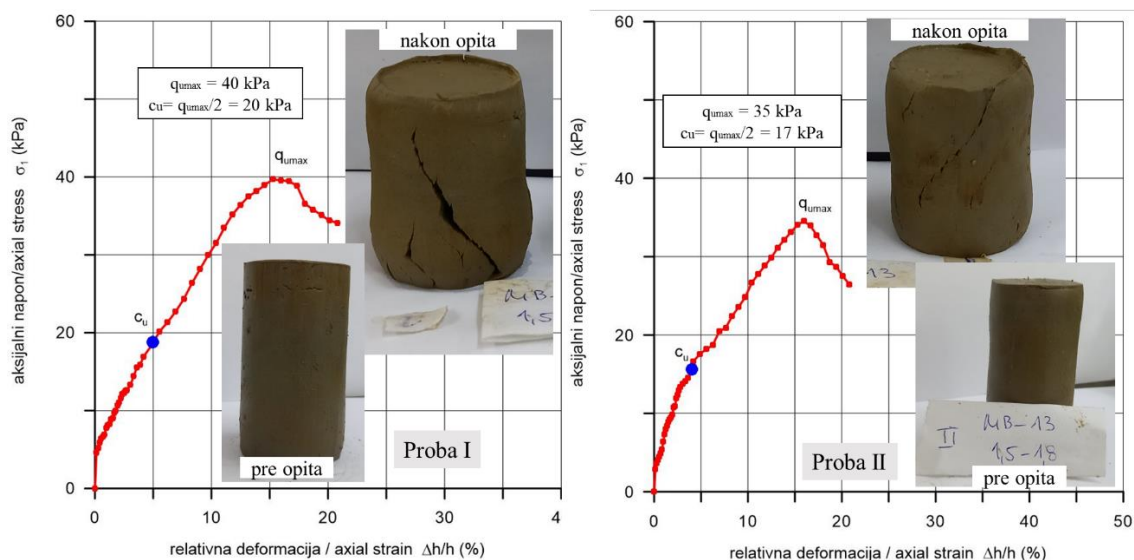
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za obe varijante su veoma slične (Tabela 6.16.). Srednja vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećeni uzorak je 61 kPa, a senzitivnost iznosi 1.20 i pripada slabo osetljivim glinama.

Tabela 6.16. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

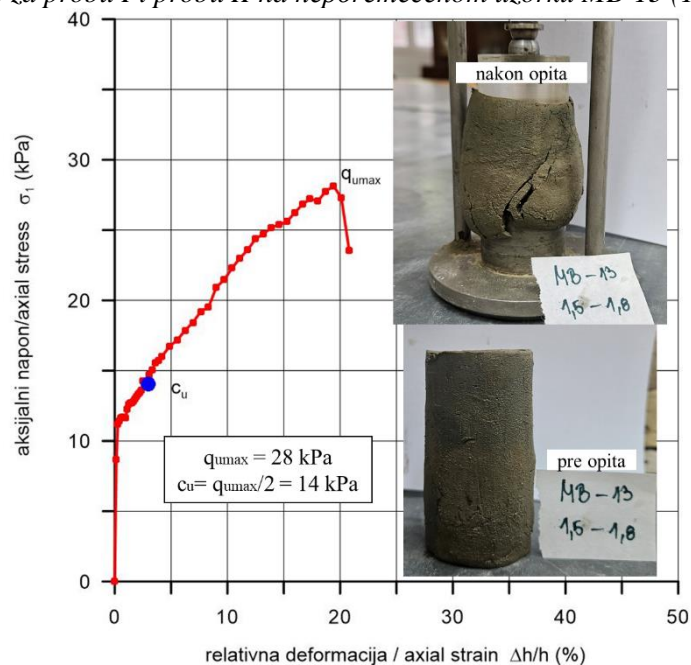
Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	126	115	61	101	1.20
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	63	58		51	

### Uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Za ovaj uzorak je za sva tri slučaja izražen meki lom, što se može videti na Slikama 6.62 i 6.63.



Slika 6.62. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku MB-13 (1.5-1.8 m)



Slika 6.63. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Jednoaksijalne čvrstoće kao i nedrenirane smičuće čvrstoće su veoma niske i ukazuju da se radi o vrlo mekanim materijalima (Tabela 6.17.).

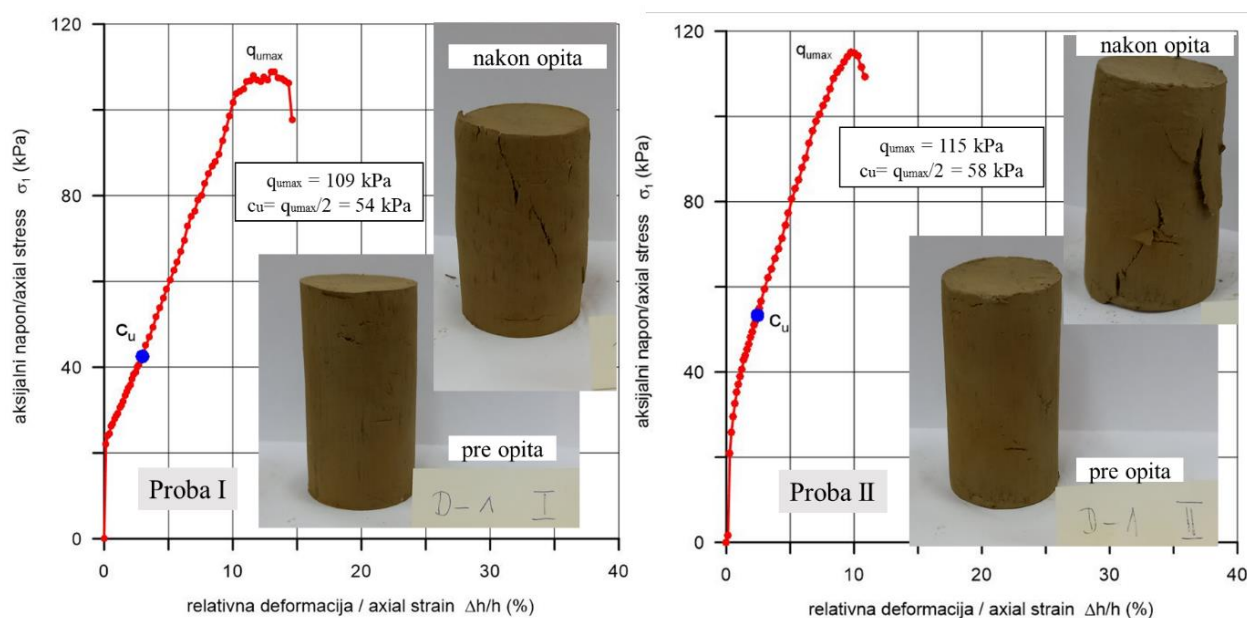
Tabela 6.17. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	40	35	18	28	1.29
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	20	17		14	

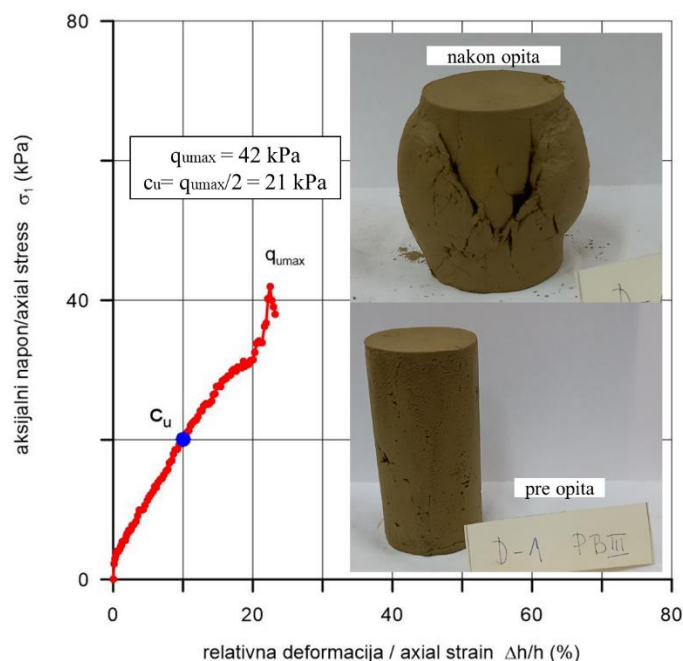
Prema konzistentnom stanju, uzorak se svrstava u veoma meke gline, dok prema vrednosti senzitivnosti dobijenoj jednoaksijalnim opitom pripada grupi slabo osetljivih glina. Metodom padajućeg konusa određena je znatno veća vrednost senzitivnosti, prema kojoj uzorak spada u grupu ekstremno osetljivih glina. Ovakva razlika može se objasniti različitom prirodom primenjenih metoda ispitivanja, budući da je opit padajućeg konusa osetljivija na strukturne promene, naročito nakon prerade uzorka.

### Uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

Dijagram jednoaksijalne kompresije je prikazan za neporemećene uzorke na Slici 6.64. Lom kod ovih uzoraka je plastičan, dok je kod prerađenog uzorka mekan lom (Slika 6.65.).



Slika 6.64. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku D-1 (2.0-2.2 m)



Slika 6.65. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

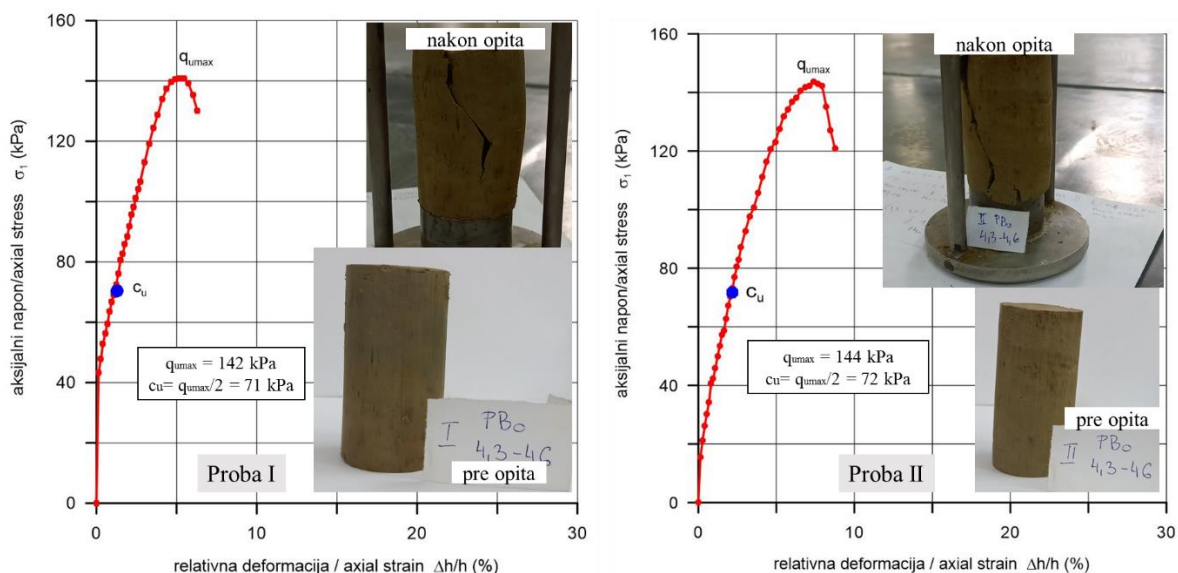
Nedrenirana smičuća čvrstoća za prerađeni uzorak je duplo manja u odnosu na neporemećeni čija je srednja vrednost 56 kPa (Tabela 6.18.). Na osnovu određene senzitivnosti uzorak pripada srednje osetljivim glinama.

Tabela 6.18. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	109	115	56	42	2.67
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	54	58		21	

#### Uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Kod uzorka PB-27 (4.3-4.6 m) neporemećena probna tela pokazuju vrlo slične vrednosti jednoaksijalne čvrstoće, što ukazuje na homogeno mehaničko ponašanje materijala na ispitanjoj dubini. Odgovarajuće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su takođe bliske, čime se potvrđuje dobra pouzdanost dobijenih rezultata (Slika 6.66. i Tabela 6.19.).



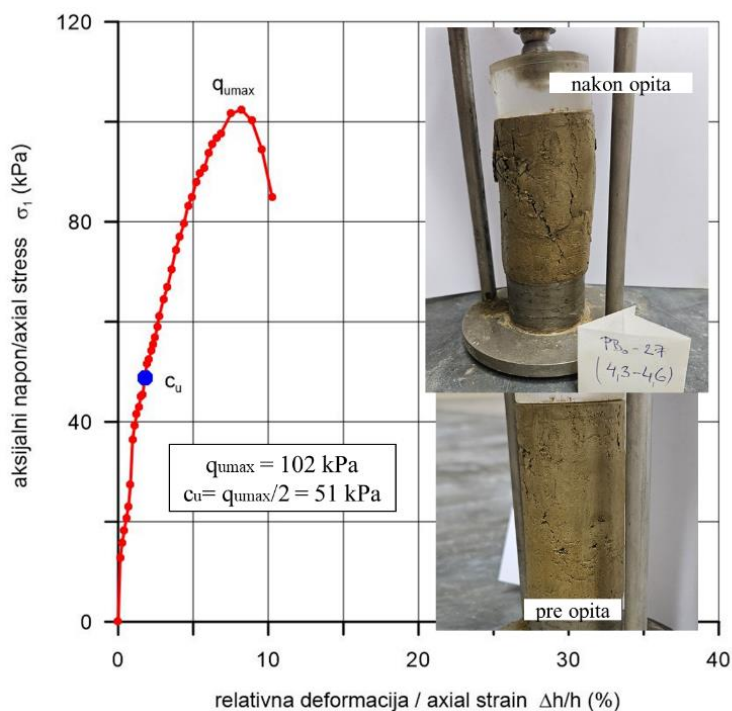
Slika 6.66. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku PB-27 (4.3-4.6m)

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećeni i prerađeni uzorak su prikazane u Tabeli 6.19.

Tabela 6.19. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	142	144	72	102	1.41
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	71	72		51	

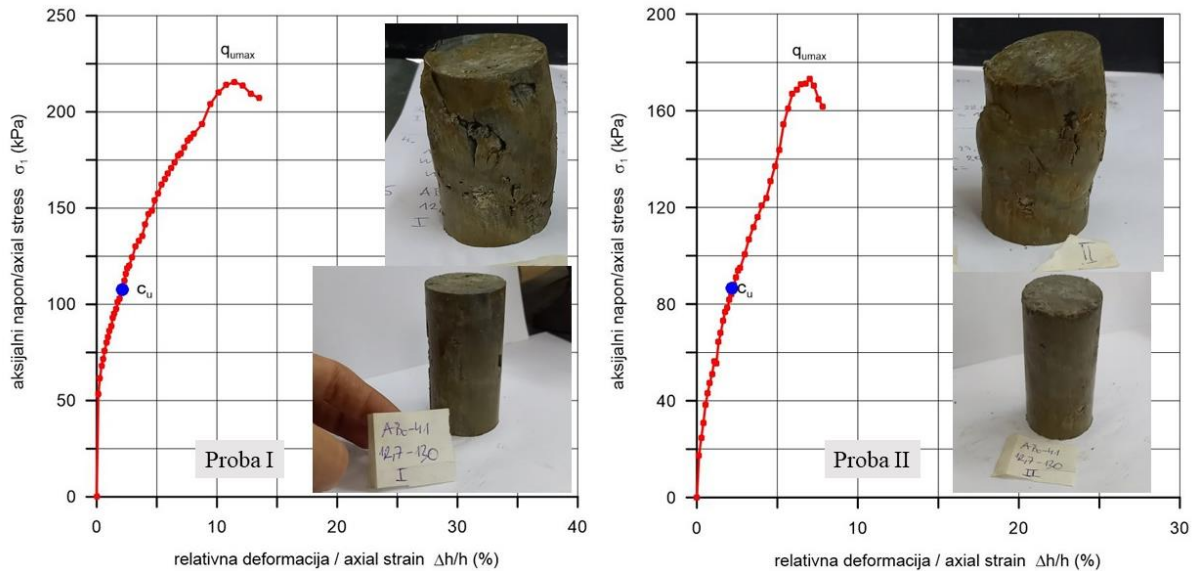
Prerađeno probno telo i dijagram jednoaksijalne kompresije su prikazani na Slici 6.67.



Slika 6.67. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

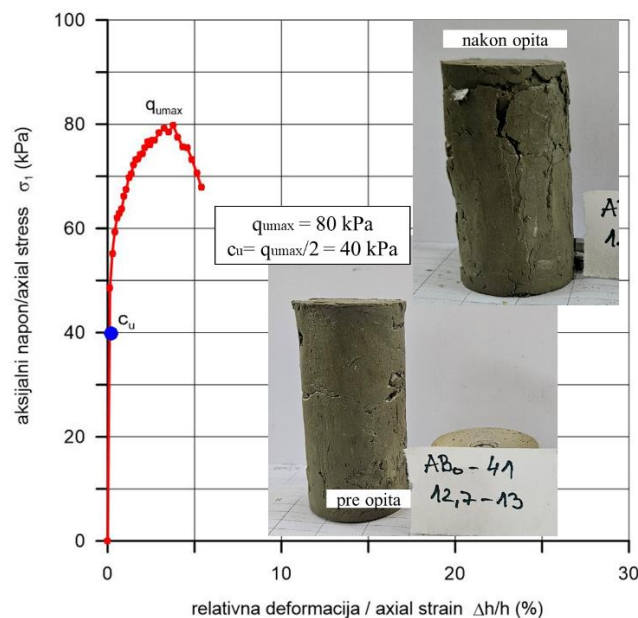
## Uzorak ABo-41 (12.7-13.0 m)

Za uzorak ABo-41 sa dubine 12.7–13.0 m zabeležene su veće vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na pliće uzorak. Razlike između Probe I i Probe II su izraženije, što može ukazivati na veću varijacije u strukturi i stanju napreznja prilikom pravljenja probnih tela (Slika 6.68.).



Slika 6.68. Dijagram ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće za probu I i probu II na neporemećenom uzorku ABo-41 (12.7-13.0 m)

U poređenju sa neporemećenim uzorcima, prerađen uzorak pokazuje značajno niže vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće (Slika 6.69.).



Slika 6.69. Dijagram jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku za prerađeni uzorak ABo-41 (12.7-13.0 m)

Vrednosti jednoaksijalne čvrstoće i nedrenirane smičuće čvrstoće su prikazane u Tabeli 6.20. Usvojena vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećeni uzorak je 98 kPa. Na osnovu senzitivnosti ispitivani materijal pripada srednje osetljivim glinama.

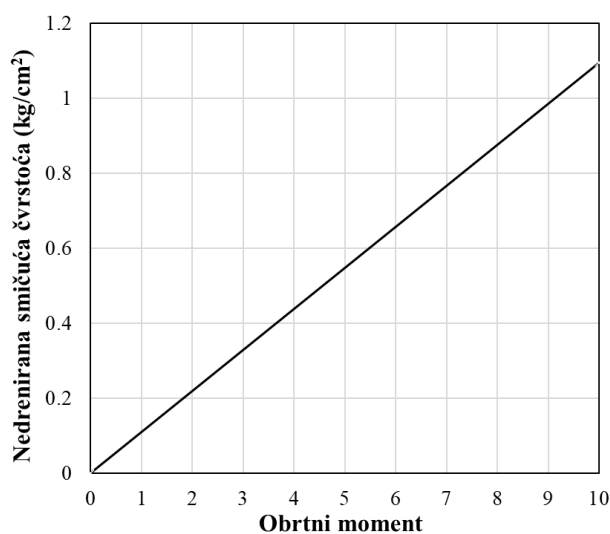
Tabela 6.20. Vrednosti jednoaksijalne i nedrenirane čvrstoće za uzorak ABo-41 (12.7-13.0 m)

Probno telo	Neporemećen uzorak		Srednja vrednost	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
	Proba I	Proba II			
Jednoaksijalna čvrstoća $q_u$ (kPa)	216	173	98	80	2.45
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	108	87		40	

Na osnovu rezultata jednoaksijalnih ispitivanja može se zaključiti da svi analizirani uzorci, nevezano za njihovu genezu, pokazuju smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće nakon prerade, što potvrđuje postojanje izražene strukturne komponente u prirodnom stanju tla. Kod neporemećenih uzoraka uočava se veća krutost i u pojedinim slučajevima uzorci imaju izražen krsti lom. Prerađeni uzorci pokazuju plastičnije ponašanje (plastični lom ili mekan) i mobilizaciju maksimalne čvrstoće pri većim relativnim deformacijama. Vrednosti senzitivnosti variraju od slabo do srednje osetljivih glina i biće prikazani zajedno sa opitom džepne krilne sonde i džepnim penetrometrom na Slici 6.89. Dobijeni rezultati jednoaksijalnim opitom dodatno potvrđuju značajan uticaj prirodne strukture na mehaničko ponašanje ispitivanih materijala.

#### 6.4.3. Džepna krilna sonda

U okviru ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće primenom džepne krilne sonde izvršeni su opiti na neporemećenim i prerađenim uzorcima. Nedrenirana smičuća čvrstoća je određena na osnovu očitnog maksimalnog obrtnog momenta pri lomu tla, pri čemu je konverzija izvršena korišćenjem odgovarajućeg koeficijenta za izabrani nastavak džepne krilne sonde (prema Jednačini 5.19). U skladu sa preporukama iz uputstva proizvođača (CONTROLS Group), izbor nastavka zavisi od vrste ispitivanog tla. Za normalno konsolidovane i slabo prekonsolidovane materijale korišćen je nastavak srednjeg prečnika ( $D = 26$  mm). Prilikom određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće korišćen je dijagram, kojim je definisana veza između očitnog obrtnog momenta i vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Za korišćeni nastavak usvojena konstanta iznosi 1.0936 i omogućava direktno određivanje vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće (Slika 6.70.).



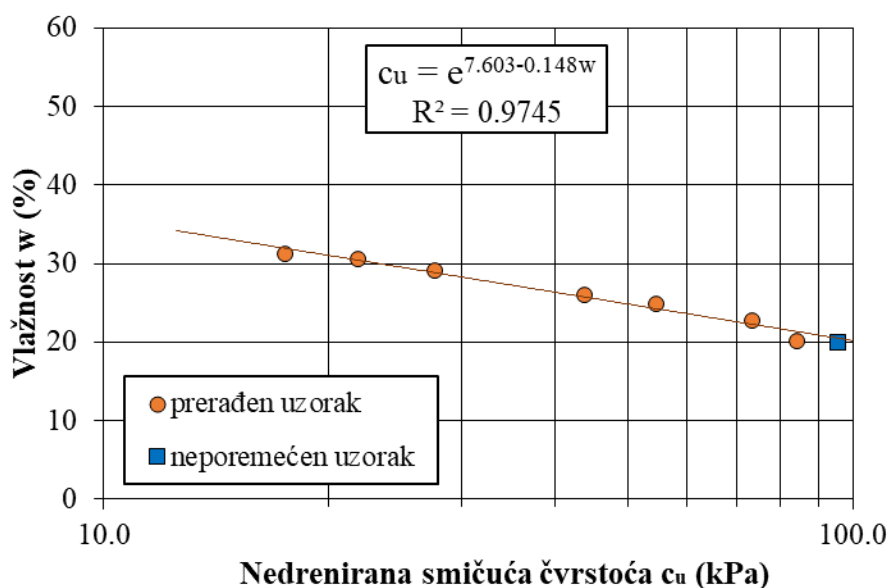
Slika 6.70. Dijagram konverzije (prema uputstvu proizvođača CONTROLS Group)

U cilju analize uticaja vlažnosti na nedreniranu smičuću čvrstoću, za svaki uzorak je izdvojen dijagram zavisnosti između ova dva parametra. Na neporemećenom uzorku je računata nedrenirana smičuća čvrstoća za prirodnu vlažnost, a takođe i za prerađeni kako bi se izdvojila i senzitivnost. U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće za pojedinačne uzorke, zajedno sa odgovarajućim dijagramima i tabelama.

#### 6.4.3.1. Eolski sedimenti – lesoidne gline

##### Uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla je ispitana na prerađenim uzorcima za nekoliko vlažnosti i na neporemećenom uzorku za prirodnu vlažnost (Slika 6.71.).



Slika 6.71. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 17.5 kPa do 84.2 kPa. Usvojena vrednost za nedreniranu smičuću čvrstoću za vlažnost koja je ista prirodnoj iznosi za prerađen uzorak 84.2 kPa, dok je za neporemećeni 95.4 kPa (Tabela 6.21.).

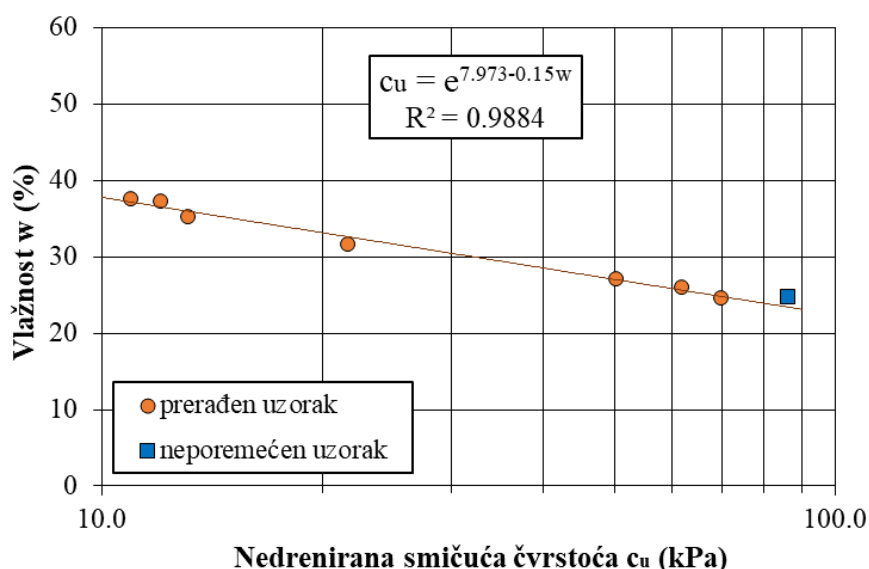
Tabela 6.21. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća</b>			
$c_u$ (kPa)	95.4	84.2	1.13

Na osnovu određene senzitivnosti uzorak pripada slabo osetljivim glinama.

##### Uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

Ispitivanje nedrenirane smičuće čvrstoće uzorka ABo-23 sprovedeno je na prerađenim uzorcima pri različitim nivoima vlažnosti, dok je ponašanje neporemećenog uzorka analizirano u stanju prirodne vlažnosti (Slika 6.72.).



Slika 6.72. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

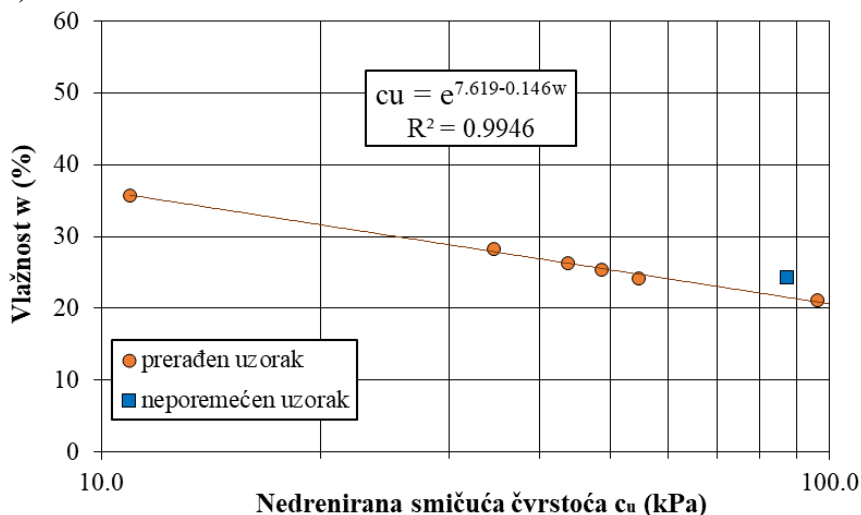
Dobijene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost su prikazane u Tabeli 6.22.

Tabela 6.22. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	86.2	70	1.23

#### Uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

Za uzorak ABo-41 sa dubine 7.6–7.9 m izvršeno je određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće na prerađenim uzorcima u funkciji vlažnosti, dok je neporemećeni uzorak ispitan pri prirodnom sadržaju vode (Slika 6.73.).



Slika 6.73. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 10.94 kPa do 96.24 kPa, gde je najviša nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena za vlažnost od 21.18%. Usvojena vrednost za nedreniranu smičuću čvrstoću za prirodnu vlažnost za prerađen uzorak 54.7 kPa, dok je za neporemećeni 87.5kPa (Tabela 6.23.).

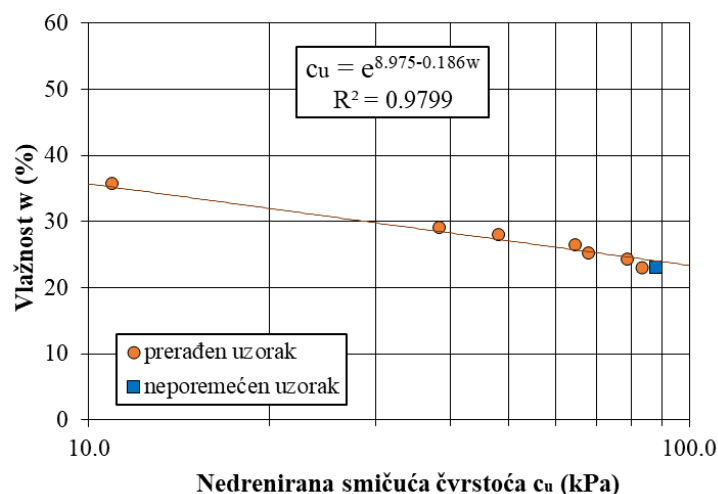
Tabela 6.23. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (7.6-7.9 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	87.5	54.7	1.60

#### 6.4.3.2. Aluvijalni sedimenti – aluvijalne gline

##### Uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

Ispitivanje nedrenirane smičuće čvrstoće sprovedeno je na prerađenim uzorcima za više nivoa vlažnosti, dok je na neporemećenom uzorku analizirano ponašanje pri prirodnoj vlažnosti (Slika 6.74.).



Slika 6.74. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

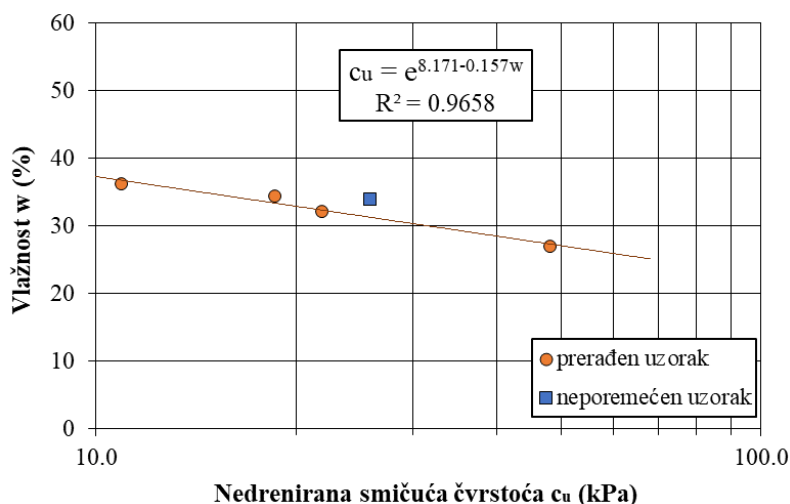
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 5.25 kPa do 83.11 kPa. Usvojene vrednosti za nedreniranu smičuću čvrstoću za prirodnu vlažnost kao i senzitivnost prikazane su u Tabeli 6.24.

Tabela 6.24. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	87.9	83.1	1.06

##### Uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Zbog svog mekanog konzistentnog stanja na ovom uzorku je urađeno svega četiri probe nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenog uzorka i jedna na neporemećenom uzorku (Slika 6.75.).



Slika 6.75. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

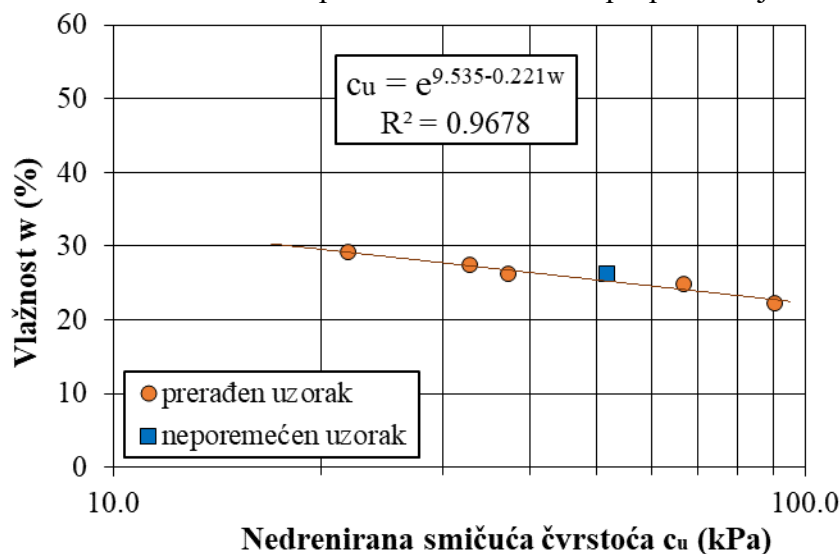
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 10.93 kPa do 48.09 kPa. Indeks konzistencije za ispitivani uzorak je  $I_c = 0.45$ , što ukazuje na mekano stanje tla. Prilikom pripreme pojedinih probnih tela došlo je do prosušivanja, i time je dobijena vlažnost koja je manja od prirodne, što je uticalo na povećanu vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na stanje in situ. Usvojena vrednost za nedreniranu smičuću čvrstoću za vlažnost koja je ista prirodnoj iznosi za prerađeni uzorak 18.58 kPa, a za neporemećeni 25.81 kPa (Tabela 6.25.).

Tabela 6.25. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet $S_t$
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	25.8	18.6	1.39

#### Uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća uzorka D-1 određena je na prerađenim uzorcima u funkciji vlažnosti, dok je referentna vrednost utvrđena na neporemećenom uzorku pri prirodnoj vlažnosti (Slika 6.76).



Slika 6.76. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

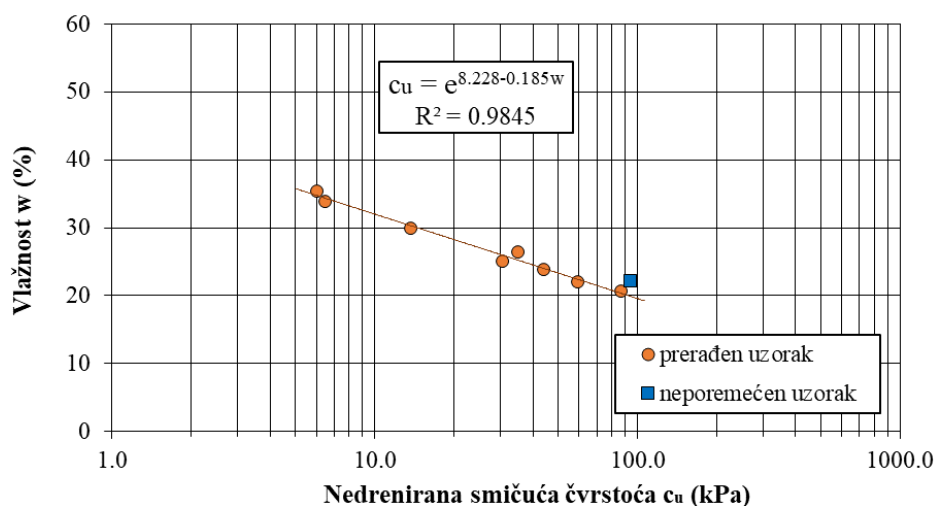
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće prerađenih uzorka variraju u opsegu od 21.87 kPa do 90.22 kPa. Usled prosušivanja tokom pripreme pojedinih prerađenih uzoraka, vlažnost je smanjena u odnosu na prirodno stanje, što dovodi do povećanja nedrenirane smičuće čvrstoće. Za vlažnost približnu prirodnoj usvojena vrednost iznosi 37.18 kPa, dok je za neporemećeni nedrenirana smičuća čvrstoća 51.62 kPa (Tabela 6.26.).

Tabela 6.26. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa)</b>	51.62	37.18	1.39

#### Uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Prilikom ispitivanja nedrenirana smičuća čvrstoća tla je merena na prerađenim i neporemećenom uzorku prirodne vlažnosti (Slika 6.77.). Prilikom pripreme prerađenih uzoraka dobijena su i probna tela čija je vlažnost manja od prirodne.



Slika 6.77. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

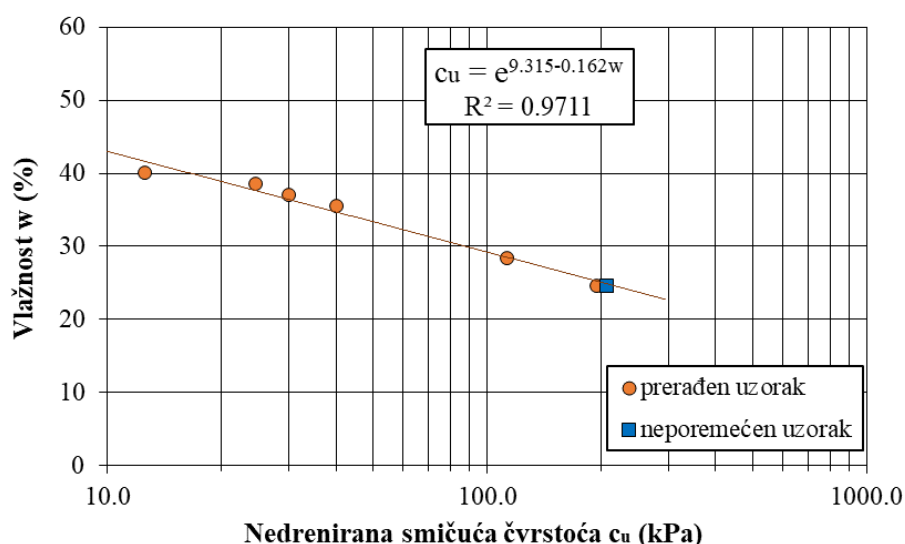
Rezultati nedrenirane smičuće čvrstoće na prirodnoj vlažnosti za neporemećeni i prerađeni uzorak, kao i senzitivnost, su prikazane u Tabeli 6.27.

Tabela 6.27. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa)</b>	93.6	59.1	1.59

#### Uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća uzorka ABo-41 sa dubine od 12.7 – 13.0 m je ispitana na prerađenim uzorcima za nekoliko vlažnosti i na neporemećenom uzorku za prirodnu vlažnost (Slika 6.78.).



Slika 6.78. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

Pri vlažnosti koja odgovara prirodnoj, usvojena vrednost iznosi 64.5 kPa, dok je za neporemećeni uzorak određena vrednost od 90.1 kPa (Tablea 6.28).

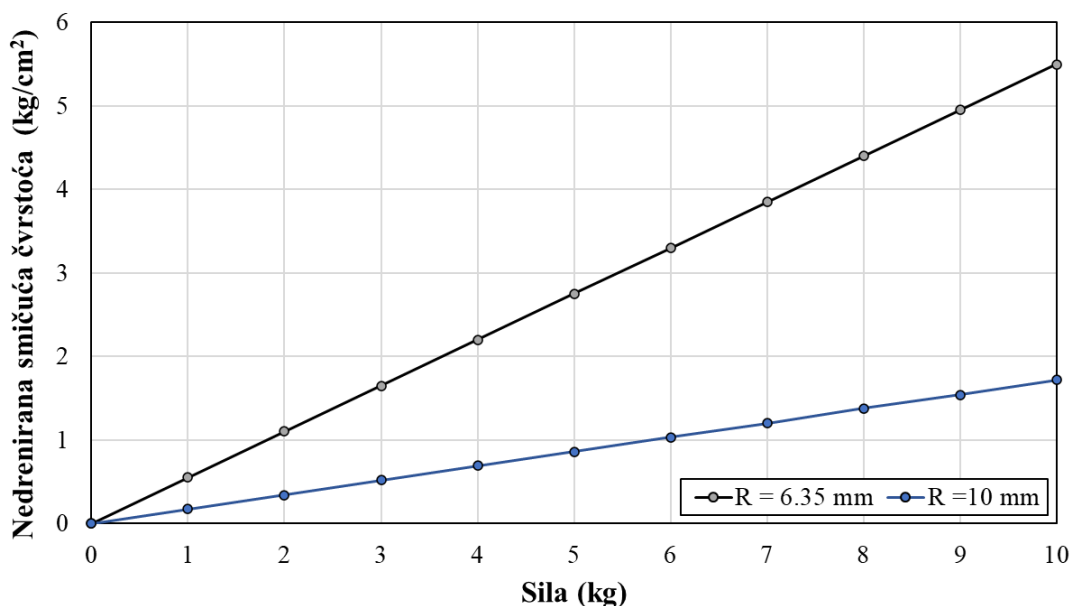
Tablea 6.28. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa)	90.1	64.5	1.40

Vrednosti senzitivnosti određene džepnom krilnom sondom kreću se u opsegu od 1.06 do 1.60, što ukazuje na slabo osetljiva tla i da je nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenih uzoraka u većini slučajeva približna vrednostima neporemećenih uzoraka. Primena džepne krilne sonde na prerađenim uzorcima nije uobičajna praksa, jer je metoda primarno namenjena brzom određivanju nedrenirane smičuće čvrstoće u prirodnom stanju tla – in situ. U tom smislu, određivanje senzitivnosti na osnovu rezultata ove metode ima ograničenja i zahteva dodatnu validaciju u odnosu na standardne laboratorijske postupke (Slika 6.89.). Rezultati ukazuju da bi za pouzdaniju procenu senzitivnosti primenom džepne krilne sonde bilo opravdano uvesti neki korekcionni koeficijent, kojim bi se nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenim uzorcima umanjila.

#### 6.4.4. Džepni penetrometar

Nedrenirana smičuća čvrstoća na neporemećenim i prerađenim uzorcima je ispitana i primenom džepnog penetrometra. Tokom ispitivanja očitavana je vrednost penetracionog otpora na spoljašnjoj skali brojanika džepnog penetrometra, nakon čega je izvršena konverzija u nedreniranu smičuću čvrstoću u skladu sa preporukama iz tehničkog uputstva proizvođača (CONTROLS Group – Geotester Model 16-T0161). U ovom istraživanju korišćena su dva tipa penetracionih vrhova: prečnika 6.35 mm i prečnika 10 mm, koji se najčešće primenjuju za ispitivanje mekih do srednje čvrstih koherentnih sedimenata. Za svaki nastavak postoji odgovarajuća veza između očitanoeg penetracionog otpora i vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće koja je definisana u uputstvu za instrument (Slika 6.79.).



Slika 6.79. Dijagram konverzije (Prema upustu CONTROLS Group – Geotester Model 16-T0161)

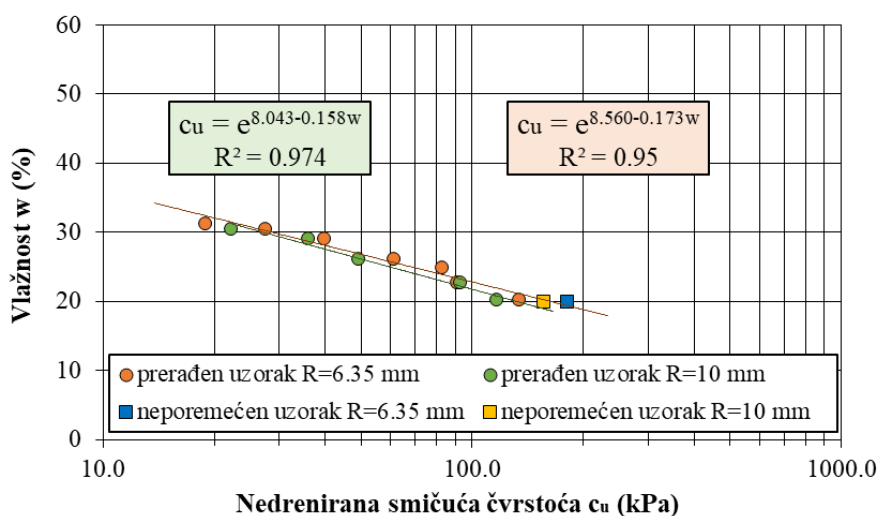
Na osnovu ovog dijagrama izvršena je konverzija očitanih vrednosti u odgovarajuće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u kPa.

U cilju analize uticaja vlažnosti na nedrenirane smičuće čvrstoće, za svaki uzorak konstruisan je dijagram zavisnosti za oba nastavka. Tabelarno su izdvojene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za neporemećene i prerađene uzorke i njihova senzitivnost.

#### 6.4.4.1. Eolski sedimenti – lesoidne gline

##### Uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla je ispitana na prerađenim uzorcima za nekoliko vlažnosti za dva tipa nastavka: nastavak čiji je prečnik 6.35 mm i nastavak prečnika 10 mm. Na neporemećenom uzorku korišćena su oba nastavka (Slika 6.80.).



Slika 6.80. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

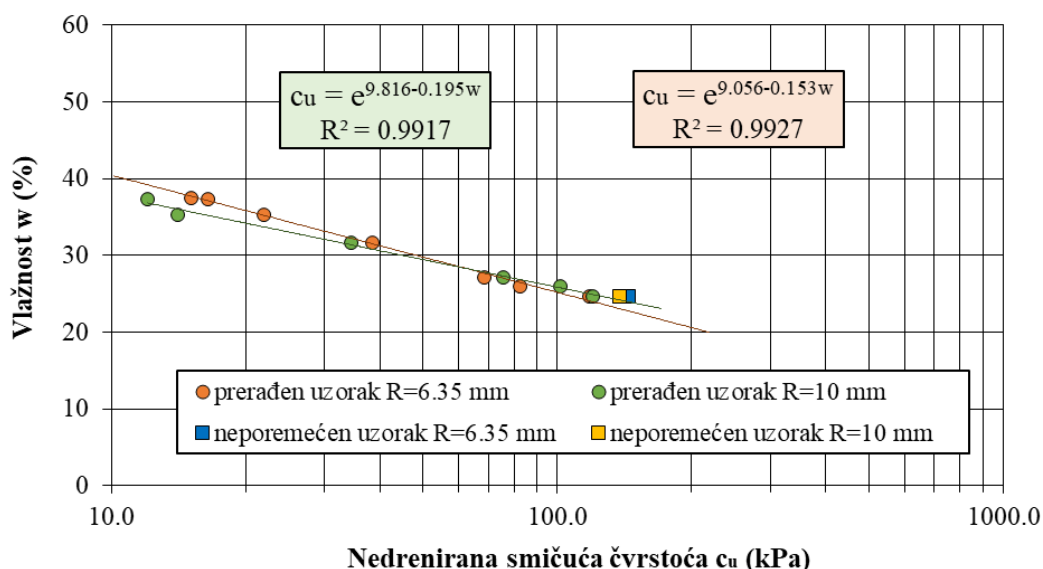
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 18.84 kPa do 133.38 kPa za manji nastavak od 6.35 mm prečnika dok se za veći nastavak vrednosti kreću od 20 kPa do 116.01 kPa. Na osnovu ovih vrednosti određena je i senzitivnost tla. Usvojena vrednost za nedreniranu smičuću čvrstoću za vlažnost koja je ista prirodnoj prikazani su u Tabeli 6.29.

Tabela 6.29. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (1.1-1.5 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za $R = 6.35$ mm	180.3	133.4	1.35
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za $R = 10$ mm	155.6	116.0	1.34

#### Uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

Kod uzorka ABo-23 uočeno je da se vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u jednom delu prepliću, zavisno od tipa nastavka. Kod prerađenih uzoraka, za nastavak od 6.35 mm vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće se kreću od 15.13 kPa do 118.25 kPa, dok se za nastavak od 10 mm kreću od 8.60 kPa do 120.40 kPa (Slika 6.81.).



Slika 6.81. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-23 (2.5-2.8)

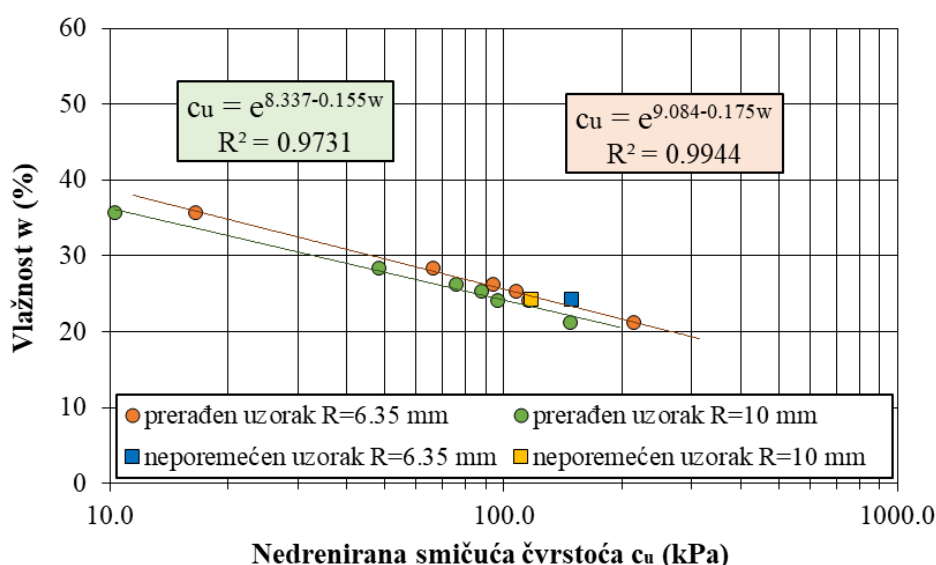
Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka kao i kod prerađenih su izdvojene Tabelom 6.30. za prirodnu vlažnost kako bi se mogla sračunati i senzitivnost tla.

Tabela 6.30. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za $R = 6.35$ mm	144.6	118.3	1.22
Nedrenirana smičuća čvrstoća $c_u$ (kPa) za $R = 10$ mm	137.6	120.4	1.14

### Uzorak ABo-41(7.6-7.9 m)

Na Slici 6.82. prikazan je dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće na prerađenim i neporemećenim uzorcima.



Slika 6.82. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-41(7.6-7.9 m)

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 16.50 kPa do 214.50 kPa za manji nastavak od 6.35 mm prečnika dok se za veći nastavak,  $R = 10$  mm, vrednosti kreću od 10.32 kPa do 147.92 kPa. Usvojene vrednosti za nedreniranu smičuću čvrstoću za vlažnost koja je ista prirodnoj prikazan je u Tabeli 6.31.

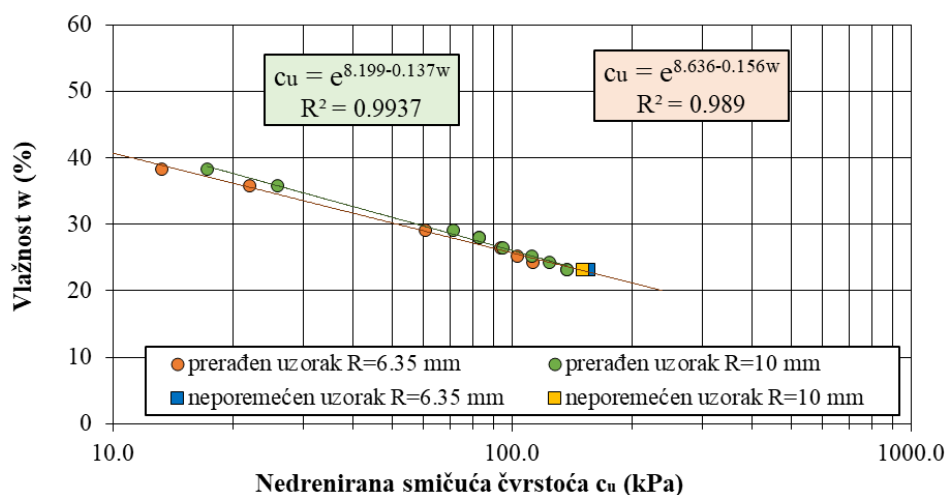
Tabela 6.31. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41(7.6-7.9 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</i>	148.6	115.5	1.29
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</i>	117.15	96.3	1.22

#### 6.4.4.2. Aluvijalni sedimenti – aluvijalne gline

### Uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

Ispitivanje uzorka MB-25 obavljeno je na prerađenim cilindričnim uzorcima pri više nivoa vlažnosti. Korišćena su dva tipa nastavka (6.35 mm i 10 mm) kako bi se prikazale razlike ili sličnosti prilikom njihove primene. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prerađene uzorke tla kreću se od 13.29 kPa do 137.50 kPa za manji nastavak od 6.35 mm prečnika dok se za prečnik 10 mm vrednosti kreću od 17.20 kPa do 137.60 kPa. Na Slici 6.83. su prikazane vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene ovim nastavcima.



Slika 6.83. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

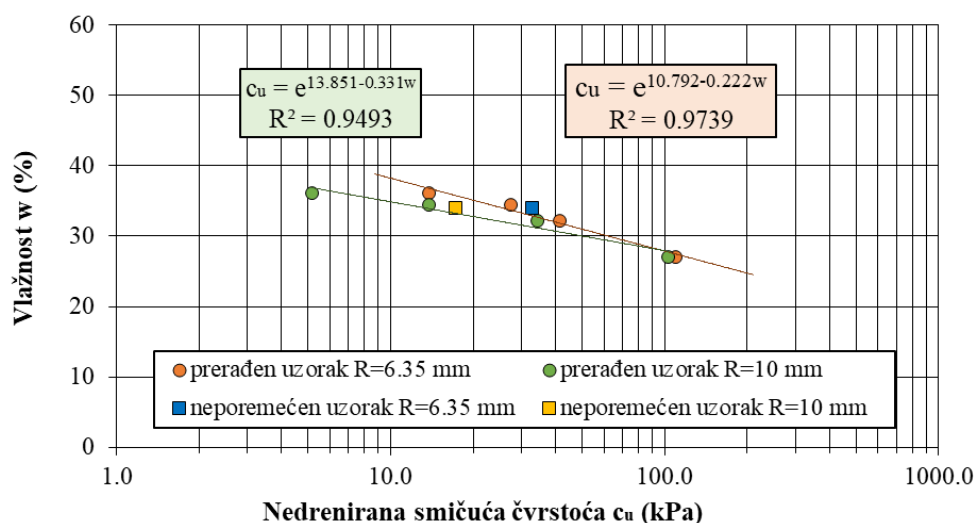
Dobijene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su prikazane u Tabeli 6.32. kao i vrednosti senzitivnosti tla.

Tabela 6.32. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-25 (1.3-1.6 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</b>	155.9	137.5	1.13
<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</b>	149.8	137.6	1.09

#### Uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Analizom uzorka MB-13 utvrđeno je da se nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenih uzoraka kreće od 13.75 kPa do 110.0 kPa za nastavak od 6.35 mm, dok su vrednosti za nastavak od 10 mm niže i iznose od 5.16 kPa do 103.20 kPa (Slika 6.84.). Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod prerađenih uzoraka su veće nego kod neporemećenih jer su merene za manju vlažnost (27.04%) od prirodne vlažnosti.



Slika 6.84. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

Usvojena vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost i njihova senzitivnost su prikazane u Tabeli 6.33.

Tabela 6.33. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak MB-13 (1.5-1.8 m)

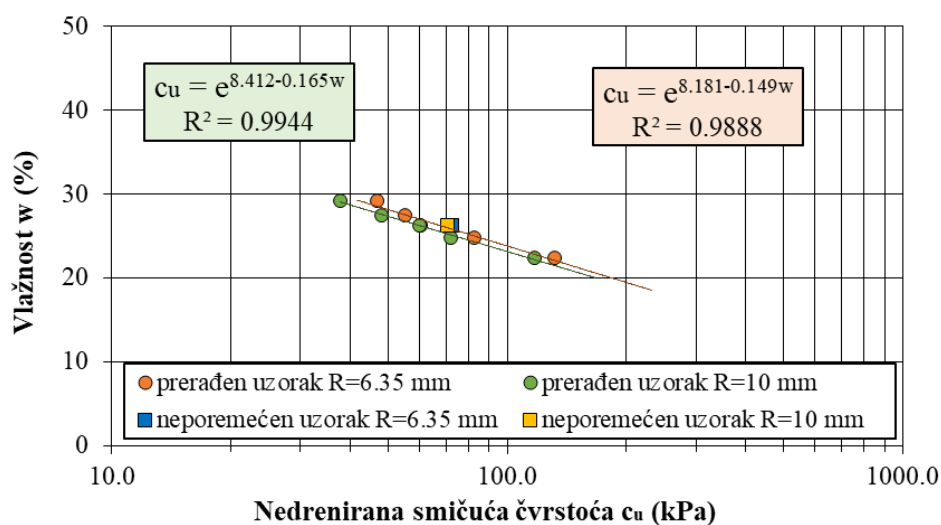
	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</i>	32.9	27.5	1.20
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</i>	17.2	13.8	1.19

#### Uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

U nedreniranim uslovima ispitivanja uzorka D-1 korišćeni su nastavci prečnika 6.35 mm i 10 mm. Vrednosti smičuće čvrstoće kreću se od 46.75 kPa do 132.0 kPa (6.35 mm) i od 37.84 kPa do 116.96 kPa (10 mm) (Slika 6.85.). Veće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su za uzorke čija je vlažnost manja od prirodne. Za prirodnu vlažnost su usvojene vrednosti prikazane u Tabeli 6.34.

Tabela 6.34. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

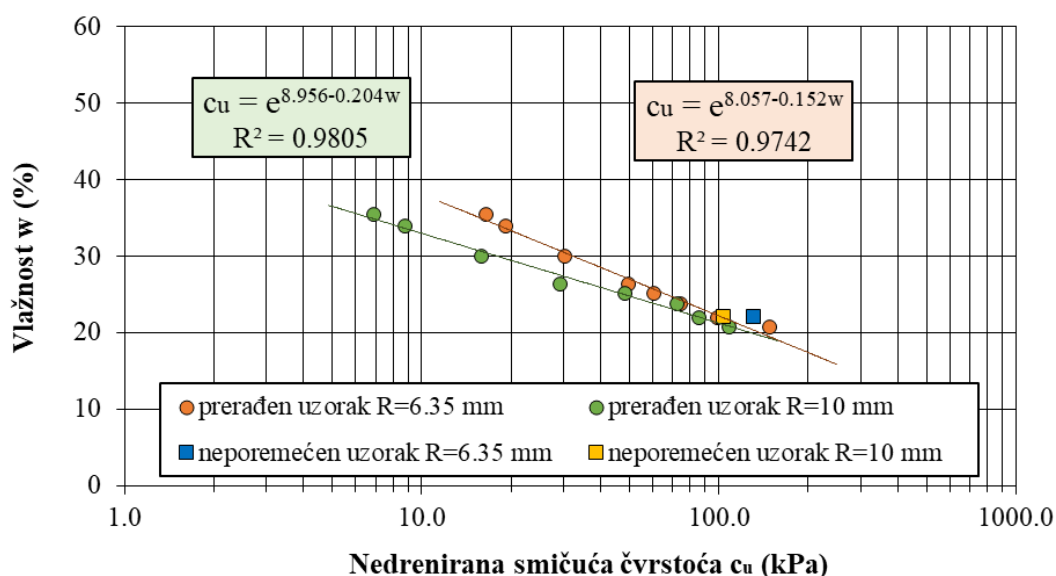
	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</i>	72.6	60.5	1.20
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</i>	70.5	60.2	1.17



Slika 6.85. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak D-1 (2.0-2.2 m)

#### Uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Rezultati ispitivanja uzorka PB-27 pokazuju da se nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenih uzoraka kreće od 16.50 kPa do 148.50 kPa za nastavak od 6.35 mm, dok su vrednosti za nastavak od 10 mm u intervalu od 8.77 kPa do 108.36 kPa. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće premašuju vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće koje su dobijena za neporemećeni uzorak, jer su rađene i za vlažnost koja je manja od prirodne vlažnosti (Slika 6.86.).



Slika 6.86. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće kod neporemećenih uzoraka kao i kod prerađenih su izdvojene Tabelom 6.35. za prirodnu vlažnost i senzitivnost tla.

Tabela 6.35. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak PB-27 (4.3-4.6 m)

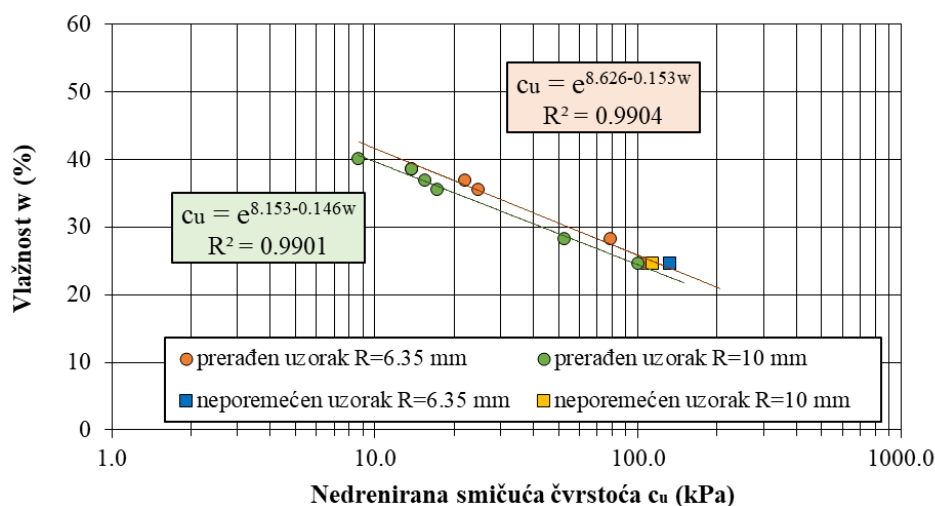
	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</i>	130.4	99.0	1.32
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</i>	103.2	86.0	1.20

#### Uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

Nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenih uzoraka kreće od 8.80 kPa do 104.50 kPa za nastavak od 6.35 mm, dok su vrednosti za nastavak od 10 mm u rasponu od 8.60 kPa do 99.76 kPa (Slika 6.87.). Tabelarno (Tabela 6.36) je izdvojena vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost zajedno sa senzitivnosti tla.

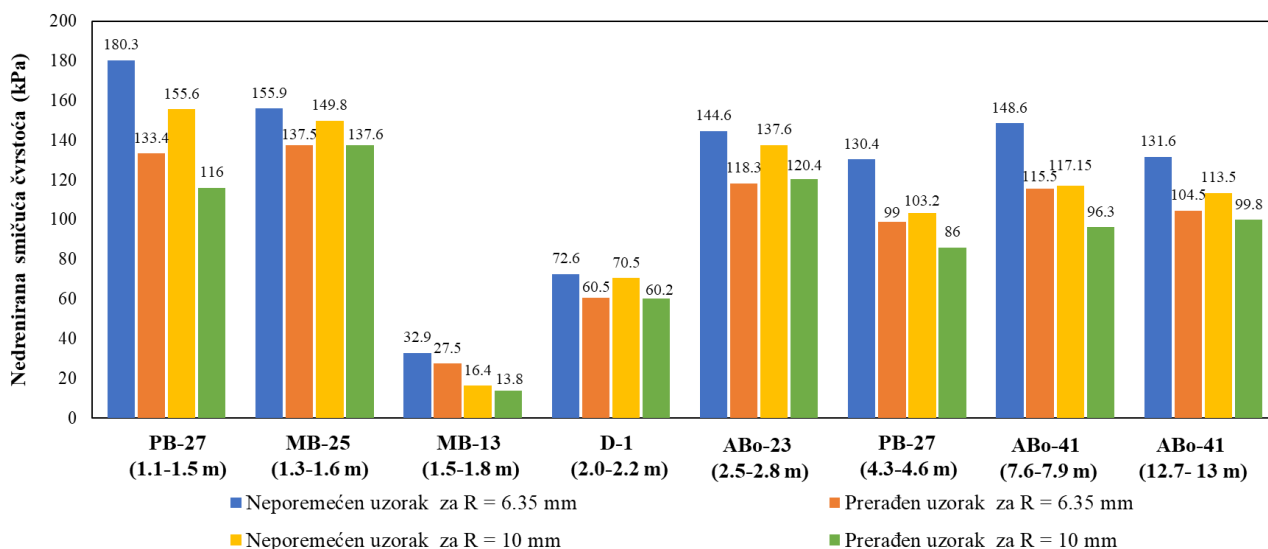
Tabela 6.36. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za prirodnu vlažnost za uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

	Neporemećen uzorak	Prerađen uzorak	Senzitivitet St
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 6.35</math> mm</i>	131.6	104.5	1.40
<i>Nedrenirana smičuća čvrstoća <math>c_u</math> (kPa) za <math>R = 10</math> mm</i>	113.5	99.8	1.14



Slika 6.87. Dijagram zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  od vlažnosti za uzorak ABo-41 (12.7-13 m)

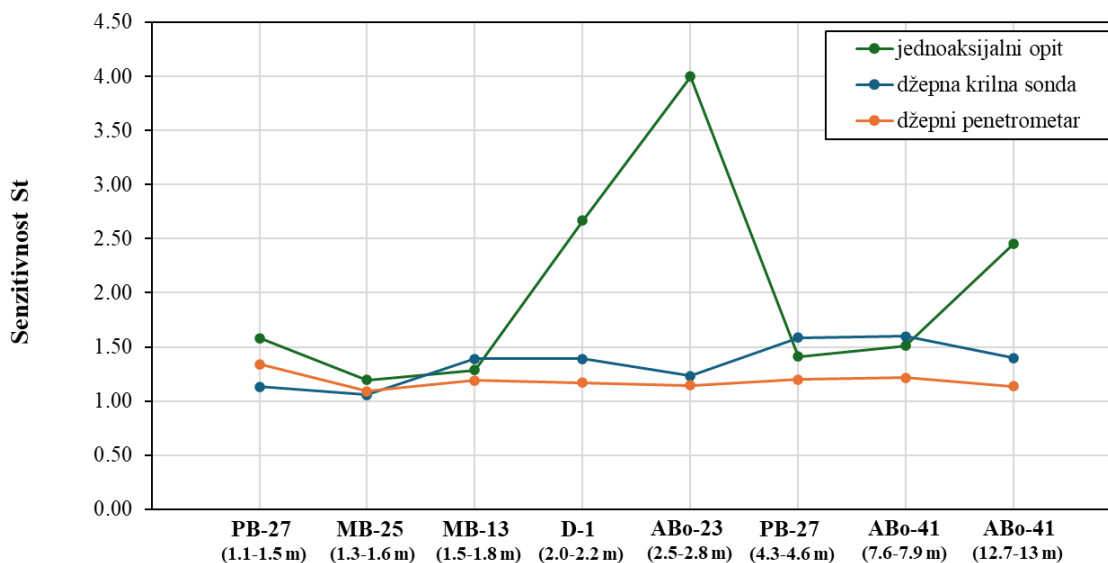
Radi sagledavanja rezultata prikazan je zbirni dijagram. Poređenje usvojenih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće između prerađenih i neporemećenih uzoraka je jasno prikazan, pri čemu je dokazano da neporemećeni uzorci na svim ispitanim uzorcima imaju veće vrednosti (Slika 6.88.).



Slika 6.88. Dijagram vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  za neporemećene i prerađene uzorke na prirodnoj vlažnosti

Rezultati dobijeni primenom dva različita penetraciona nastavka pokazuju da su vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u većini slučajeva nešto veće za nastavak manjeg prečnika ( $R = 6.35$  mm) u odnosu na nastavak većeg prečnika ( $R = 10$  mm). Ova razlika može se objasniti efektom veličine penetracionog vrha, pri čemu manji vrh tokom penetracije zahteva veću lokalnu koncentraciju napona u zoni prodiranja, što dovodi do registrovanja većeg penetracionog otpora. Uprkos uočenim razlikama, rezultati dobijeni primenom oba nastavka pokazuju sličan trend promene nedrenirane smičuće čvrstoće u funkciji od vlažnosti. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće manjim nastavkom su veće nego vrednosti koje su dobijene sa vrhom prečnika 10 mm. U daljoj interpretaciji rezultata kao reprezentativne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće usvojene su vrednosti dobijene primenom penetracionog nastavka prečnika 10 mm, jer ovaj nastavak obuhvata veću površinu tla tokom penetracije i daje stabilnije procene otpornosti u odnosu na nastavak manjeg prečnika. Izračunate vrednosti senzitivnosti kreću se u relativno uskom opsegu i uglavnom su manje

od 2.0, što ukazuje da ispitivana tla pripadaju slabo osetljivim glinama (Slika 6.89.). Jednoaksijalnim opitom je za uzorak ABo-23 (2.5-2.8 m) dobijena senzitivnost 4, što ukazuje da se radi o srednje osetljivim glinama.

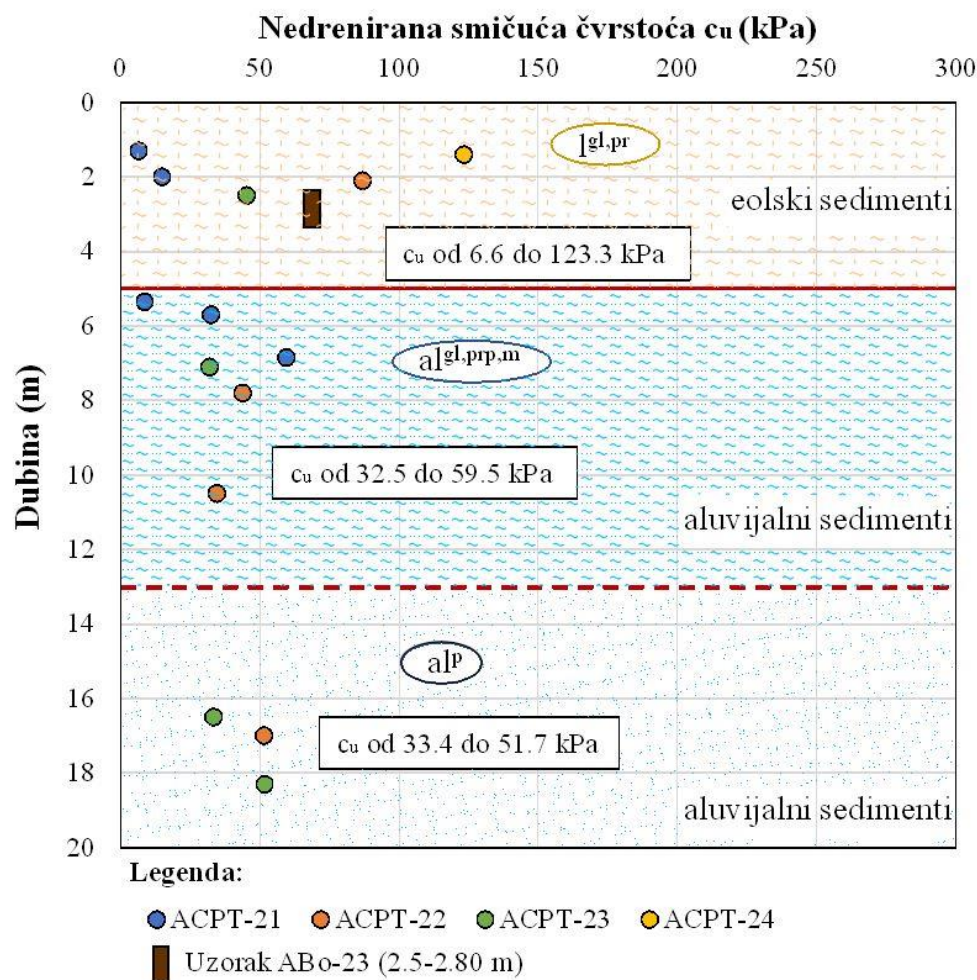


Slika 6.89. Senzitivnost dobijena jednoaksijalnim opitom, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom

#### 6.4.5. Statički penetracioni opit – CPT

U ovom poglavlju predstavljene su i interpretirani rezultati terenskog ispitivanja primenom statičkog penetracionog opita (CPT). Interpretacija rezultata CPT opita izvršena je u softverskom paketu GeoLogismiki. Interpretacija rezultata CPTU ispitivanja izvršena je u softverskom paketu CPeT-IT (proizvođač: GeoLogismiki). Obrada podataka zasniva se na savremenim empirijskim korelacijama prema metodologiji Robertson (1990, 2010) uz klasifikaciju tla prema normalizovanom dijagramu ponašanja tla (SBTn). U ovom softveru nedrenirana smičuća čvrstoća je automatski sračunata i izdvojena na osnovu Jednačine 5.21, gde je Nkt uzimano na osnovu empirijskog iskustva. Ovde će biti prikazana vertikalna raspodela nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini. Dijagrami obuhvataju isključivo koherentne slojeve tla, dok su intervali nekoherentnih materijala izostavljeni. CPT opiti su izvedeni u okolini nekih bušotina, a da bi se lakše poredili dobijeni rezultati CPT opita su grupisani po najbližim bušotinama.

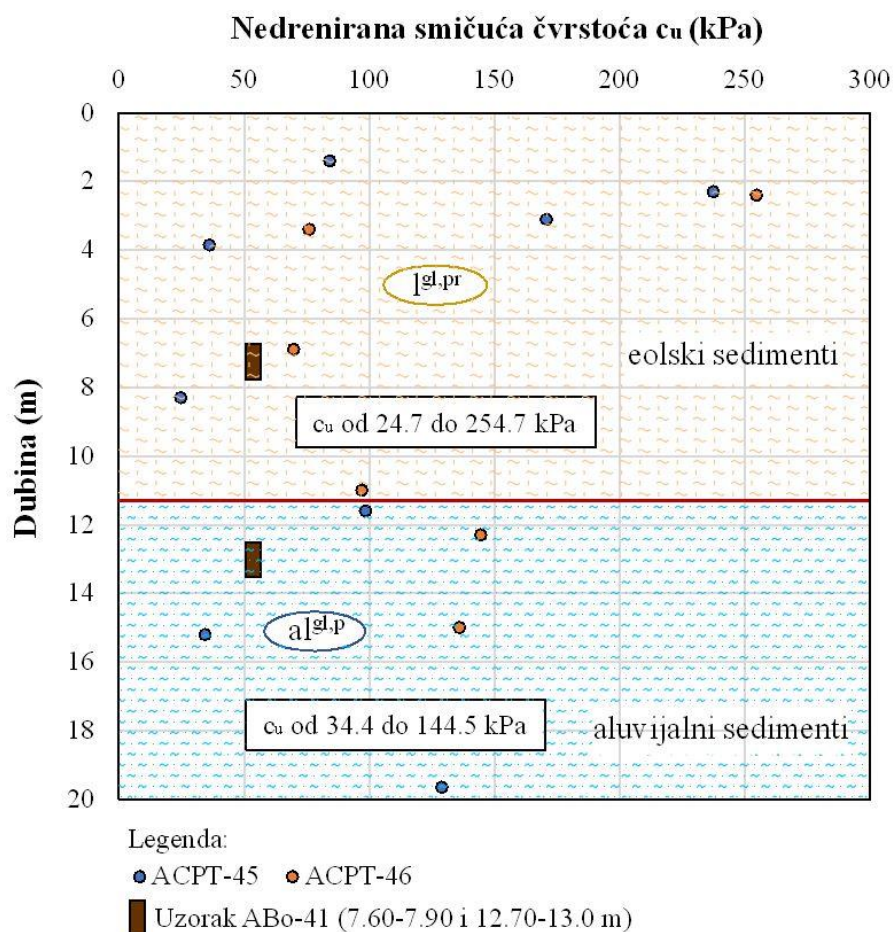
Opiti ACPT-21, ACPT-22, ACPT-23 i ACPT-24 su izvedeni u blizini bušotine ABo-23. Njihovi podaci su prikazani na Slici 6.90. Na osnovu litološkog stuba istražne bušotine izdvojeni su ispitivani slojevi.



Slika 6.90. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije ACPT-21, ACPT-22, ACPT-23 i ACPT-24

Na osnovu izvedenih opita statičke penetracije vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće variraju u različitim rasponima. Kod eolskih sedimenata nedrenirana smičuća čvrstoća varira od približno 6.6 do 123.3 kPa, dok je srednja vrednost oko 48 kPa. Aluvijalni sedimenti su podeljeni na gline prašinsto peskovite i lokalno muljevite i pesak prašinsti. Prilikom analiziranja rezultata statičke penetracije vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su podeljene na te slojeve. U aluvijalnim sedimentima izdvajaju se vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće u opsegu od 32.5 do 59.5 kPa.

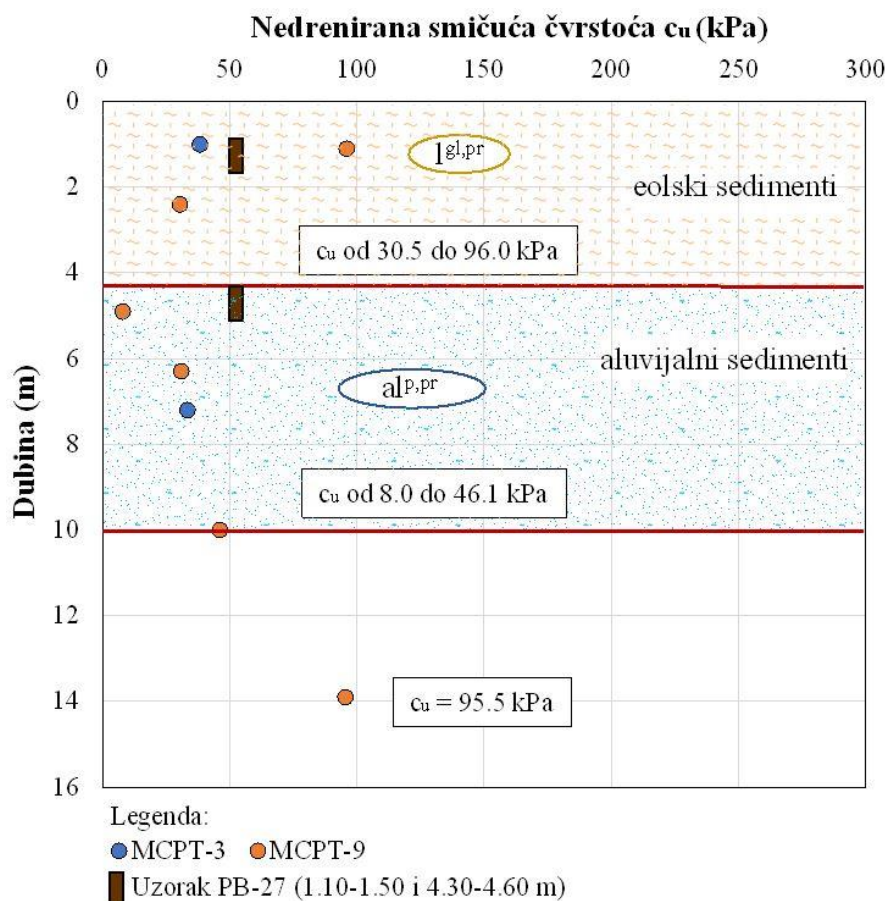
Opiti ACPT-45 i ACPT-46 su izvedeni u okolini bušotine ABo-41. Na Slici 6.91. je zbirni prikaz dobijene nedrenirane smičuće čvrstoće.



Slika 6.91. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije ACPT-45 i ACPT-46

Na ovom profilu istražne bušotine vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće za eolske sedimente variraju i kreću se od 24.7 kPa do 254.7 kPa, dok su za aluvijalne sedimente izmerene niže vrednosti a raspon veličina se kretao od 34.4 kPa do 144.5 kPa. Prilikom laboratorijskih analiza iz bušotine ABo-41 uzeta su dva uzorka, jedan iz eolske sredine a drugi iz aluvijalne sredine.

Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene penetracijama MCPT-3 i MCPT-9, izvedenih u zoni bušotine PB-27 prikazane su na Slici 6.92.



Slika 6.92. Nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena opitom statičke penetracije MCPT-3 i MCPT-9

U okviru ovih penetracionih opita zabeležena je manja nedrenirana smičuća čvrstoća u aluvijalnim sedimentima. Kod eolskih sedimenata nedrenirana smičuća čvrstoća se kreće od 30.5 kPa do 96.0 kPa, a kod aluvijalnih od 8.0 do 46.1 kPa.

Nedrenirana čvrstoća dobijena iz penetracionih opita će se u narednim poglavljima porediti sa svim ostalim laboratorijskim opitima.

## 7. USPOSTAVLJANJE KORELACIONIH ZAVISNOSTI

U ovom poglavlju razmatra se korelaciona zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) sa osnovnim fizičko-mehaničkim i indeksnim karakteristikama sitnozrnih tla, kao i međusobna uporedivost vrednosti  $c_u$  dobijenih primenom različitih laboratorijskih i terenskih opita ispitivanja. Analiza je sprovedena na prerađenim i neporemećenim uzorcima, kako bi se sagledao uticaj strukture tla i stepena poremećenosti na razvoj i varijabilnost nedrenirane smičuće čvrstoće.

Korelaciona analiza obuhvata odnose između vlažnosti ( $w$ ), granice tečenja ( $w_L$ ), granice plastičnosti ( $w_P$ ), indeksa tečenja ( $I_L$ ) i indeksa plastičnosti ( $I_P$ ), zapreminske težine ( $\gamma$ ), vertikalni efektivni napon ( $\sigma'_v$ ), stepen prekonsolidacije (OCR) kao i njihovu povezanost sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ). Poseban akcenat stavljen je na poređenje vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće određenih padom konusa, jednoaksijalnim opitom, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom u laboratorijskim uslovima, kao i vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene CPT ispitivanjem u terenskim uslovima.

### 7.1. Pirsonov koeficijent

Fokus istraživanja odnosa između promenljivih je usmeren ka otkrivanju sistematske veze između dve ili više promenljivih. Radi procena međusobnih odnosa između osnovnih fizičko-mehaničkih parametara tla i nedrenirane smičuće čvrstoće, sprovedena je analiza Pirsonovog koeficijenta korelacije. Ova statistička metoda omogućava kvantitativnu procenu stepena linearne zavisnosti između promenljivih. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije kreću se u intervalu od -1 do +1. Vrednosti bliske +1 ukazuju na jaku pozitivnu linearnu korelaciju, vrednosti bliske -1 na jaku negativnu linearnu korelaciju, dok vrednosti bliske nuli ukazuju na slabu ili nepostojeću linearnu vezu između promenljivih. U okviru istraživanja, Pirsonov koeficijent je određen između parametara vlažnosti, granice tečenja, granice plastičnosti, indeksa tečenja, indeksa plastičnosti, zapreminske težine, vertikalnog efektivnog napona i stepena prekonsolidacije sa vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće dobijenim različitim metodama ispitivanja. Rezultati su objedinjeni u jedinstvenim tabelama, posebno za neporemećene (Tabela 7.1) a posebno za prerađene uzorke (Tabela 7.2). Na ovaj način je omogućeno poređenje jačine i pravca zavisnosti za sve metode. Na osnovu dobijenih vrednosti koeficijenta korelacije, u daljoj analizi biće formirani regresioni modeli za parametre koji pokazuju najizraženije statističke veze sa nedreniranom smičućom čvrstoćom.

Pirsonov koeficijent je računat u Microsoft Excel-u. Kao ilustracija postupka izračunavanja Pirsonovog koeficijenta korelacije, prikazan je primer određivanja koeficijenta korelacije između vlažnosti tla ( $w$ ) i nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) dobijene iz jednoaksijalnog opita. Na osnovu eksperimentalnih podataka određene su srednje vrednosti posmatranih parametara, nakon čega su izračunata odstupanja pojedinačnih vrednosti od srednjih vrednosti ( $w_i - \bar{w}$ ) i ( $c_{u,i} - \bar{c}_u$ ) kao i proizvodi tih odstupanja. Srednja vrednost za vlažnost je  $\bar{w} = 24.90 \%$ , a za nedreniranu smičuću čvrstoću prerađenih uzoraka je  $\bar{c}_u = 39.88 \text{ kPa}$ . Nakon sumiranja proizvoda odstupanja i primene Jednačine 5.36, dobijena vrednost Pirsonovog koeficijenta korelacije za prerađen uzorak je  $r = -0.85$ . Ova vrednost ukazuje na izraženu negativnu linearnu zavisnost između vlažnosti tla i nedrenirane smičuće čvrstoće, odnosno na smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće sa porastom vlažnosti tla. Na isti način određeni su koeficijenti korelacije i za ostale posmatrane parametre.

Tabela 7.1. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije između parametara tla i nedrenirane smičuće čvrstoće za različite opite na neporemećenim uzorcima

Opit	w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	I <sub>L</sub> (%)	γ (kN/m <sup>3</sup> )	σ' <sub>v</sub> (kPa)	OCR
Konus 60°/60g	-0.73	0.54	-0.39	0.72	-0.75	0.66	0.07	0.39
Konus 60°/80g	-0.77	0.36	-0.47	0.57	-0.75	0.60	-0.06	0.49
Konus 30°/80g	-0.86	0.33	-0.48	0.55	-0.87	0.68	0.06	0.18
Konus 30°/100g	-0.85	0.40	-0.45	0.61	-0.88	0.68	0.16	0.08
Konus 30°/400g	-0.77	0.37	-0.42	0.56	-0.77	0.56	-0.06	0.43
Jednoaksijalni opit	-0.80	0.21	-0.50	0.44	-0.81	0.84	0.35	-0.16
Džepni penetrometar	-0.90	0.38	-0.42	0.57	-0.94	0.80	0.09	0.14
Džepna krilna sonda	-0.92	0.42	-0.51	0.65	-0.96	0.84	0.35	-0.18
CPT	-	-	-	-	-	0.78	-	0.73

Tabela 7.2. Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije između parametara tla i nedrenirane smičuće čvrstoće za različite opite na prerađenim uzorcima

Opit	w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	I <sub>L</sub> (%)	γ (kN/m <sup>3</sup> )	σ' <sub>v</sub> (kPa)	OCR
Konus 60°/60g	-0.78	0.48	-0.55	0.73	-0.75	0.72	0.16	0.30
Konus 60°/80g	-0.81	0.23	-0.61	0.50	-0.72	0.61	-0.07	0.48
Konus 30°/80g	-0.79	0.20	-0.63	0.48	-0.69	0.58	-0.16	0.53
Konus 30°/100g	-0.77	0.31	-0.54	0.55	-0.70	0.56	-0.14	0.48
Konus 30°/400g	-0.74	-0.06	-0.68	0.24	-0.59	0.48	-0.31	0.52
Jednoaksijalni opit	-0.85	0.19	-0.79	0.54	-0.71	0.64	0.11	0.19
Džepni penetrometar	-0.84	0.49	-0.27	0.62	-0.95	0.77	0.11	0.11
Džepna krilna sonda	-0.88	0.39	-0.43	0.59	-0.91	0.74	0.05	0.25

Najizraženija negativna korelacija uočena je između vlažnosti (w) i indeksa tečenja (I<sub>L</sub>) sa nedreniranom smičućom čvrstoćom. Ova relacija potvrđuje da povećanje vlažnosti i plastičnosti dovodi do smanjenja njegove otpornosti na smicanje tj. do smanjenja nedrenirane smičuće čvrstoće (Carter i Bentley, 1990; Ameratunga i sar., 2016; Dimgba i sar., 2023). Pozitivne korelacije su zabeležene između zapreminske težine tla (γ) i indeksa plastičnosti (I<sub>P</sub>) sa nedreniranom smičućom čvrstoćom, što ukazuje da gušća struktura tla doprinosi većoj otpornosti na smicanje. Generalno, prema Pirsonovim koeficijentima, dobijeni rezultati potvrđuju da su vlažnosti, indeks tečenja i zapreminska težina ključni parametri koji utiču na nedreniranu smičuću čvrstoću ovih materijala. Na osnovu ove statističke analize opravdano je formirati regresione modele upravo za ove parametre, jer pokazuju najjače i najstabilnije statističke veze sa nedreniranom smičućom čvrstoćom tla.

## 7.2. Korelacione zavisnosti između vlažnosti tla i nedrenirane smičuće čvrstoće

### 7.2.1. Zavisnost penetracije i vlažnosti tla kod opita padajućeg konusa

Materijali pokazuju različite karakteristike i svaki je na svoj način jedinstven u pogledu fizičko-mehaničkih karakteristika tla. Teško je pronaći skladnu zavisnost koja bi mogla ispuniti sve uslove njenog korišćenja. Odnos između penetracije konusa ( $h$ ) i vlažnosti ( $w$ ) predmet je brojnih istraživanja (Feng, 2000; Koumoto i Houlsby, 2001; Shimobe i Spagnoli, 2020b) u kojima je predložena empirijska zavisnost oblika:

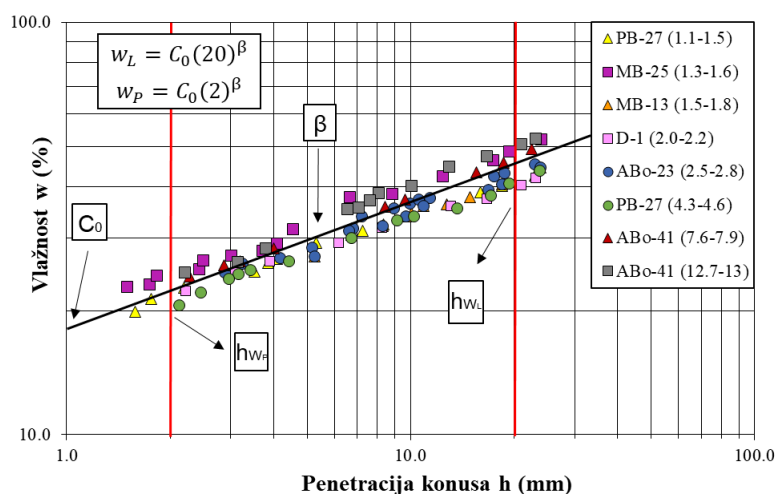
$$w = C_0 h^\beta \quad (7.1)$$

Gde je:

$C_0$  – vlažnost za penetraciju  $h = 1$  mm,

$\beta$  – indeks koji predstavlja nagib linije koja predstavlja aproksimaciju svih rezultata eksperimentalnog ispitivanja.

Indeks nagiba linije  $\beta$  je analogan „indeksu tečenja“ u metodi Kasagrande, koji je nagib relacije  $w - \log_{10}N$ , gde je  $N$  broj udara (Spagnoli i sar., 2019). Na slici 7.1 je prikazana linearna log  $w$ -log  $h$  relacija koja odgovara jednačini 7.1.



Slika 7.1. Odnos penetracije konusa  $h$  (mm) i vlažnosti  $w$  (%) za konus 30°/80g

Prema standardu BS 1377-2:1990 prodiranja konusa 30°/80g koja odgovaraju penetraciji tla od  $h_{WL} = 20$  mm i  $h_{WP} = 2$  mm pokazuju zapravo vrednosti granice tečenja i granice plastičnosti. Prema Harison (1988), Fengu (2000) i Shimobe i Spagnoli (2020b) granica tečenja i granica plastičnosti dobijena opitom padajućeg konusa može se definisati sledećim izrazima:

$$w_L = C_0(20)^\beta \quad (7.2)$$

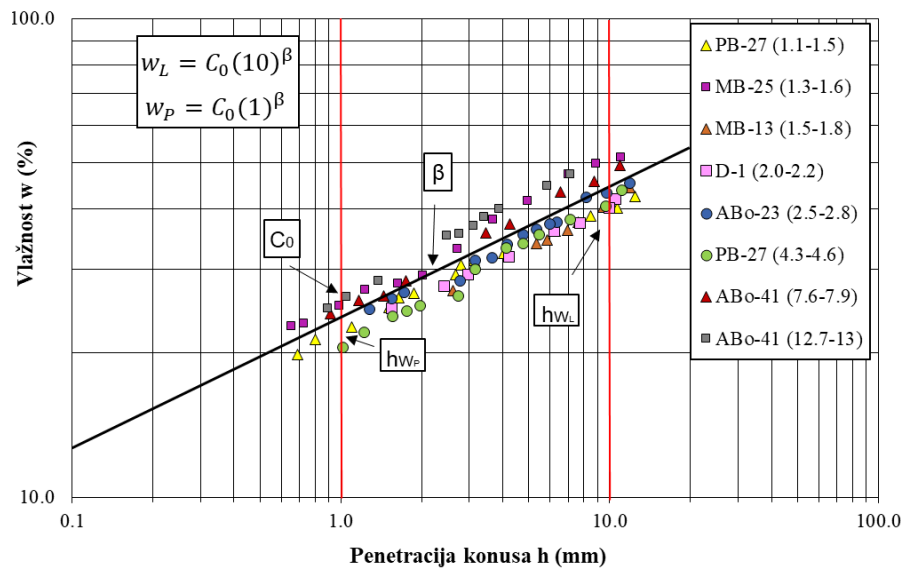
$$w_P = C_0(2)^\beta \quad (7.3)$$

Za drugi tip konusa 60°/60g granica tečenja tla se određuje za penetraciju od 1 mm. Prema istom principu kao i kod jednačina 7.2 i 7.3, tako i za konus 60°/60g granice tečenja i plastičnosti se mogu

odrediti za penetraciju od  $h_{WL} = 10$  mm i  $h_{WP} = 1$  mm. Njihova relacija je prikazana narednim jednačinama, a na Slici 7.2. je dat dijagram koji opisuje data laboratorijska ispitivanja.

$$w_L = C_0(10)^\beta \quad (7.4)$$

$$w_P = C_0(1)^\beta \quad (7.5)$$



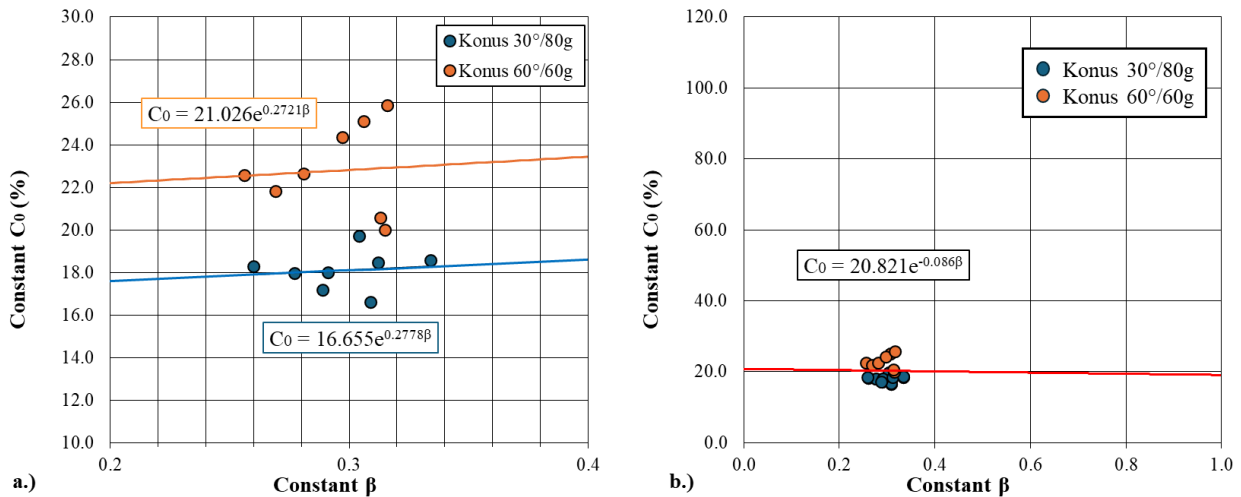
Slika 7.2. Odnos penetracije konusa  $h$  (mm) i vlažnosti  $w$  (%) za konus 60°/60g

Koeficijenti  $C_0$  i  $\beta$  su korisni za dobijanje granice tečenja i granice plastičnosti i kao takve ih upotrebljavamo za direktnu klasifikaciju plastičnosti tla. Prema Shimobe (2000), Shimobe i Spagnoli (2019) prosečna vrednost koeficijenta  $\beta$  za sitnozrnasta tla smatra se 0.3, dok su prosečne vrednosti kod Karakan (2023) skoro duplo veće i iznose 0.69. On je analizirao veliki broj uzorka koji sadrže različiti mineraloški sastav i stoga je varijacija u vrednostima koeficijenta  $\beta$  različita. Njegova istraživanja su pokazala da što je procenat minerala kaolinita i sepiolita veći to je koeficijent  $\beta$  približno 0.3. Prilikom ovih istraživanja analizirani su koeficijenti  $C_0$  i  $\beta$  za konus 30°/80g i 60°/60g. Za sve uzorke koeficijenti  $C_0$  i  $\beta$  su izdvojeni tabelarno (Tabela 7.3.).

Tabela 7.3. Vrednosti koeficijenta  $C_0$  i  $\beta$  za sve uzorke za dva osnovna konusa 30°/80g i 60°/60g

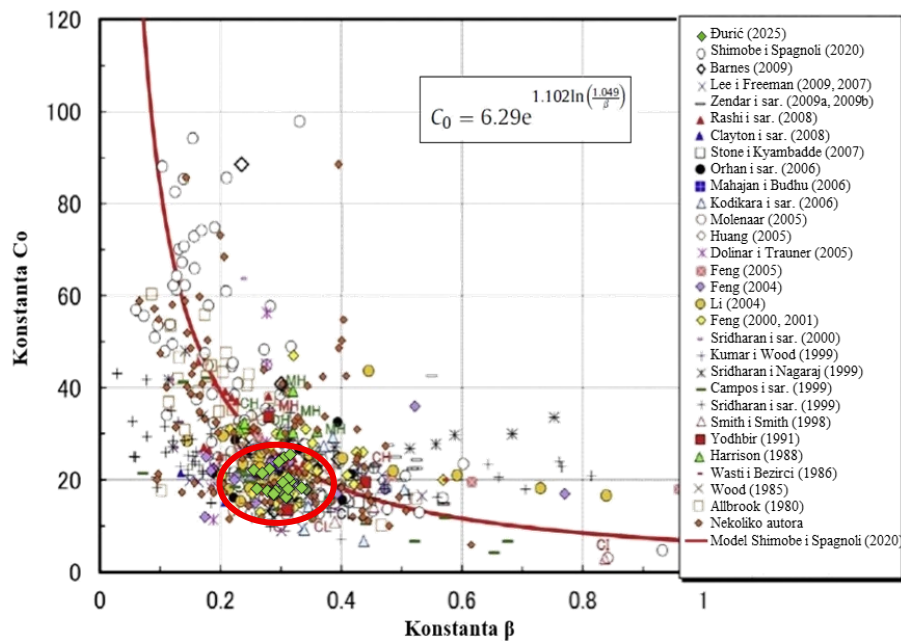
Tip konusa: Oznaka uzorka	Konus 30°/80g			Konus 60°/60g		
	$C_0$	$\beta$	$R^2$	$C_0$	$\beta$	$R^2$
<b>PB-27 (1.1-1.5)</b>	17.96	0.277	0.998	22.56	0.256	0.993
<b>MB-25 (1.3-1.6)</b>	19.72	0.304	0.991	25.11	0.306	0.990
<b>MB-13 (1.5-1.8)</b>	16.61	0.309	0.984	19.99	0.315	0.990
<b>D-1 (2.0-2.2)</b>	18.31	0.26	0.998	21.82	0.269	0.996
<b>ABo-23 (2.5-2.8)</b>	18.01	0.291	0.967	22.64	0.281	0.987
<b>PB-27 (4.3-4.6)</b>	17.20	0.289	0.993	20.56	0.313	0.990
<b>ABo-41 (7.6-7.9)</b>	18.48	0.312	0.999	24.35	0.297	0.996
<b>ABo-41 (12.7-13)</b>	18.58	0.334	0.994	25.87	0.316	0.997
<b>Srednja vrednost:</b>	18.08	0.30	0.99	22.86	0.29	0.99

Srednja vrednost indeksa nagiba  $\beta$  za konus tipa 30°/80g je 0.30 dok je za konus tipa 60°/60g 0.29. Razlika je zanemarljiva, što odgovara literaturnim podacima da je koeficijent  $\beta$  0.3. Ova vrednost koeficijenta  $\beta$  ukazuje na to da su ispitivanja vršena na kaolinitiskim glinama. Odnos koeficijenta  $C_0$  i  $\beta$  je za svaki konus dat posebno na Slici 7.3.a, dok je na Slici 7.3.b objedinjen i posmatran kao jedna celina. Iako su različiti konusi analiza objedenjenih podataka za koeficijente  $C_0$  i  $\beta$  je urađena da bi se oni lakše grupisali na dijagram Shimobe i Spagnoli (2020b).



Slika 7.3. Odnos koeficijenata  $C_0$  i  $\beta$  za oba tipa konusa a.) odvojeno b.) objedinjeno

Dobijeni podaci se najviše uklapaju sa podacima Fenga (2000, 2001). Na osnovu velikog broja studija (prikazanih u legendi) koja pokriva različite vrste tla može se uočiti da koeficijent  $C_0$  raste sa smanjenjem  $\beta$ . Slika 7.4. potvrđuje vezu između  $C_0$  i  $\beta$ , što je u skladu sa teorijom i Istraživanjima sprovedenim u okviru disertacije. Međutim, rasipanje podataka pokazuje da postoji značajna varijabilnost među različitim vrstama tla, pa bi dodatne analize bile korisne za bolje razumevanje uticajnih faktora kao što su mineralni sastav i istorija opterećenja tla.



Slika 7.4. Odnos koeficijenta  $C_0$  i  $\beta$  na velikoj bazi podataka (Shimobe i Spagnoli, 2020b – dopunjeno od Đurić, T.)

Indeks nagiba  $\beta$  prema jednačinama 7.2 do 7.5 može se izraziti i preko granice tečenja i granice plastičnosti. Uvođenjem parametra  $R_p$  koji predstavlja odnos granice plastičnosti i granice tečenja:

$R_p = \frac{W_p}{W_L}$ , indeks nagiba  $\beta$  se može prikazati jednačinom:

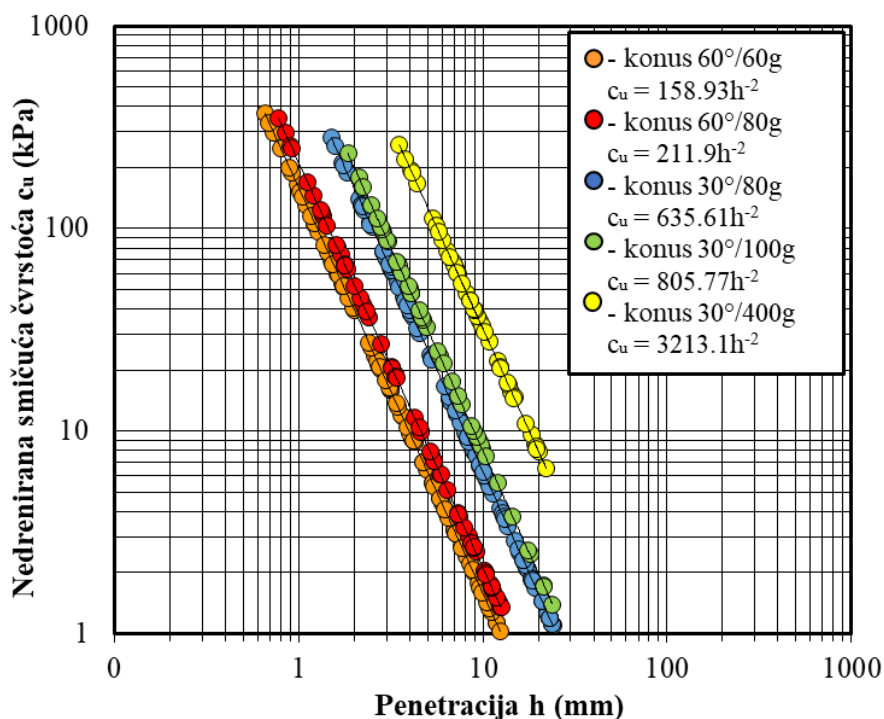
$$\beta = \log_{10}\left(\frac{1}{R_p}\right) \quad (7.5)$$

$$R_p = 0.1^\beta \quad (7.6)$$

Ove jednačine mogu da posluže za dalju analizu indeksa plastičnosti i primene na Kasagrandovu A-liniju i njenu jednačinu.

### 7.2.2. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće u odnosu na penetraciju

Nedrenirana smičuća čvrstoća se direktno dobija iz penetracije konusa (jednačina 5.10). Kako bi se dokazala ova zavisnost na Slici 7.5. je prikazana zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i penetracije za sve tipove konusa koji se ispituju, a matematički izrazi su izdvojeni na samom dijagramu.



Slika 7.5. Odnos penetracije konusa  $h$  (mm) i nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  (kPa)

Rezultati pokazuju da se uočava zavisnost u odnosu na geometriju i masu konusa, pri čemu sa povećanjem mase konusa dolazi do povećanja koeficijenta  $a$ , dok koeficijent  $b$  ostaje konstantan. Na osnovu prikazanog dijagrama možemo potvrditi da postoji jasna zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) i penetracije konusa ( $h$ ), i to se može prikazati u obliku eksponencijalne funkcije:

$$c_u = ah^b \quad (7.6)$$

Gde je:

$a$  – eksperimentalni koeficijent i zavisi od broja podataka koji se ispituje i

$b$  – konstanta koja zavisi od vrste tla koje se ispituje.

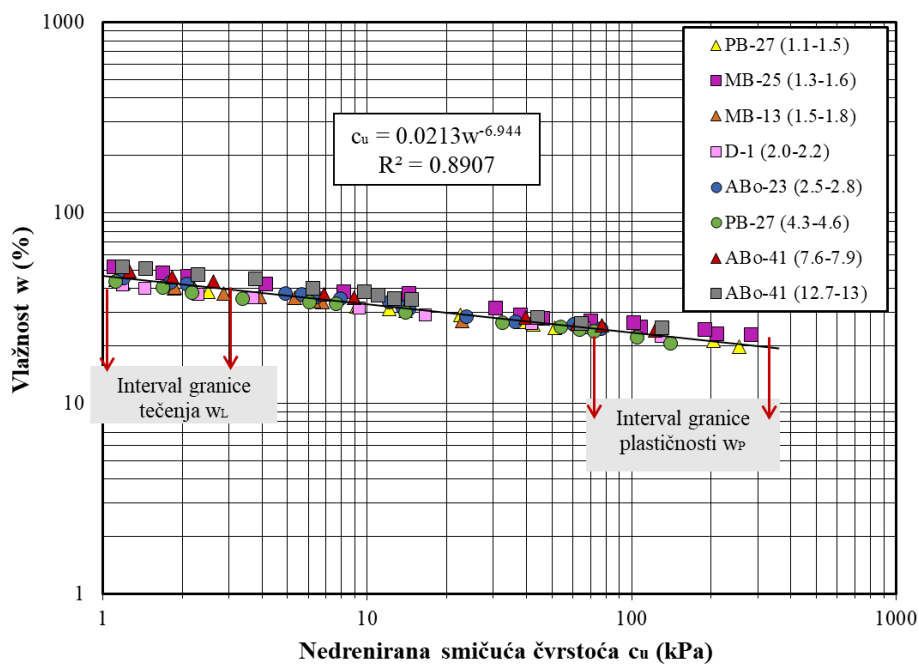
Linerana regresija u prikazanoj logaritamskoj raspodeli pokazuje savršenu tačnost podataka ( $R^2=1$ ). Na osnovu izdvojenih jednačina na Slici 7.5 konstanta  $b$  je ista za sve tipove konusa i ona iznosi minus dva.

### 7.2.3. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti

Nedrenirana smičuća čvrstoća tla zavisi od više faktora, a ranije je već objašnjeno da značajno mesto zauzima vlažnost. Povećanje ili smanjenje vlažnosti menja ponašanje tla i njegovu smičuću čvrstoću. U ovom poglavlju prikazan je uticaj vlažnosti na nedreniranu smičuću čvrstoću tla. Sve jednačine će biti prikazane oblikom:

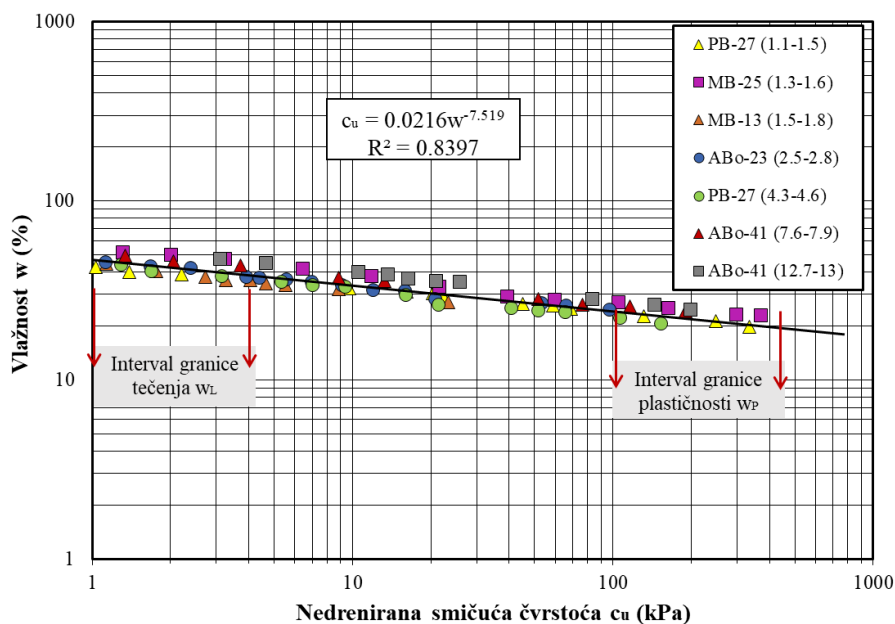
$$c_u = aw^{-b} \quad (7.7)$$

Opiti padajućeg konusa izvedeni su na uzorcima u širokom opsegu vlažnosti što je rezultiralo sa više od 300 pojedinačnih merenja penetracije korišćenjem različitih konusa. Konačni rezultat predstavlja prosečnu vrednost svih opita. Slika 7.6. pokazuje logaritamski odnos između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće tla koja je određena konusom 30°/80g. Nedrenirana smičuća čvrstoća je dobijena za ukupno 95 merenja. Na osnovu regresione analize dobijena jednačina je prikazana na Slici 7.6. Vrednost koeficijenta determinacije  $R^2 = 0.89$  je visoka. Ovo ukazuje na veoma dobru korelaciju između dva parametra.



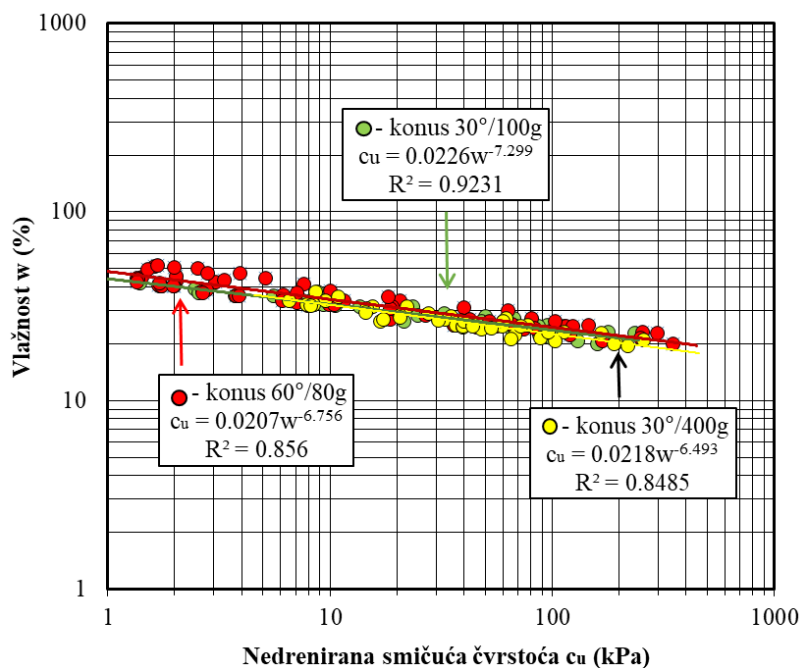
Slika 7.6. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$  za konus 30°/80g

Kada razmatramo relaciju između ove dve zavisnosti prilikom primene konusa 60°/60g, primetiće se slična zavisnost kao i kod konusa 30°/80g. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće konusom 60°/60g dobijene su na 88 uzoraka. Analizom rezultata utvrđen je koeficijent determinacije koji je malo manji i iznosi  $R^2 = 0.84$ , što dokazuje visoku tačnost korelacije koja je prikazana na Slici 7.7.



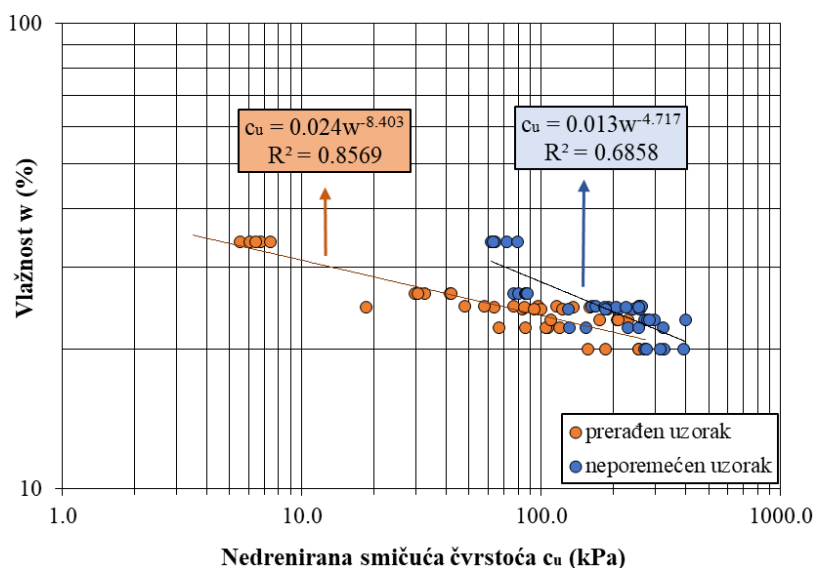
Slika 7.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$  za konus 60°/60g

Nedrenirana smičuća čvrstoća u zavisnosti od vlažnosti za ostala tri konusa 60°/80g, 30°/100g i 30°/400g prikazana je na Slici 7.8. Za konus 60°/80g je urađeno 66 merenja, konusom 30°/100g i 30°/400g urađeno je po 43 merenja. Na ovom dijagramu uzorci nisu pojedinačno izdvojeni već su razmatrani kao grupa ispitivanih vrednosti. U poređenju sa svim konusima koeficijent determinacije za dobijanje nedrenirane smičuće čvrstoće za konus 30°/100g je najviši i iznosi  $R^2 = 0.92$ . Konusi koji se koriste za dobijanje nedrenirane smičuće čvrstoće u svetskoj literaturi su obično konusi 60°/60g i 30°/80g. Prema standardu SRPS EN ISO 17892-6 konus od 100g se isto može primenjivati, što se kroz ova istraživanja dokazalo. Svi dobijeni rezultati su vrlo slični. Za konstantu materijala izdvojila bi se vrednost od 0.02 za ovo ispitivano područje, dok druga konstanta varira od -6.5 do 7.5.



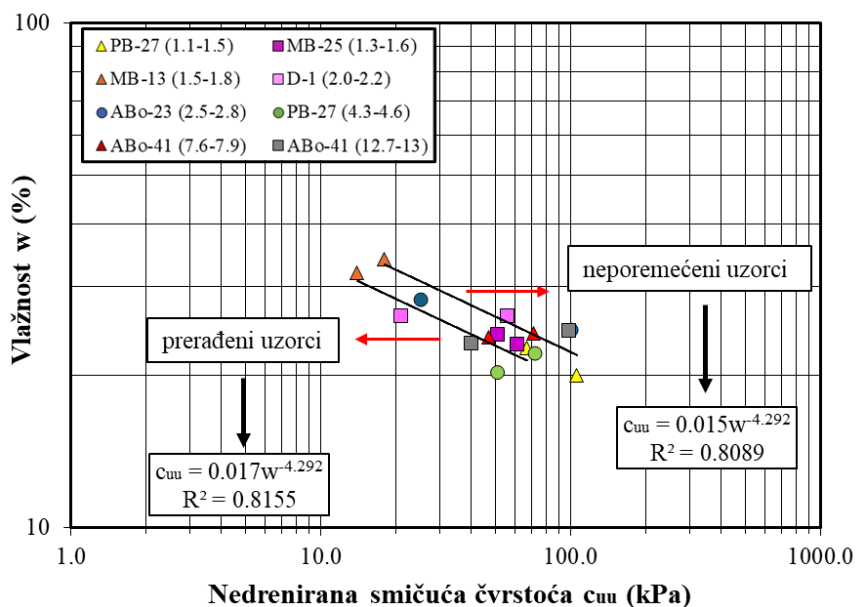
Slika 7.8. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$  za konus 60°/80g, 30°/100g i 30°/400g

Zbirni prikaz dobijenih rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće u zavisnosti od prirodne vlažnosti na prerađenim i neporemećenim uzorcima za sve tipove konusa je objedinjen na Slici 7.9. Na dijagramu su istaknute jednačine, gde se vidi da je rasipanje podataka izraženije kod vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće koje su dobijene na neporemećenim uzorcima. Koeficijent materijala  $a$  je kao i kod prethodnih analiza na prerađenim uzorcima 0.024, dok je na neporemećenim manji i iznosi 0.013.



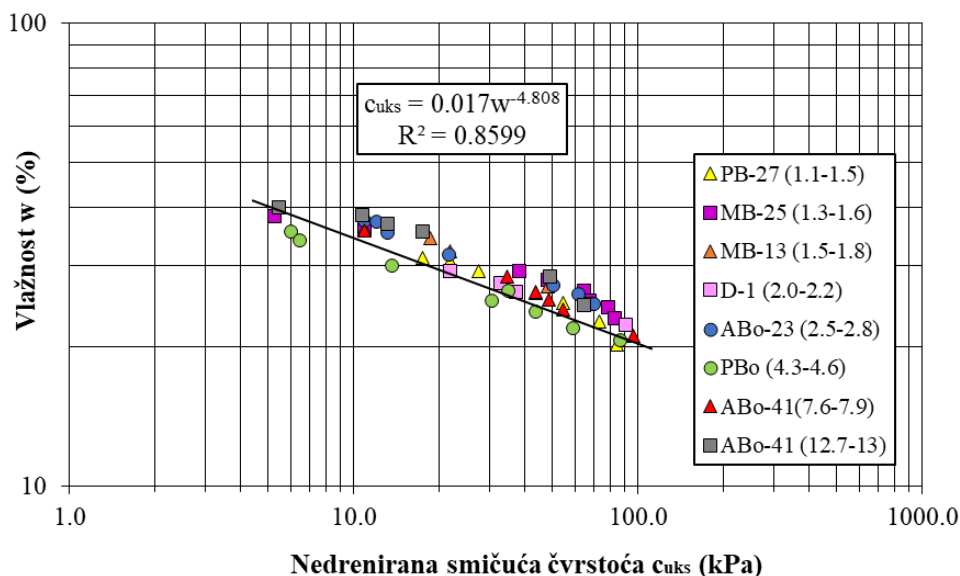
Slika 7.9. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i prirodne vlažnosti  $w$  na neporemećenim i prerađenim uzorcima primenom metode padajućeg konusa

Nedrenirana smičuća čvrstoća koja je dobijena jednoaksijalnim opitom u zavisnosti od vlažnosti prikazana je na Slici 7.10. Kod jednoaksijalnog opita veći je broj rasipanja rezultata ali je to posledica manjeg broja ispitivanja prerađenih uzoraka u odnosu na ispitivanja obavljena padajućim konusom. Koeficijent determinacije ukazuje na dobru korelaciju. Konstanta materijala se razlikuje kod neporemećenih (0.015) i prerađenih uzoraka (0.017), dok im je pravac pružanja krivih isti.



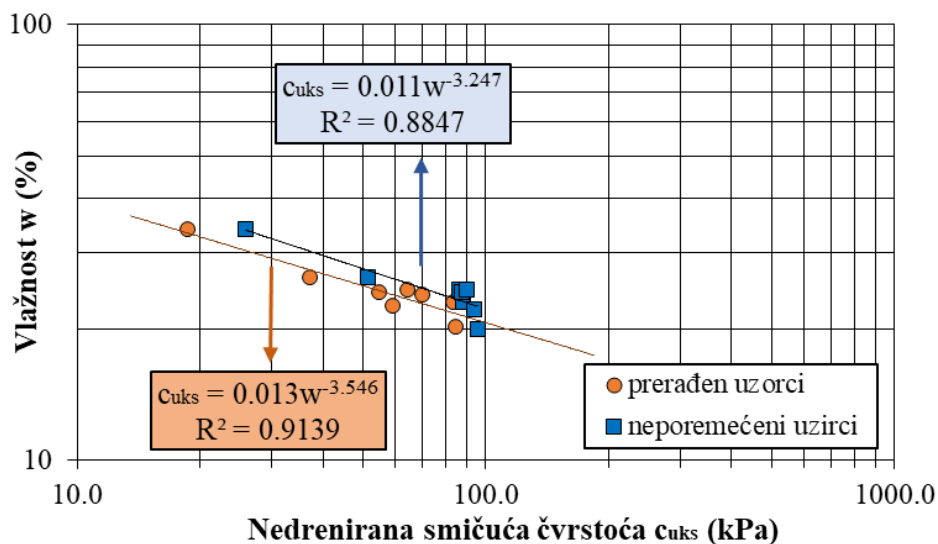
Slika 7.10. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_{uu}$  od vlažnosti  $w$  primenom jednoaksijalnog opita na neporemećenim i prerađenim uzorcima

Džepnom krilnom sondom je urađeno ukupno 48 merenja na prerađenim uzorcima. Nedrenirana smičuća čvrstoća u zavisnosti od vlažnosti je prikazana logaritamskom raspodelom, gde je na dijagramu izdvojena jednakost računanja nedrenirane smičuće čvrstoće na osnovu određenog broja ispitivanja (Slika 7.11.). Trend promene je sličan kao i kod metode padajućeg konusa. Koeficijent materijala je isti kao i kod jednoaksijalne kompresije i iznosi 0.017.



Slika 7.11. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_{uks}$  od vlažnosti  $w$  u primenom džepne krilne sonde

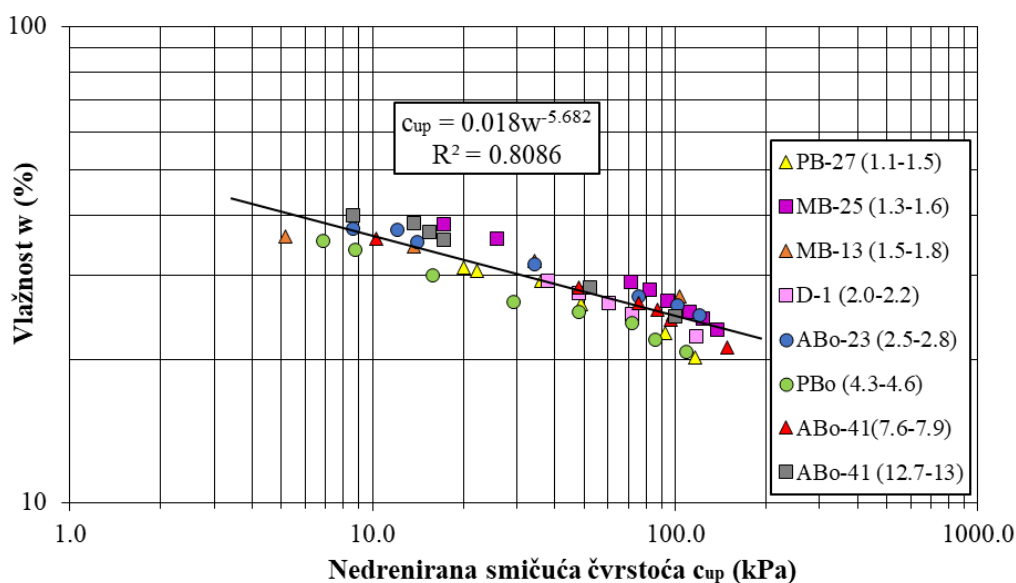
Džepnom krilnom sondom je nedrenirana smičuća čvrstoća urađena i na neporemećenim uzorcima. Na Slici 7.12. su prikazani rezultati zajedno sa prerađenim uzorcima koji su urađeni za prirodnu vlažnost.



Slika 7.12. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_{uks}$  i prirodne vlažnosti  $w$  u primenom džepne krilne sonde

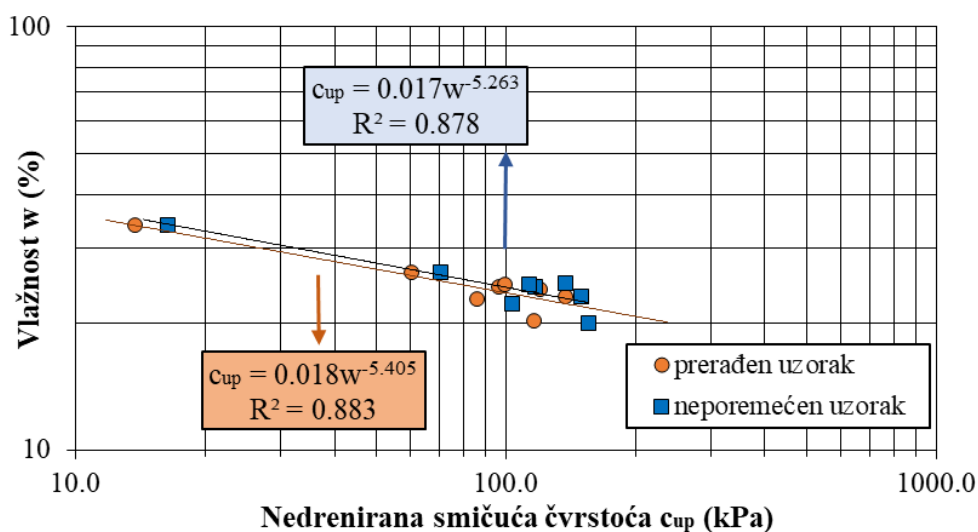
Koeficijenti determinacije su dobri za oba tipa uzoraka (neporemećene i prerađene). Razlika nedreniranih čvrstoća na neporemećenim u poređenju sa prerađenim uzorcima je znatno manja nego kada posmatramo rezultate dobijene opitom jednoaksijalne kompresije i opitom padajućeg konusa.

Džepni pentrometar je korišćen za dobijanje 48 različitih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće na prerađenim uzorcima (Slika 7.13.). Koeficijent determinacije je visok ( $R^2 = 0.81$ ).



Slika 7.13. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_{up}$  od vlažnosti  $w$  primenom džepnog penetrometra

Trend je identičan kao i kod džepne krilne sonde. Nema rasipanja podataka. Za analizu grupnih merenja u obzir su uzeti podaci dobijeni nastavkom prečnika 10 mm. Merenja džepnim penetrometrom su, kao i kod krilne sonde, urađena i na neporemećenim uzorcima za prirodnu vlažnost (Slika 7.14.).



Slika 7.14. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_{up}$  i prirodne vlažnosti  $w$  primenom džepnog penetrometra

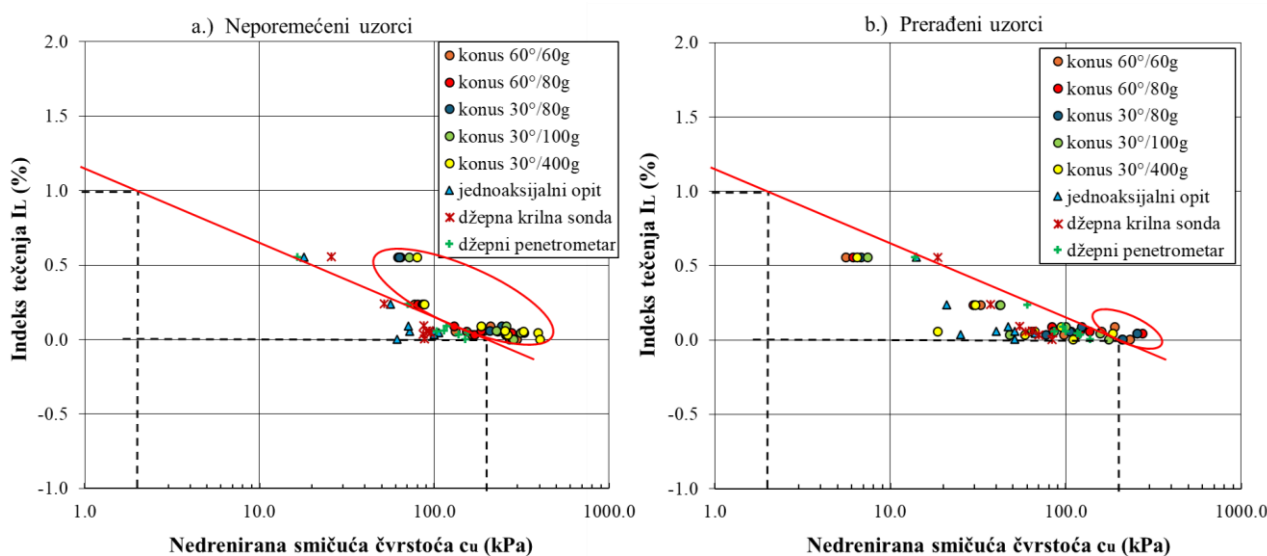
Preglednom tabelom (Tabela 7.4) su istaknute jednačine za računanje nedrenirane smičuće čvrstoće kada se koriste neporemećeni i prerađeni uzorci u zavisnosti od analiziranih metoda ispitivanja.

Tabela 7.4. Empirijske korelacije koje se koriste za računanje nedrenirane smičuće čvrstoće

Uzorak	Neporemećen		Prerađen		
	Opit	Jednačina	R <sup>2</sup>	Jednačina	R <sup>2</sup>
Padajući konus 30°/80g		$c_u = 0.0128w^{-4.367}$	0.69	$c_u = 0.0213w^{-6.944}$	0.89
Padajući konus 60°/60g		$c_u = 0.0123w^{-4.367}$	0.79	$c_u = 0.0216w^{-7.518}$	0.84
Jednoaksijalni opit		$c_{uu} = 0.015w^{-4.294}$	0.82	$c_{uu} = 0.017w^{-4.294}$	0.82
Džepna krilna sonda		$c_{uks} = 0.011w^{-3.247}$	0.86	$c_{uks} = 0.017w^{-4.808}$	0.86
Džepni penetrometar		$c_{up} = 0.017w^{-5.263}$	0.88	$c_{up} = 0.018w^{-5.682}$	0.81

### 7.3. Korelacione zavisnosti između indeksa tečenja i nedrenirane smičuće čvrstoće

Korelacione zavisnosti između indeksa tečenja i nedrenirane smičuće čvrstoće predstavljaju jedno od čestih analiza u mehanici tla, jer omogućavaju procenu čvrstoće na osnovu jednostavnih laboratorijskih ispitivanja. U okviru ovih istraživanja, na samom početku Poglavlja 7, urađena je Pirsonova korelacija između indeksa tečenja ( $I_L$ ) i nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ). Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije kreću se u intervalu od -0.70 do -0.96 za neporemećene uzorke tla i od -0.59 do -0.89 za prerađene uzorke tla. Ovo ukazuje na snažnu negativnu zavisnost između ovih parametara, drugim rečima, povećanjem indeksa tečenja  $I_L$  dolazi do smanjenja nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$ , što je u skladu sa očekivanim ponašanjem za glinovito prašnaste materijale (Slika 7.15.).



Slika 7.15. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i indeksa tečenja  $I_L$  na a.) neporemećenim uzorcima b.) prerađenim uzorcima

Na Slici 7.15. je izvučena crvena prava – oblast koju je definisao Wood (1990) i koja je objašnjena u Poglavlju 2. Uočljiva je razlika između opita na neporemećenim i na prerađenim uzorcima. Prema Wood-u (1990) materijali su podeljeni na normalno konsolidovane i prekonsolidovane. On je oblast koja se nalazi ispod prave definisao kao normalno konsolidovanu. Prerađeni uzorci potvrđuju da se radi o normalno konsolidovanim materijalima, dok neporemećeni za opit padajućeg konusa prelaze van prave (jer su dobijene vrednosti veće od 200 kPa), ali su za ostale metode ispitivanja ispod

definisane prave. Oblak podataka na dijagramu koji je uokviren, nije definisan od strane Wood-a (1990), ali je u blizini prekonsolidovanih materijala. Na osnovu ovih istraživanja moguće ga je svrstati kao zonu slabo prekonsolidovanih materijala. Na osnovu edometarskog opita i određivanja napona i stepena prekonsolidacije ova grupa materijala pripada slabo prekonsolidovanom tlu.

U Tabeli 7.5 su izdvojeni parametri korelacionih zavisnosti između nedrenirane čvrstoće i indeksa tečenja, jer svaka jednačina ima isti eksponencijalni oblik:

$$c_u = a \cdot e^{-b \cdot I_L} \quad (7.8)$$

Gde su  $a$  i  $b$  parametri koji opisuju krivu i zavise od vrste tla.

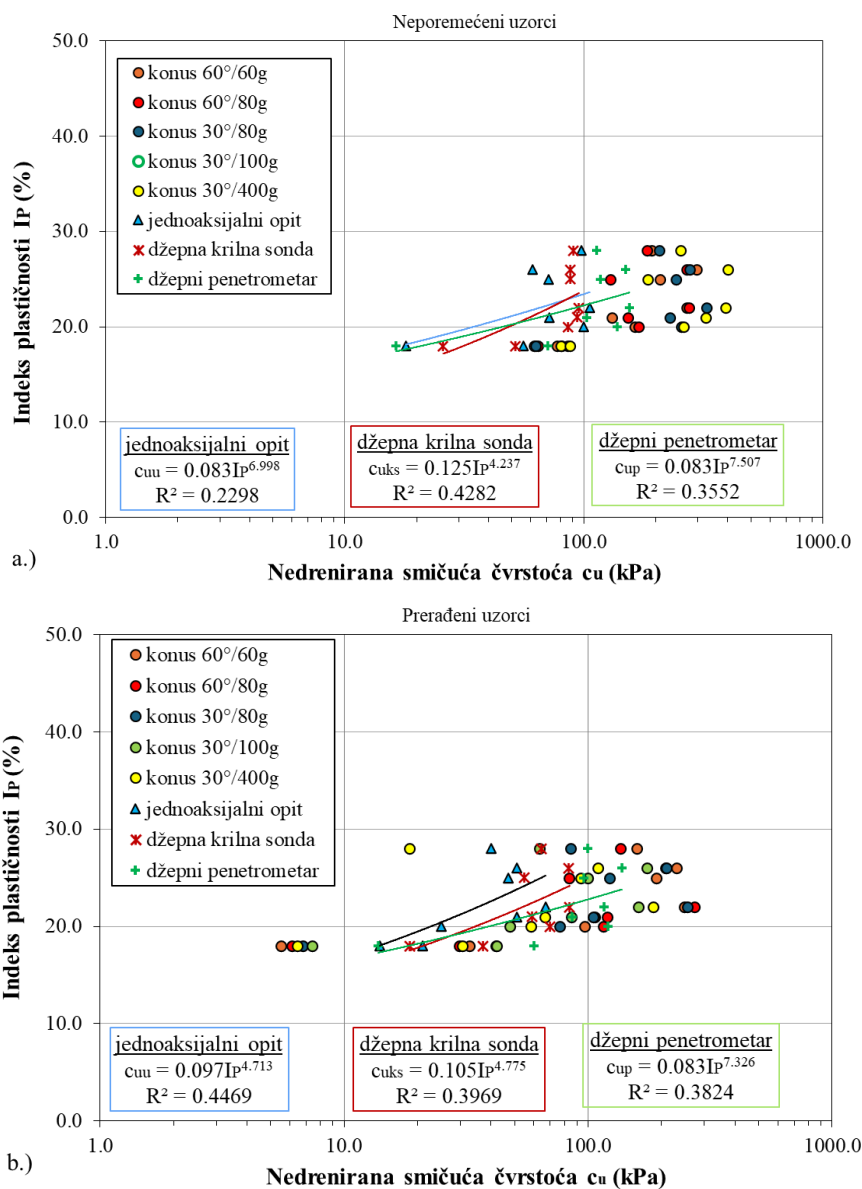
Tabela 7.5. Parametri i koeficijent determinacije za svaki opit koji se koristio za dobijanje nedrenirane smičuće čvrstoće

Opiti	Prerađeni uzorci			Neporemećeni uzorci		
	Parametri		Koeficijent determinacije	Parametri		Koeficijent determinacije
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
<i>Konus 60°/60g</i>	216.25	-6.718	0.63	219.81	-2.593	0.64
<i>Konus 60°/80g</i>	191.75	-6.473	0.66	206.82	-2.437	0.65
<i>Konus 30°/80g</i>	170.26	-5.819	0.54	279.3	-2.989	0.82
<i>Konus 30°/100g</i>	122.36	-4.979	0.56	286.96	-2.831	0.85
<i>Konus 30°/400g</i>	90.943	-4.752	0.35	320.32	-2.973	0.75
<i>Jednoaksijalni opit</i>	48.815	-2.387	0.52	96.193	-2.862	0.63
<i>Džepna krilna sonda</i>	77.341	-2.665	0.89	100.34	-2.458	0.93
<i>Džepni penetrometar</i>	133.54	-3.991	0.94	157.67	-3.972	0.91

Koeficijenti determinacije za sve krive su dosta različiti, kreću se u rasponu od min. 0.35 do max. 0.94. Kada se zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja prikazuje potencijalnom krivom, koeficijenti determinacije su mnogo veći (što će se videti u verifikaciji rezultata).

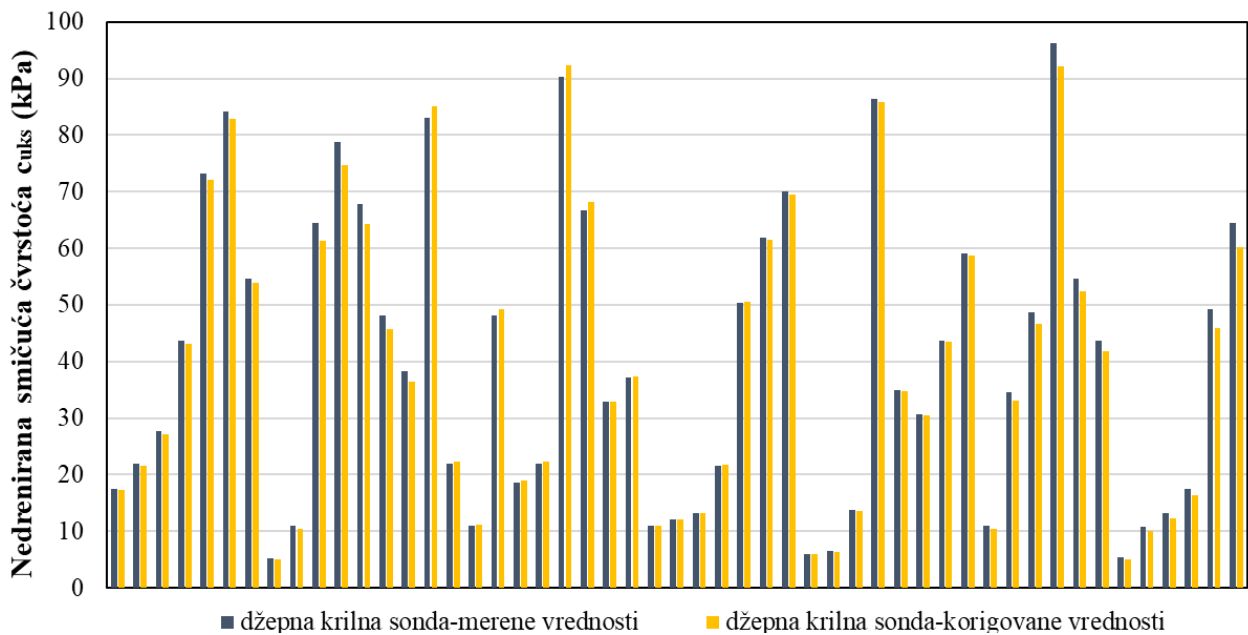
#### 7.4. Korelacione zavisnosti između indeksa plastičnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće

U ovom delu disertacije prikazani su rezultati ispitivanja nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) u zavisnosti od indeksa plastičnosti ( $I_p$ ). Podaci su dobijeni različitim metodama ispitivanja, uključujući sve tipove konusa, jednoaksijalni opit, džepnu krilnu sondu i džepni penetrometar. Na osnovu prikazanih dijagrama (Slika 7.16.) može se uočiti da ne postoji jasna i konzistentna korelacija između ova dva parametra, s obzirom da su rezultati rasuti. Čak i kada se vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće normalizuju vertikalnim naponom ili atmosferskim pritiskom, trend ostaje nejasan. Vidljivo je da sa porastom indeksa plastičnosti raste i nedrenirana smičuća čvrstoća, ali se ne može uspostaviti jedinstvena zavisnost koja bi se mogla iskazati nekom jednačinom.



Slika 7.16. Zavisnost granice plastičnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće a.) neporemećeni uzorci, b.) prerađeni uzorci

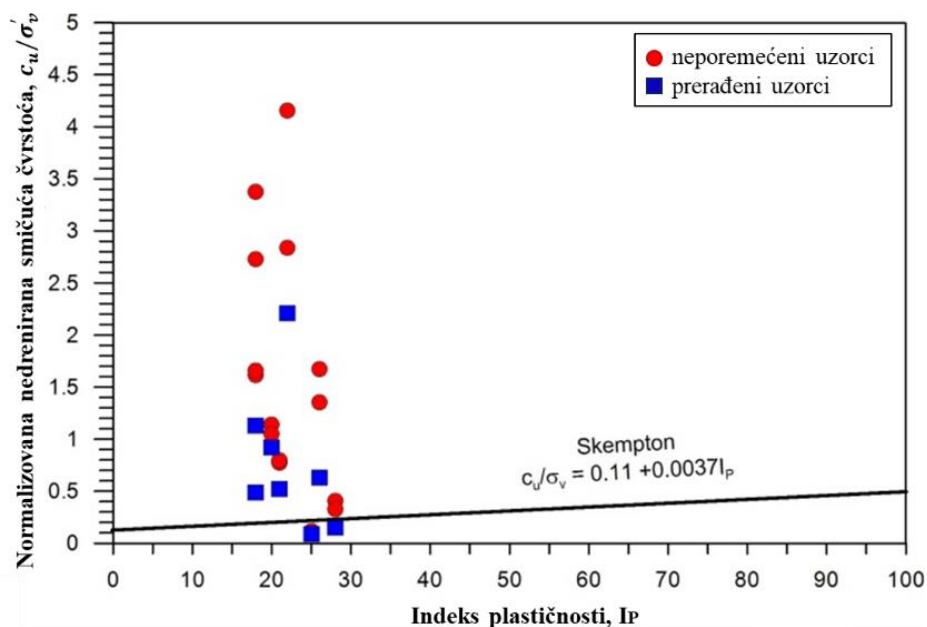
Ovakvi rezultati se poklapaju sa zapažanjima do kojih su dosli Tsuchida (2000), Strózyk i Tankiewicz (2013), Obasi i Anyaegbunam (2015) i Widodo (2019). Indeks plastičnosti sam po sebi nije dovoljan parametar za pouzdano predviđanje nedrenirane smičuće čvrstoće tla. Pored mineralnog sastava i sadržaja gline, na čvrstoću utiču i faktori kao što su stepen poremećenosti uzorka, struktura i istorija opterećenja. Zbog toga je neophodno kombinovati više metoda ispitivanja i analizirati rezultate u širem kontekstu, kako bi se dobila realna slika mehaničkog ponašanja tla. Bjerum (1973) možda baš iz tih razloga predlaže uvođenje korekcionog faktora  $\mu$  (Poglavlje 2, jednačina 2.7). Ovim se indeks plastičnosti direktno uvodi u korekciju nedreniranirane smičuće čvrstoće kada se izvodi opit krilne sonde. Na Slici 7.17. je prikazan dijagram na kome se vide male razlike između merenih i korigovanih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće faktorom  $\mu$ .



Slika 7.17. Razlika merenih i korigovanih nedreniranih smičućih čvrstoća primenom korekcionog faktora  $\mu$

Korekcioni faktor  $\mu$  se kreće u rasponu od 0.93 do 1.02. Samim tim korigovana nedrenirana smičuća čvrstoća na prerađenim uzorcima se malo menja. Apsolutna procentualna razlika vrednosti se kreće od 0.35% do 6.73%, što je za ovu vrstu merenja u mehanici tla zanemarljivo.

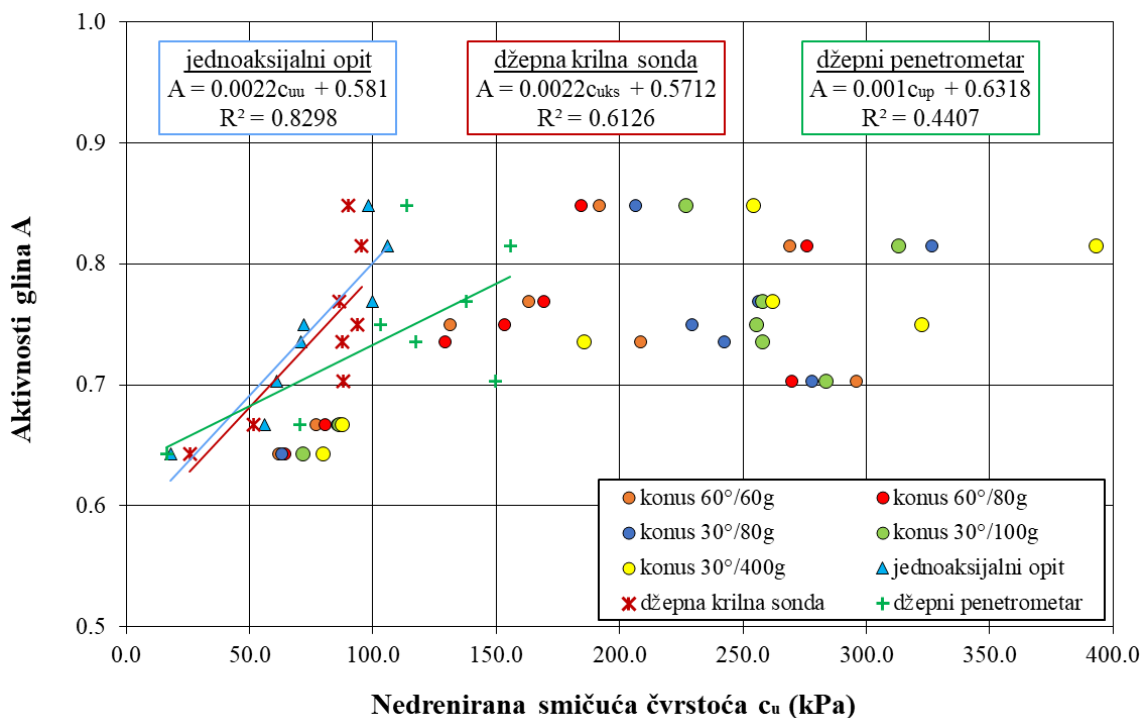
U cilju poređenja eksperimentalnih rezultata sa korelacijom koju je predložio Skempton (1957), rezultati nedrenirane smičuće čvrstoće dobijeni jednoaksijalnim opitom su prikazani kroz normalizovanu nedreniranu čvrstoću (odnos  $c_u/\sigma'_v$ ) u funkciji indeksa plastičnosti  $I_p$ . Analiza je izvršena za neporemećene i prerađene uzorke tla (Slika 7.18.).



Slika 7.18. Normalizovana nedrenirana smičuća čvrstoća u funkciji od indeksa plastičnosti

Sa dijagrama se može uočiti značajno rasipanje rezultata i odstupanje od Skemptonove korelacije, pri čemu većina dobijenih vrednosti odnosa  $c_u/\sigma'_v$  prelazi vrednosti predviđene ovom empirijskom relacijom. Najbliži Skemptonovoj jednačini su uzorci koji su uzimani sa većih dubina.

Kako indeks plastičnosti direktno utiče na aktivnost glina razmatrana je mogućnost pravljenja korelacionih zavisnosti između aktivnosti glina i nedrenirane smičuće čvrstoće. Aktivnost glina je definisana u Poglavlju 5.1.4. Na Slici 7.19. je prikazana zavisnost aktivnosti glina i nedrenirane smičuće čvrstoće.



Slika 7.19. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i aktivnosti glina

Aktivnost glina se kreće od 0.643 do 0.818. Uzorci PB-27 (1.1-1.5 m), ABo-23 (2.5-2.8 m), PB-27 (4.3-4.6 m) i ABo (12.7-13.0 m) pripadaju grupi normalnih ili srednje aktivnih glina, koje sadrže različite minerale, sa preovladajućim učešćem illita u sebi i zahvaljujući prisustvu kalijuma balansiraju negativna naelektrisanja na površinu čestica koje ne vezuju jednostavno vodu. Uzorci MB-25 (1.3-1.6 m), MB-13 (1.5-1.8 m), D-1 (2.0-2.2 m) i ABo-41(7.6-7.9 m) pripadaju neaktivnim ili slabo aktivnim glinama, sa dominantnim prisustvom kaolinita u sebi. Kao što se može videti podaci dobijeni padajućim konusom su rasuti. Na Slici 7.19 su izdvojene korelacije za tri metode: jednoaksijalni opit, džepna krilna sonda i džepni penetrometar. Najjača zavisnost je između rezultata dobijenih jednoaksijalnim opitom i indeksa aktivnosti i prikazana je jednačinom:

$$A = 0.0022c_{uu} + 0.581 \quad (7.9)$$

Gde je:

A – aktivnost glina i

$c_{uu}$  – nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena jednoaksijalnim opitom

## 8. RAZVOJ PREDIKTIVNIH MODELA ZA NEDRENIRANU SMIČUĆU ČVRSTOĆU

Razvoj prediktivnih modela u sklopu ovih istraživanja ima za cilj da se na osnovu poznatih identifikaciono-klasifikacionih parametara proceni nedrenirana smičuća čvrstoća ( $c_u$ ) na prerađenim uzorcima. U ovom delu analiziraće se jednostavna linearna regresija unutar uzoraka. Na ovaj način će se sagledati varijacije koje se javljaju između različitih uzoraka i dobiće se uvid u to koliko se linearni odnos menja u zavisnosti od specifičnih karakteristika tla, kao i između samih opita. Nakon toga, biće razmatrana višestruka linearna regresija koja uključuje više nezavisnih promenljivih istovremeno. Poređenjem rezultata jednostavne i višestruke regresije biće moguće proceniti prediktivnu mogućnost svakog pristupa i identifikovati model koji daje najpouzdanije rezultate u prognozi nedrenirane smičuće čvrstoće sa statističkog pogleda.

Pored statističkih modela, u nastavku će biti prikazana i primena SHANSEP modela, koji predstavlja empirijski pristup zasnovan na odnosu između normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i stepena prekonsolidacije.

### 8.1. Jednostavna linearna regresija unutar uzoraka

Prilikom ovih istraživanja svaki uzorak je testiran metodom padajućeg konusa, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom u širokom rasponu sadržaja vode, što je rezultovalo velikom broju ponovljenih merenja (ukupno za ove tri metode 285). Da bi se pravilno sagledala ovakva struktura podataka, sprovedena je jednostavna linearna regresija unutar ispitivanih uzoraka. Za svaki pojedinačni uzorak ispitivan je odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ) i odnosa sadržaja vode (WCR) korišćenjem log-log regresije oblika:

$$\log(c_u) = a_i + b_i \cdot \log(WCR) \quad (8.1)$$

Gde su  $a_i$  i  $b_i$  koeficijenti regresione analize specifične za svaki uzorak. Rezultati regresija, zajedno sa brojem testova i koeficijentima determinacije, prikazani su u Tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Rezultati linearne regresije unutar uzorka za opit padajućeg konusa

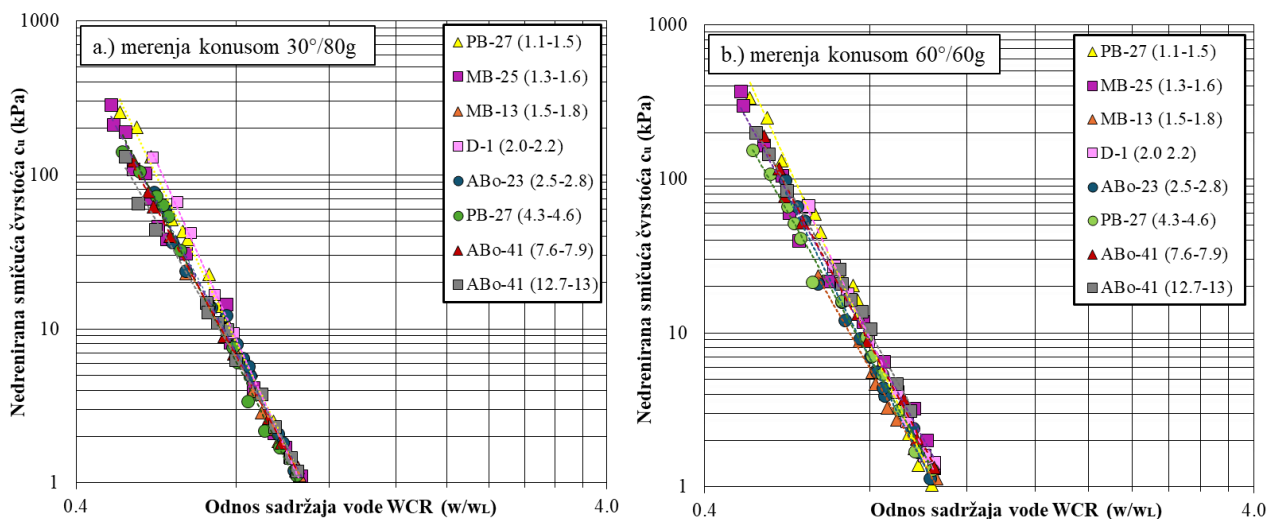
Tip konusa Uzorak (m)	30°/80g			60°/60g				
	Broj merenja	a	b	R <sup>2</sup>	Broj merenja	a	b	R <sup>2</sup>
PB-27 (1.1-1.5)	13	0.22	-7.19	0.97	12	0.18	-7.76	0.98
MB-25 (1.3-1.6)	15	0.22	-6.51	0.97	14	0.32	-6.46	0.98
MB-13 (1.5-1.8)	10	0.20	-6.36	0.99	9	0.16	-6.29	1.00
D-1 (2.0-2.2)	9	0.20	-7.67	1.00	13	0.25	-7.40	1.00
ABO-23 (2.5-2.8)	14	0.23	-6.54	0.98	13	0.16	-7.03	0.98
PB-27 (4.3-4.6)	13	0.13	-6.87	0.96	9	0.23	-6.33	0.99
ABO-41 (7.6-7.9)	9	0.20	-6.42	1.00	10	0.28	-6.71	0.98
ABO-41 (12.7-13)	12	0.24	-5.94	0.96	8	0.39	-6.32	1.00
<b>Srednja vrednost:</b>	-	0.20	-6.69	0.98	-	0.25	-6.79	0.99

Na osnovu srednje vrednosti izdvojene su jednačine:

$$\text{Za konus } 30^\circ/80\text{g:} \quad \log(c_u) = 0.20 - 6.69 \cdot \log(WCR) \quad (8.2)$$

$$\text{Za konus } 60^\circ/60\text{g:} \quad \log(c_u) = 0.25 - 6.79 \cdot \log(WCR) \quad (8.3)$$

Dobijeni rezultati ukazuju na visoke koeficijente determinacije za sve uzorke, što potvrđuje snažnu zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode. Na Slici 8.1. prikazan je log-log odnos unutar uzorka između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode (WCR) merene pomoću različitih konusa: 30°/80g i 60°/60g. Gotovo paralelna priroda krivih potvrđuje da je predloženi odnos stabilan unutar svakog materijala, a istovremeno naglašava značaj lokalne kalibracije prilikom primene empirijskih modela na različite tipove tla.



Slika 8.1. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode a.) korišćenjem konusa 30°/80g i b.) konusa 60°/60g

Uprkos razlikama u geometriji konusa, nagibi regresionih krivi dobijenih za oba tipa konusa ostaju u uskom rasponu, što dodatno potvrđuje pouzdanost identifikovanog odnosa unutar uzorka.

Isti postupak je primenjen i za opit džepne krilne sonde i džepnog penetrometra. Za oba opita su rezultati regresije prikazani u Tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Rezultati linearne regresije unutar uzorka za opit džepne krilne sonde i džepnog penetrometra

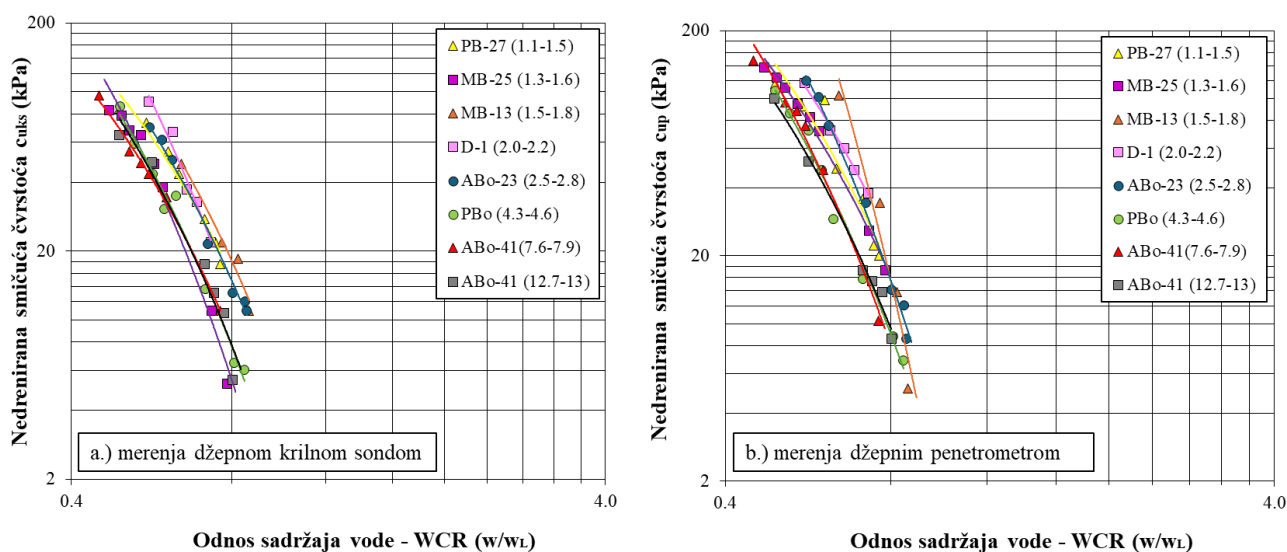
Opit Uzorak (m)	Džepna krilna sonda				Džepni penetrometar			
	Broj merenja	a	b	R <sup>2</sup>	Broj merenja	a	b	R <sup>2</sup>
PB-27 (1.1-1.5)	7	3.26	-5.935	0.95	7	3.62	-6.862	0.84
MB-25 (1.3-1.6)	8	3.85	-8.973	0.94	8	3.56	-6.771	0.99
MB-13 (1.5-1.8)	4	3.47	-6.379	0.99	4	5.78	-13.2	0.98
D-1 (2.0-2.2)	5	4.06	-8.562	0.95	5	3.64	-6.545	0.99
ABo-23 (2.5-2.8)	7	3.44	-6.531	0.99	7	4.23	-8.749	0.99
PB-27 (4.3-4.6)	8	3.54	-7.657	0.98	8	3.78	-8.121	0.98
ABo-41 (7.6-7.9)	6	3.30	-6.834	0.99	6	3.96	-8.8	0.97
ABo-41 (12.7-13)	6	3.47	-7.447	0.96	6	3.58	-7.478	0.99
<b>Srednja vrednost:</b>	-	3.55	-7.29	0.97	-	4.02	-8.32	0.97

Na osnovu srednje vrednosti izdvojene su jednačine za oba opita:

$$\text{Džepna krilna sonda:} \quad \log(c_u) = 3.55 - 7.29 \cdot \log(WCR) \quad (8.4)$$

$$\text{Džepni penetrometar:} \quad \log(c_u) = 4.02 - 8.32 \cdot \log(WCR) \quad (8.5)$$

Koeficijenti determinacije za sve uzorke su veći od 0.90, što potvrđuje snažnu zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode. Koeficijenti  $a$  i  $b$  se razlikuju u poređenju sa metodom konusa, naročito koeficijent  $a$ . Na dijagramu (Slika 8.2.) je dat odnos dve promenljive ( $c_u$  – WCR) u istoj razmeri kao i za opit padajućeg konusa radi boljeg upoređivanja dobijenih rezultata.



Slika 8.2. Odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće -  $c_u$  i odnosa sadržaja vode - WCR a.) merenja pomoću džepne krilne sonde, b.) merenja pomoću džepnim penetrometrom

Kod sva tri opita, nagib krivi b je od -6.7 do -7.4, što ukazuje da je mehanizam degradacije čvrstoće sa povećanjem vlažnosti nezavisan od metode merenja, dok se koeficijent  $a$  razlikuje više. Kod padajućeg konusa je oko 0.2 dok je kod ova dva opita 3.9, što ukazuje da je razlika u načinu smicanja tj. samoj metodi izvođenja opita.

Dobijeni rezultati linearne regresije unutar uzorka ukazuju na to da je odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vlažnosti izrazito stabilan unutar svakog pojedinačnog uzorka kod svih analiziranih metoda. Visoke vrednosti koeficijenta determinacije i mali raspon nagiba regresionih krivi potvrđuju da promena vlažnosti predstavlja dominantan faktor koji utiče na nedreniranu smičuću čvrstoću. Razlike između pojedinačnih uzoraka se prvenstveno ispoljavaju kroz različite vrednosti preseka regresionih krivih, što ukazuje na uticaj mineralnog sastava, zapreminske težine i stepena prekonsolidacije tj. istorije opterećenja. Stoga se dalje razmatraju prošireni regresioni modeli koji, pored vlažnosti i granice tečenja, uključuju i dodatne parametre.

## 8.2. Višestruka linearna regresija

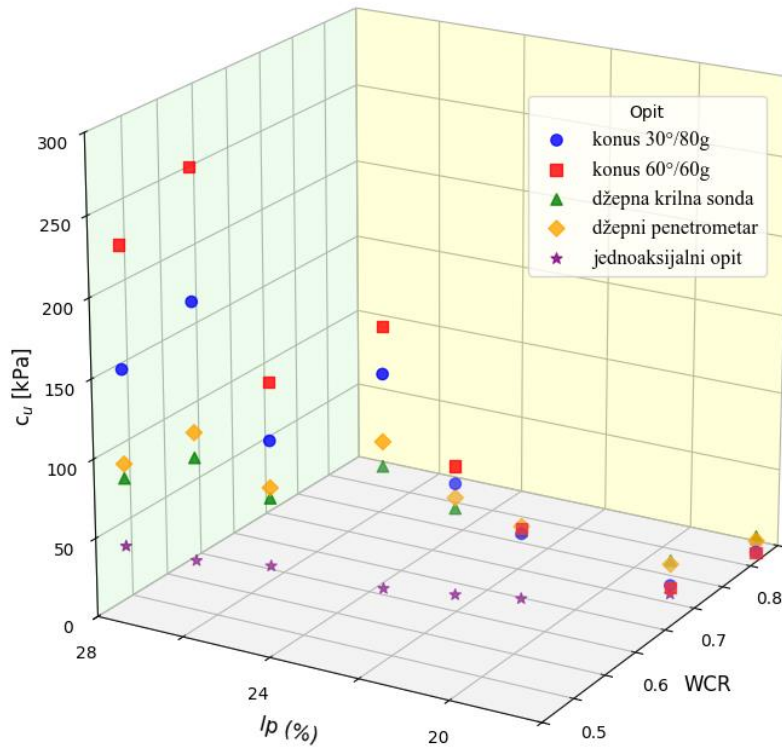
Dodatni regresioni modeli su formirani kako bi se ispitaio pojedinačni i kombinovani uticaj indeksa plastičnosti, zapreminske težine i stepena prekonsolidacije na vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće, pri čemu su ovi parametri najpre analizirani odvojeno, a zatim zajednički, radi izbegavanja preklapanja njihovog efekta i osiguranja jasne interpretacije dobijenih rezultata.

Prvo se razmatra višestruka linearna regresija primenom indeksa plastičnosti ( $I_p$ ), zapreminske težine ( $\gamma$ ) i stepena prekonsolidacije (OCR). Analiza je sprovedena korišćenjem logaritma nedrenirane smičuće čvrstoće ( $\log(c_u)$ ) kao zavisne promenljive i logaritma odnosa sadržaja vlažnosti ( $\log(WCR)$ ) i neke od navedenih nezavisnih promenljivih. Analiza je izvršena u softveru Microsoft Excel primenom standardnog regresionog modula, a u Tabeli 8.3. je dat prikaz primenjene višestruke linearene regresije, dobijenih vrednosti koeficijenta determinacije, konstante (intercept)  $a_0$  i regresioni koeficijenti za svaku promenljivu.

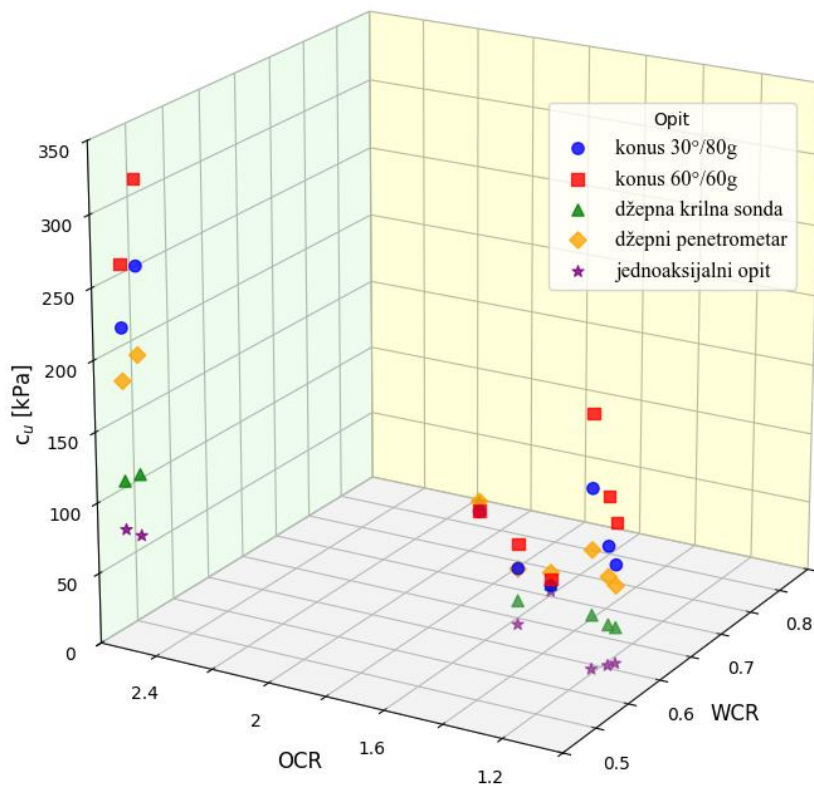
Tabela 8.3. Zbirni prikaz višestruke linearne regresije

	Konus 30°/80g	Konus 60°/60g	Džepna krilna sonda	Džepni penetrometar	Jednoaksijalni opit
<b>Regresija 1:</b>	$\log(c_u) = a_0 + a_1 \cdot \log(WCR) + a_2 \cdot I_p$				
<b>R<sup>2</sup></b>	0.98	0.98	0.91	0.89	0.75
<b>a<sub>0</sub></b>	0.38	-0.02	1.35	1.22	1.09
<b>a<sub>1</sub></b>	-6.70	-6.78	-4.47	-5.05	-3.24
<b>a<sub>2</sub></b>	-0.01	0.01	-0.03	-0.03	-0.02
<b>Regresija 2:</b>	$\log(c_u) = a_0 + a_1 \cdot \log(WCR) + a_2 \cdot OCR$				
<b>R<sup>2</sup></b>	0.98	0.98	0.84	0.87	0.84
<b>a<sub>0</sub></b>	0.13	0.19	0.60	0.57	0.63
<b>a<sub>1</sub></b>	-6.63	-6.87	-4.05	-4.70	-2.89
<b>a<sub>2</sub></b>	0.05	0.03	0.06	0.08	0.12
<b>Regresija 3:</b>	$\log(c_u) = a_0 + a_1 \cdot \log(WCR) + a_2 \cdot \gamma$				
<b>R<sup>2</sup></b>	0.98	0.98	0.85	0.86	0.76
<b>a<sub>0</sub></b>	-0.02	-1.61	2.74	2.35	-0.55
<b>a<sub>1</sub></b>	-6.64	-6.75	-4.40	-4.92	-2.03
<b>a<sub>2</sub></b>	0.01	0.09	-0.11	-0.09	0.08

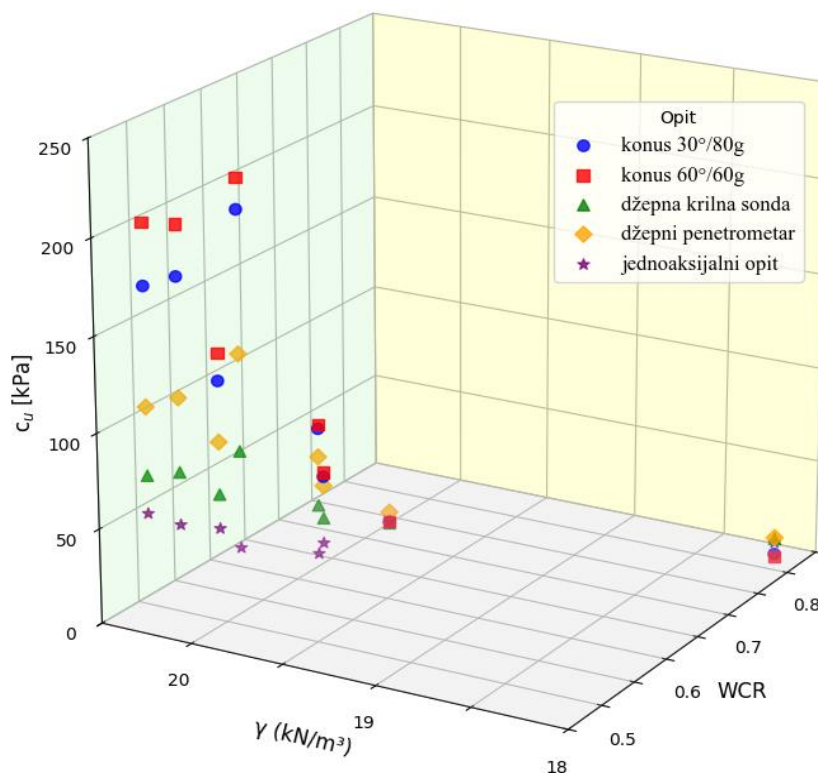
U cilju vizuelne interpretacije dobijenih rezultata višestruke linearne regresije, na sledećim Slikama 8.3. – 8.5. prikazani su odgovarajući regresioni modeli za indeks plastičnosti, stepen prekonsolidacije i zapreminsku težinu. Svi modeli pokazuju jasno na slikama da nedrenirana smičuća čvrstoća raste sa porastom indeksa plastičnosti, stepena prekonsolidacije i zapreminske težine, ali da osnovni uticaj ima odnos sadržaja vode, jer ako je on manji uticaće na smanjenje nedrenirane smičuće čvrstoće.



Slika 8.3. Regresioni model za indeks plastičnosti  $I_p$



Slika 8.4. Regresioni model za stepen prekonsolidacije OCR



Slika 8.5. Regresioni model za zapreminsku težinu  $\gamma$

Rezultati sprovedene regresione analize ukazuju na izrazito stabilan odnos između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vlažnosti (WCR), nezavisno od primenjene laboratorijske metode ispitivanja, što je i jednostavnom regresijom dokazano. Kod svih razmatranih modela, koeficijent  $a_1$  uz  $\log(\text{WCR})$  zadržava sličnu vrednost  $\pm 2$ , sem kod jednoosijalnog gde je duplo manji u odnosu na opit padajućeg konusa. Kod konusa je oko -6.63 do -6.87, kod džepne krilne sonde i džepnog penetrometra je oko -4.05 do -5.05 i kod jednoosijalca od -2.03 do -3.24. Ovo samo potvrđuje teoriju da voda igra najbitniju ulogu u veličini nedrenirane smičuće čvrstoće i da se sa njenim povećavanjem ona smanjuje. Uvođenje dodatnih promenljivih, kao što su indeks plastičnosti ( $I_p$ ), zapreminska težina ( $\gamma$ ) i stepen prekonsolidacije (OCR) imalo je za cilj da objasni uočene razlike u presečnim vrednostima regresionih krivih između pojedinačnih uzoraka i metoda ispitivanja.

Indeks plastičnosti se pokazao kao značajnija promenljiva u odnosu na druge dve, jer je kod opita džepnog penetrometra i džepne krilne sonde uticala na povećanje koeficijenta determinacije, a samim tim i na stabilnost regresionih koeficijenata. Opit padajućeg konusa u većoj meri “normalizuje” ponašanje različitih materijala kroz geometriju i težinu konusa, dok džepna krilna sonda i penetrometar direktnije reflektuju razlike u strukturi i plastičnosti tla. Kod padajućeg konusa, za oba tipa konusa – 30°/80g i 60°/60g, uključivanje zapreminske težine dovelo je do blagog poboljšanja koeficijenta determinacije. Njen regresioni koeficijent ( $a_2$ ) je ostao relativno mali. Ovo ukazuje na to da zapreminska težina može delimično uticati na apsolutne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, ali ne menja osnovni trend koji je zavisn od odnosa vlažnosti i granice tečenja (WCR). Kod džepne krilne sonde i džepnog penetrometra koeficijent  $a_2$  je negativan (-0.1) i stoga nije pouzdan prilikom uvođenja u regresionu analizu. Kod modela koji uključuju stepen prekonsolidacije (OCR), primećen je konzistentan i fizički smislen znak regresionog koeficijenta za sve metode ispitivanja (0.03-0.12). Međutim, apsolutne vrednosti koeficijenta ostaju niske, što ukazuje da, iako

stepen prekonsolidacije ima teorijski značajnu ulogu u razvoju čvrstoće smicanja glinovitih tla, njegov uticaj u ovim laboratorijskim modelima ostaje sekundaran u odnosu na promene vlažnosti. Zbog toga je uticaj stepena prekonsolidacije dodatno razmotren kroz analizu podataka dobijenih opitima statičke penetracije (CPT), koji obuhvataju veći broj podataka zapreminske težine i naponskog stanja in situ.

Uporedna analiza svih razmatranih modela jasno pokazuje da nijedan pojedinačni prošireni model ne može biti univerzalno primenjen za sve metode ispitivanja. Umesto toga, rezultati potvrđuju hijerarhiju uticaja pojedinih parametara. U ovim modelima odnos sadržaja vlažnosti predstavlja primarni kontrolni faktor, dok zapreminska težina, OCR i indeks plastičnosti imaju sekundarnu ulogu koja zavisi od primenjene metode. Ovakav zaključak je u saglasnosti sa savremenim pristupima u geotehničkoj praksi, gde se jednostavni, fizički utemeljeni modeli preferiraju u odnosu na složene statističke izraze (Padmini i sar., 2008; Kanungo i sar., 2014; Elsayy i sar., 2022; Dimgba i sar., 2023). Višestruka linerana regresija potvrđuje da se empirijske korelacije između nedrenirane smičuće čvrstoće i odnosa sadržaja vode (WCR) mogu značajno unaprediti pravilnim izborom dodatnih parametara. Primena modela mora biti ograničena na jasno definisane uslove i metode ispitivanja. Prikazani rezultati podržavaju upotrebu jednostavne regresije unutar uzoraka i pravljenje višestrukih modela kao dodatnu i efikasnu analizu laboratorijskih podataka sa ponovljenim merenjima.

### 8.2.1. Uticaj stepena prekonsolidacije i zapreminske težine dobijenih iz CPT opita

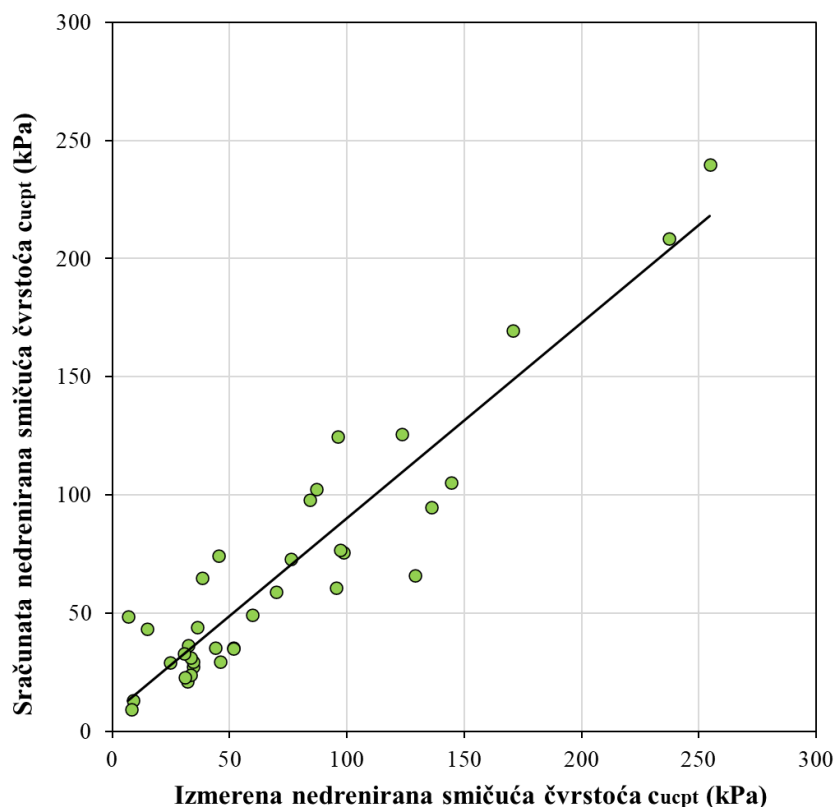
Laboratorijska ispitivanja omogućavaju detaljnu analizu uticaja vlažnosti na nedreniranu smičuću čvrstoću, ali imaju ograničenu mogućnost sagledavanja istorije opterećenja tla. U tom smislu, podaci dobijeni opitima statičke penetracije (CPT) predstavljaju dopunu laboratorijskim rezultatima, jer omogućavaju ispitivanje uticaja stepena prekonsolidacije u in situ uslovima, uz očuvanu strukturu tla i realnu raspodelu efektivnih napona. Za potrebe kvantifikacije ovog uticaja primenjena je višestruka linearna regresiona analiza u logaritamskom prostoru, definisana izrazom:

$$\log(c_u^{cpt}) = a_0 + a_1 \cdot \log(OCR^{cpt}) + a_2 \cdot \gamma^{cpt} \quad (8.6)$$

Dobijeni koeficijent determinacije iznosi  $R^2 = 0.70$ , pri čemu konstanta modela iznosi  $a_0 = -0.719$ , a regresioni koeficijenti za stepen prekonsolidacije i zapreminsku težinu iznose  $a_1 = 0.335$  i  $a_2 = 0.128$ .

$$\log(c_u^{cpt}) = -0.719 + 0.335 \cdot \log(OCR^{cpt}) + 0.128 \cdot \gamma^{cpt} \quad (8.7)$$

Nezavisne promenljive nisu visoke. Relativno umerene vrednosti regresionih koeficijenata ukazuju na to da OCR i zapreminska težina imaju sekundarni, ali fizički smislen uticaj na nedreniranu smičuću čvrstoću u okviru CPT podataka. Pouzdanost dobijenog modela dodatno je proverena vizuelnim poređenjem izmerenih i sračunatih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće (na osnovu dobijene jednacine 8.7), prikazanim na Slici 8.6.

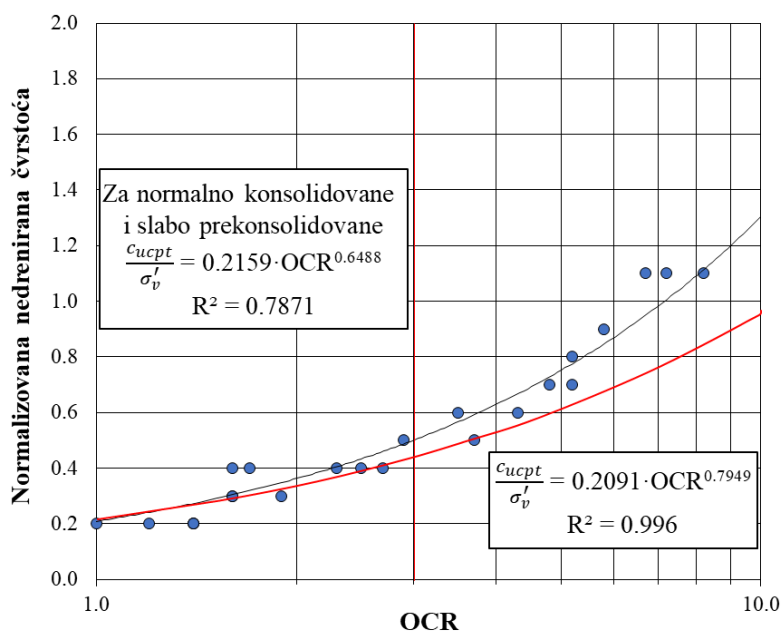


Slika 8.6. Poređenje izmerenih i sračunatih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće

Uporedna analiza laboratorijskih i *in situ* modela jasno pokazuje da laboratorijski opiti pružaju pouzdanu osnovu za razumevanje fundamentalne zavisnosti između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće, dok CPT podaci omogućavaju proširenje ovog okvira na realne terenske uslove, u kojima stepen prekonsolidacije i zapreminska težina imaju izraženiji uticaj. Ova dva pristupa nam omogućavaju sveobuhvatnu i fizički utemeljenu procenu nedrenirane smičuće čvrstoće tla.

### 8.3. Primena SHANSEP modela

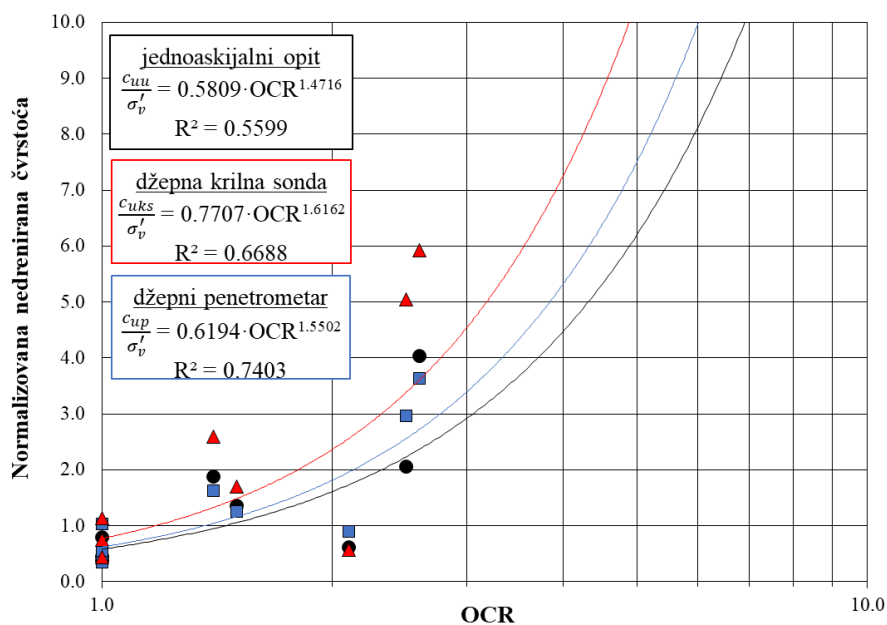
U ovom delu istraživanja primenjena je SHANSEP metodologija. Metoda se pokazala kao pouzdana osnova za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće glinovitih sedimenata u zavisnosti od stepena prekonsolidacije OCR (Ladd i Foote, 1974; Karlsrud i Hernandez-Martinez, 2013; Stróżyk i Tankiewicz, 2014; Youssouf i sar., 2020). Pošto rezultati CPT opita pružaju kontinuirane *in situ* podatke i omogućavaju stabilnu procenu odnosa normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće i OCR-a, isti su primenjeni za ovaj model. Na osnovu ovih podataka formirane su dve krive (crvenom bojom je obeležena kriva sa podacima gde je OCR do 3, a sivom gde je OCR do 10) prema jednačini 2.23. i određeni su parametri  $s$  i  $m$  (Slika 8.7.).



Slika 8.7. Primena empirijskog SHANSEP modela na CPT podatke

Rezultati su pokazali visoku korelaciju sa parametrima  $s = 0.21$  i  $m = 0.79$  za OCR do 10, a za OCR do 3 koji obuhvata normalno konsolidovane i slabo prekonsolidovane materijale parametar  $s$  je isti, a  $m$  je manji i iznosi 0.65. Prema Ladd i Foote (1974), Amin i sar. (1992), Roy i Singh (2008) tipične vrednosti parametra  $m$  za glinovite sedimente kreću se u intervalu od 0.8 od 1.0, dok je parametar  $s$  obično u rasponu od 0.2 do 0.3. Prema ovim istraživanjima parametar  $m$  mora da bude manji od 0.8 kako bi jednakost ukazala na to da se radi o normalno konsolidovanom do slabo prekonsolidovanom tlu. U Tabeli 2.3. su izdvojene još neke literaturne vrednosti parametara  $s$  i  $m$ .

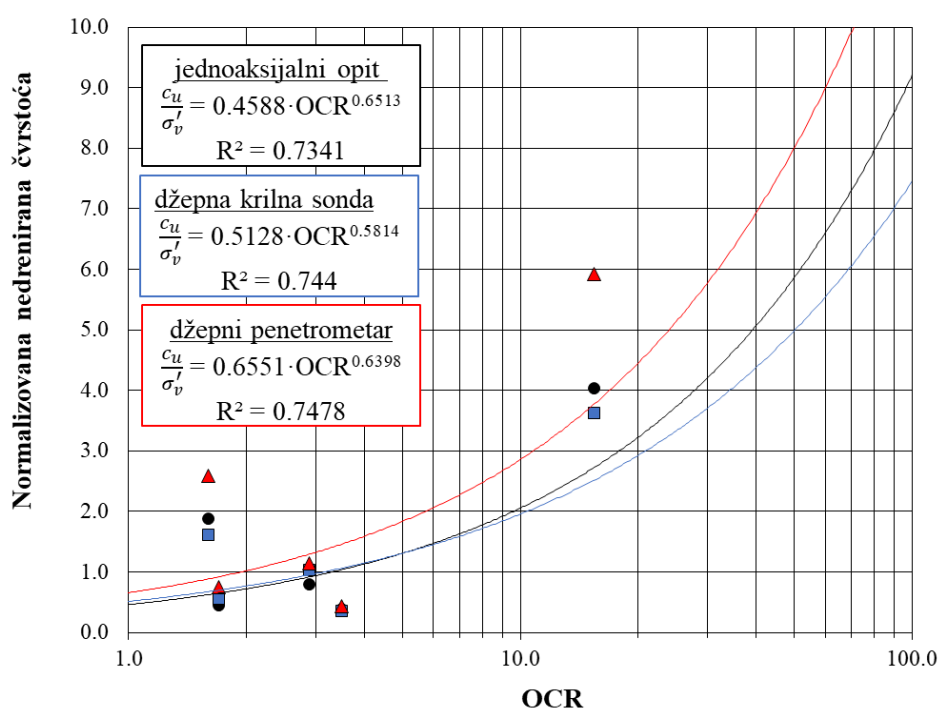
Isti postupak je primenjen na laboratorijske rezultate jednoaksijalnog opita, džepne krilne sonde i džepnog penetrometra (Slika 8.8.). Opit padajućeg konusa nije razmatran jer su vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće skoro duplo veće.



Slika 8.8. Primena empirijskog SHANSEP modela na podatke dobijene opitom jednoaksijalne kompresije, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom

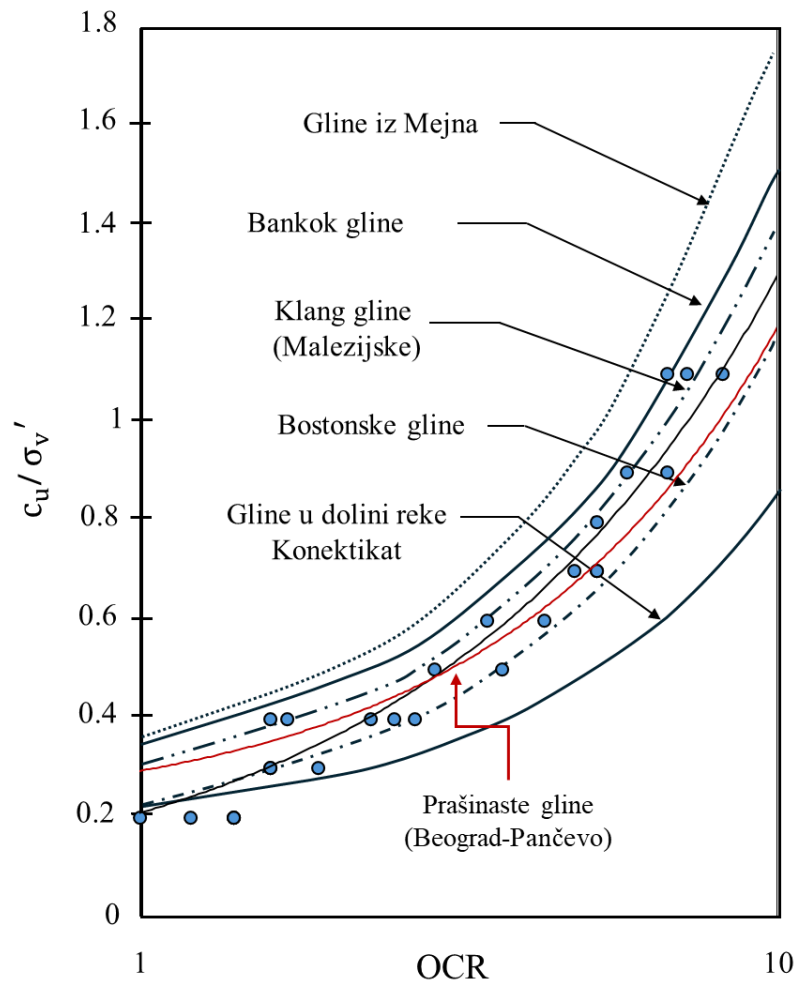
Podaci dobijeni jednoosijalnim opitom pokazali su nižu korelaciju sa koeficijentom determinacije od  $R^2 = 0.56$  i parametrima  $s = 0.57$  i  $m = 1.48$ , a druge dve metode pokazuju veći koeficijent determinacije ali i veće parametre  $s$  i  $m$ . Parametri su jako visoki, što ne odgovara literaturnim podacima (Ladd, 1991; Strózyk i Tankiewicz, 2014; D'Ignazio i sar. 2021). Nooteboom (2023) u studiji o mekim glinama navodi da laboratorijski podaci često odstupaju zbog poremećaja uzoraka i složenog načina dreniranja tokom izvođenja opita. Takođe smatra da su dobijene razlike odraz primene različitih metoda i uslova ispitivanja, što se može pripisati i ovim ispitivanjima.

Prilikom primene jednoosijalnog opita, džepne krilne sonde i džepnog penetrometra, laboratorijski rezultati dobijeni za odnos nedrenirane smičuće čvrstoće i efektivnih vertikalnih napona su mnogo veći nego kod podataka koji su dobijeni terenskim CPT opitom. Zbog toga je razmatrana kombinovana analiza. U tom slučaju vrednosti stepena prekonsolidacije OCR-a su usvojene iz opita statičke penetracije, dok su ostali potrebni parametri za analizu usvojeni iz laboratorijskih opita (Slika 8.9.).



Slika 8.9. Kombinovana analiza

Podaci dobijeni kombinacijom terenskih i laboratorijskih podataka pokazali su nešto veću korelaciju u odnosu na klasičnu laboratorijsku primenu. Koeficijent doterminacije je  $R^2 = 0.7$  za sve tri metode, a vrednosti parametara su:  $s = 0.46; 0.51; 0.65$  i  $m = 0.65; 0.58; 0.64$  (ispisan redom koji je prikazan i na Slici 8.9.). U odnosu na klasičnu primenu laboratorijskih opita može se reći da su parametri niži, gde je parametar  $m$  skoro duplo manji, što nam ukazuje na to da unos svakog parametra veoma utiče na  $s$  i  $m$ . Prema Tsuchida (1999) bitno je odabrati pravu metodu računanja napona prekonsolidacije, jer ona najviše utiče na stepen prekonsolidacije i samim tim na parametre  $s$  i  $m$ . Kombinovanom analizom moguće je postići bolji model, ali integracija CPT podataka za primenu SHANSEP modela se pokazala kao najmerodavnija. Model dobijen na osnovu CPT rezultata se poklapa sa tipičnim literaturnim modelima (Slika 8.10.).



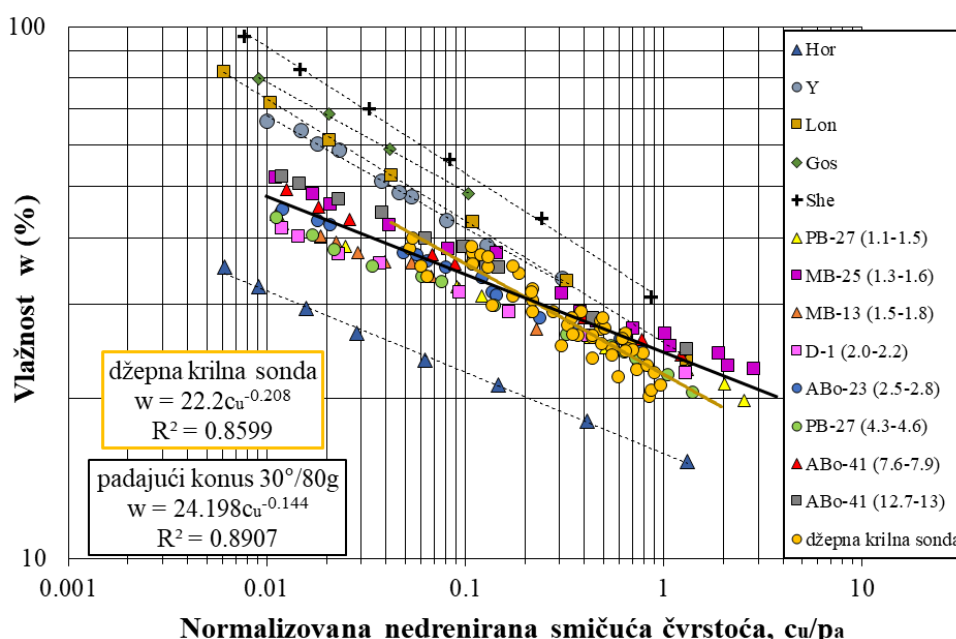
Slika 8.10. Integracija novog modela u postojeće (Amin i sar., 1992 – dopunjeno od Đurić., T.)

## 9. VERIFIKACIJA DOBIJENIH REZULTATA

Verifikacija dobijenih rezultata izvršena je kroz kvantitativnu statističku analizu, poređenjem sa relevantnim empirijskim korelacijama iz savremene literature i analizom odstupanja između pojedinih metoda ispitivanja. Na taj način omogućeno je sagledavanje pouzdanosti i primenljivosti pojedinih metoda za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće u inženjerskoj praksi.

### 9.1. Verifikacija dobijenih korelacija u zavisnosti od vlažnosti

U cilju provere pouzdanosti dobijenih korelacionih zavisnosti između nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti izvršeno je poređenje sa rezultatima koje su dobili Koumoto i Houlsby (2001). Budući da je broj radova koji se bave ovom vrstom korelacije relativno ograničen, a njihov rad predstavlja jedno od najčešće citiranih istraživanja u ovoj oblasti, izabran je kao relevantan za ovu vrstu verifikacije. Na Slici 9.1. prikazan je dijagram objedinjenih podataka.



Slika 9.1. Odnos vlažnosti i normalizovane nedrenirane smičuće čvrstoće

Uzorci označeni sa: Y, Lon, She, Gos i Hor su istraženi od strane Koumoto i Houlsbyja (2001), dok se ostali odnose na rezultate koji su urađeni u okviru ove disertacije. Literaturni podaci obuhvataju materijale čija granica tečenja široko varira od 30 do 97 a indeks plastičnosti od 14 do 65, dok su se vrednosti granice tečenja za ispitivane uzorke kretale u intervalu od  $w_L = 40-50$  %, a indeks plastičnosti je u opsegu od  $I_p = 18-27$  %. Koeficijent  $a$  se kreće od 15.753 do 30.653, a  $b$  od -0.153 do 0.238, dok su vrednosti ovih istraživanja istaknuti na dijagramu. Slaganje rezultata sa literaturom je dobro i u opsegu datih vrednosti. S obzirom na to da ispitivani uzorci pripadaju grupi sličnih karakteristika, analiza je izvršena na objedinjenoj bazi podataka, na osnovu koje je definisana jedinstvena korelaciona zavisnost oblika:

$$\text{Za padajući konus } 30^\circ/80\text{g:} \quad w = 24.198 \cdot (c_u/p_a)^{-0.144} \quad (9.1)$$

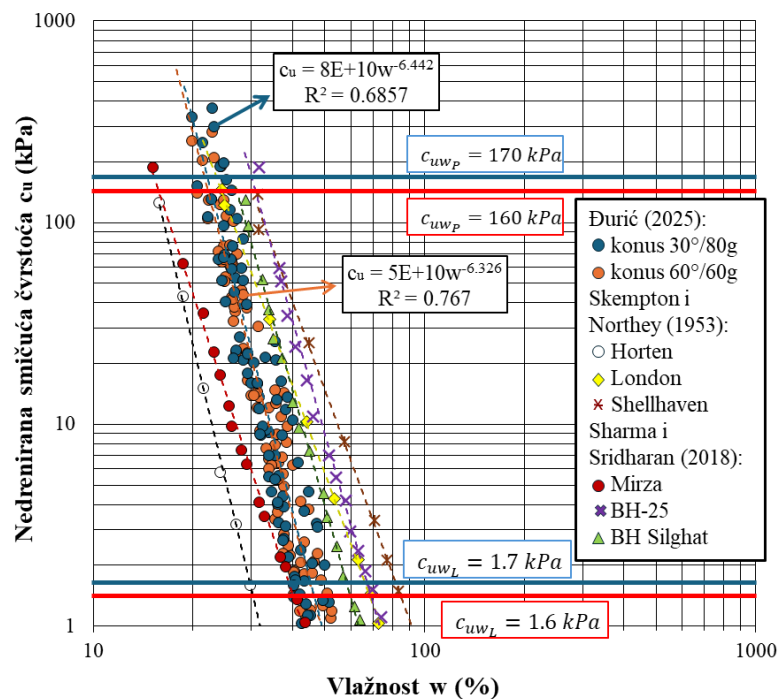
$$\text{Za džepnu krilnu sondu:} \quad w = 22.2 \cdot (c_u/p_a)^{-0.208} \quad (9.2)$$

Gde je  $p_a$  atmosferski pritisak (100 kPa).

Oblik ovako prikazane jednačine je usvojen u Poglavlju 2, prema Jednačini 2.6. Koeficijenti determinacije su visoki. Za padajući konus 30°/80g  $R^2$  iznosi 0.89, a za džepnu krilnu sondu  $R^2$  iznosi 0.86 i ukazuju na jaku korelaciju.

Ovako definisan odnos između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće u skladu je sa opšte prihvaćenim ponašanjem sitnozrnog tla i predstavlja osnovu za verifikaciju dobijenih korelacionih zavisnosti. U literaturi je pokazano da se zavisnost između vlažnosti i nedrenirane smičuće čvrstoće može aproksimirati različitim empirijskim relacijama (Koumoto i Houlsby, 2001; O’Kelly 2013; D’Ignazio i sar., 2016; Lemos i Pires, 2017;). Najčešće se koriste logaritamske, eksponencijalne ili potencijske relacije, što je u saglasnosti sa oblikom korelacija koje su dobijene ovim istraživanjima.

Sharma i Sridharan (2018) su uzimali u obzir da je nedrenirana čvrstoća na granici tečenja 1.7 kPa, a na granici plastičnosti 170 kPa. U ovim istraživanjima nedrenirana čvrstoća je računata prema standardu SRPS EN ISO 17892-6, gde su vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće 1.57 kPa i 1.59 kPa za konus 30°/80g i 60°/60g. Kako bi vrednosti nedrenirane čvrstoće za oba konusa na granici tečenja bile jednake, za konus tipa 30°/80g korišćena je vrednost od 0.81 za konstatu c. Tako je nedrenirana smičuća čvrstoća na granici tečenja za oba tipa konusa 1.59 kPa. Na osnovu toga predložene su vrednosti za nedreniranu smičuću čvrstoću na granici tečenja od  $c_{uwL} = 1.6$  kPa i na granici plastičnosti  $c_{uwP} = 160$  kPa. Na Slici 9.2. je prikazan odnos vlažnosti  $w$  i nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  koji obuhvata rezultate dobijene ovim istraživanjima kao i podatke iz literature (Skempton i Northey, 1953; Sharma i Sridharan 2018).



Slika 9.2. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće tla i vlažnosti

Na osnovu prikazanih podataka uočava se dobar stepen slaganja eksperimentalnih rezultata sa literaturnim vrednostima, pri čemu linearna zavisnost između logaritma vlažnosti i logaritma nedrenirane smičuće čvrstoće potvrđuje konzistentnost dobijenih korelacija. Za ispitivane uzorke, ove zavisnosti mogu se izraziti sledećim relacijama:

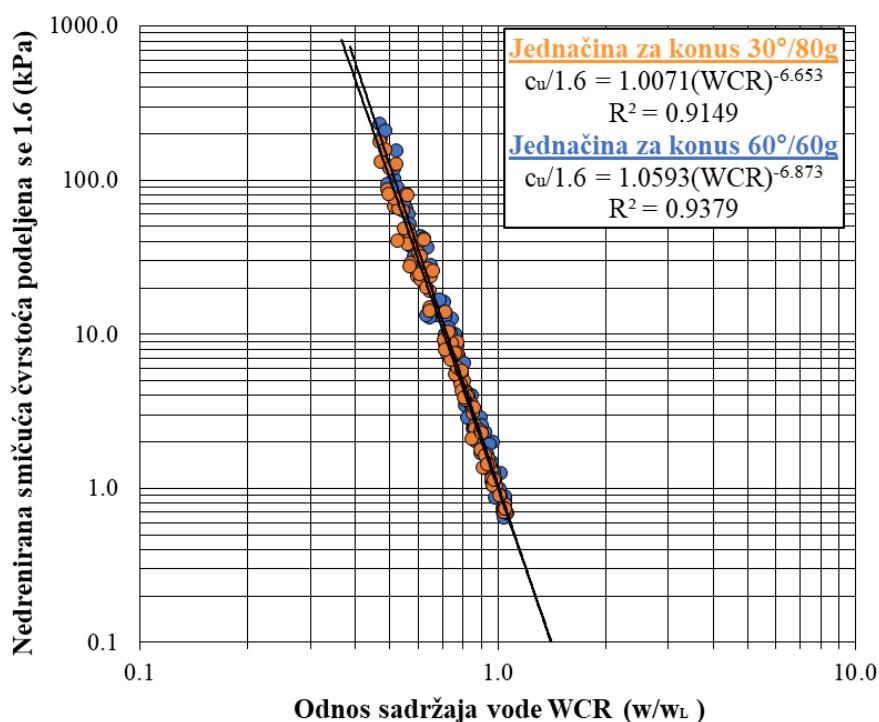
Za konus 30°/80g:

$$\log c_u = \log(5 \cdot 10^{10}) - 6.326 \cdot \log w = 10.7 - 6.326 \cdot \log w \quad (9.3)$$

Za konus 60°/60g:

$$\log c_u = \log(8 \cdot 10^{10}) - 6.442 \cdot \log w = 10.9 - 6.442 \cdot \log w \quad (9.4)$$

U cilju daljeg poređenja rezultata i njihove generalizacije, vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće normalizovane su usvajanjem odnosa prema čvrstoći na granici tečenja od 1.6 kPa, dok je sadržaj vode normalizovan u odnosu na granicu tečenja tla  $w_L$ . Na ovaj način svi rezultati su dovedeni na istu osnovu, parametri su normalizovani, čime je omogućeno direktno poređenje ispitivanih uzoraka nezavisno od apsolutnih vrednosti vlažnosti (Slika 9.3.).



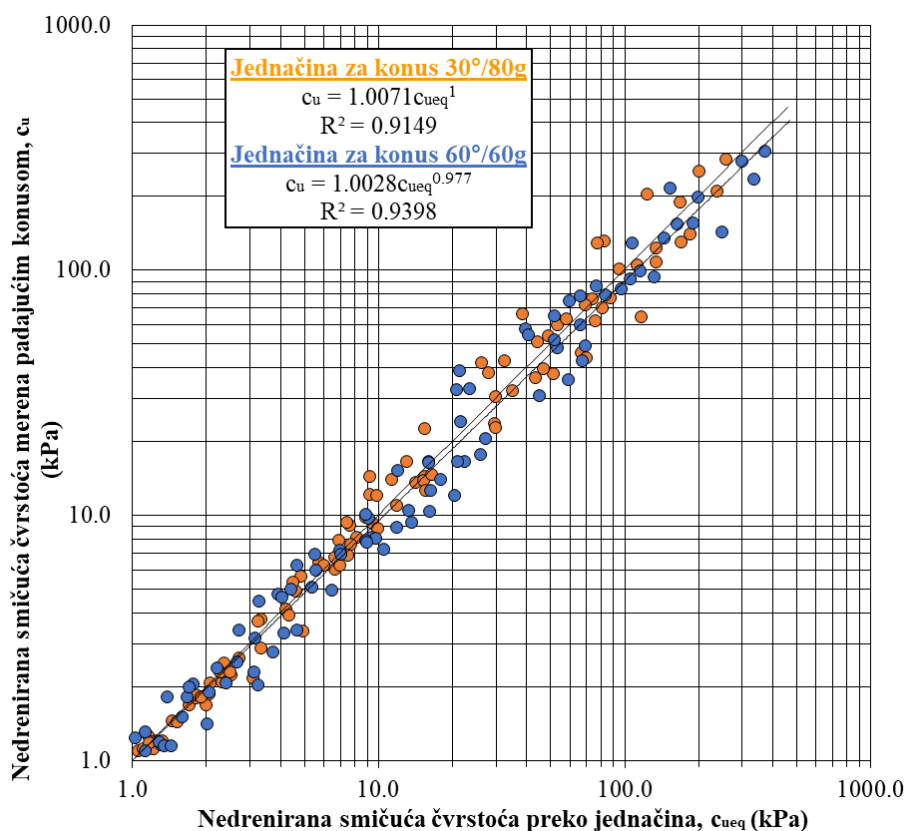
Slika 9.3. Normalizovani odnos nedrenirane smičuće čvrstoće tla i vlažnosti

Za ovu vrstu tla nedrenirana smičuća čvrstoća se može izračunati preko poznate vlažnosti i granice tečenja kao:

$$\text{Za konus } 30^\circ/80\text{g:} \quad c_u = 1.611 \cdot WCR^{-6.653} \quad (9.5)$$

$$\text{Za konus } 60^\circ/60\text{g:} \quad c_u = 1.694 \cdot WCR^{-6.873} \quad (9.6)$$

Visoke vrednosti koeficijenta determinacije za oba tipa konusa potvrđuju pouzdanost dobijenih korelacionih zavisnosti. U cilju provere primenljivosti dobijenih korelacionih zavisnosti za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće na osnovu jednostavno merljivih parametara, izvršeno je poređenje izračunatih vrednosti čvrstoće sa eksperimentalno dobijenim vrednostima opitom padajućeg konusa. Poznavajući granicu tečenja tla i različit sadržaj vode izračunata je nedrenirana smičuća čvrstoća tla na osnovu jednačina 9.5 i 9.6 i zajedno sa dobijenim vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće tla metodom padajućeg konusa (za oba tipa konusa) rezultati su predstavljeni dijagramom (Slika 9.4.).



Slika 9.4. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena metodom padajućeg konusa i računski na osnovu predloženih jednačina

Slika 9.4. pokazuje veoma dobro slaganje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće za oba tipa konusa 30°/80g i 60°/60g dobijena laboratorijskom i empirijskom metodom. Na osnovu priloženih jednačina na samom dijagramu, možemo zaključiti da se nedrenirana smičuća čvrstoća tla za ovakve tipove materijala i na ovim područjima može računati na osnovu jednačina 9.5. i 9.6. Da bi se procenila tačnost predloženih empirijskih modela izračunate su statističke greške (Tabela 9.1.).

Tabela 9.1. Statističke greške za konus 30°/80g i 60°/60g

Tip konusa:	Statističke greške		
	RMSE	MAE	MAPE
<b>Konus 30°/80g</b>	16.81	8.04	15.38
<b>Konus 60°/60g</b>	20.57	9.29	20.38

Rezultati statističke analize ukazuju na razlike u tačnosti predloženog empirijskog modela u zavisnosti od tipa konusa. Za konus 30°/80g dobijene vrednosti grešaka pokazuju umeren nivo saglasnosti između predviđenih i merenih vrednosti, što ukazuje na relativno bolju prediktivnu sposobnost modela. Nasuprot tome, za konus 60°/60g greške su veće i pokazuju da je slabija preciznost i potrebu za dodatnom kalibracijom. Iako modeli pokazuju dobro ponašanje kroz ceo skup uzoraka, veća odstupanja su primećena kod materijala sa nižom prirodnom vlažnošću. Merene vrednosti su dale veću nedreniranu smičuću čvrstoću u odnosu na empirijske vrednosti čvrstoće smicanja, dok je kod uzorka MB-13 (1.5-1.8 m) obrnuto. Ovo odstupanje je opravdano time što je materijal za ovaj uzorak mekan, ima malu čvrstoću i veliku vlažnost. Rezultati potvrđuju da se

empirijske jednačine mogu koristiti za procene nedrenirane smičuće čvrstoće, ali da njihova pouzdanost zavisi od karakteristika tla i pravilnog izbora tipa konusa.

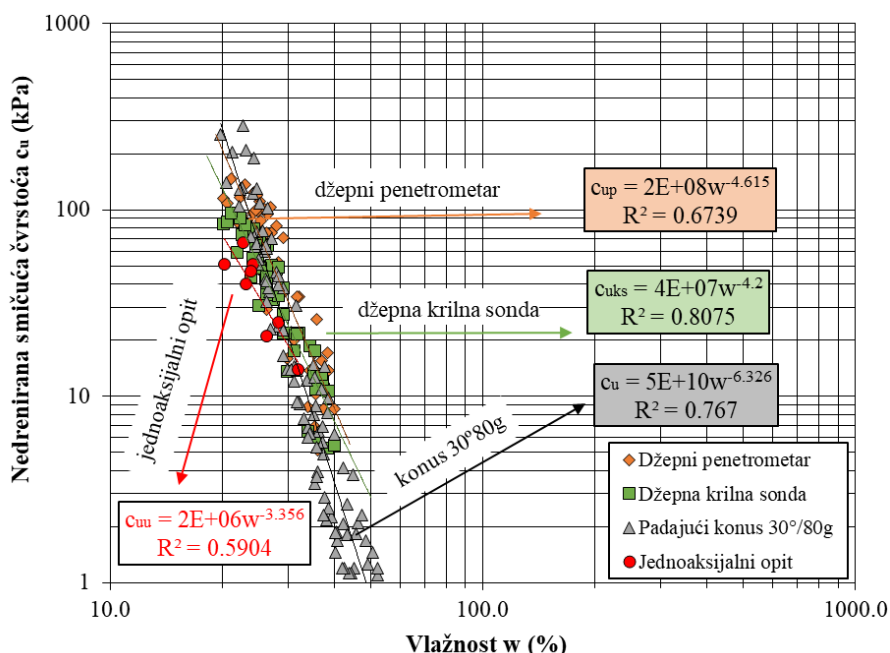
Primenom dobijenih empirijskih korelacija za konus 30°/80g i konus 60°/60g, kao i teorije da je nedrenirana smičuća čvrstoća na granici plastičnosti 100 puta veća u odnosu na nedreniranu smičuću čvrstoću na granici tečenja i ako za karakterističnu vlažnost stavimo vlažnost koja odgovara granici plastičnosti, onda granicu plastičnosti na osnovu nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena metodom padajućeg konusa  $W_{P100}$  možemo izračunati kao:

$$\text{Za konus } 30^\circ/80\text{g:} \quad w_{P100} = 0.5005 \cdot w_L \quad (9.7)$$

$$\text{Za konus } 60^\circ/60\text{g:} \quad w_{P100} = 0.5152 \cdot w_L \quad (9.8)$$

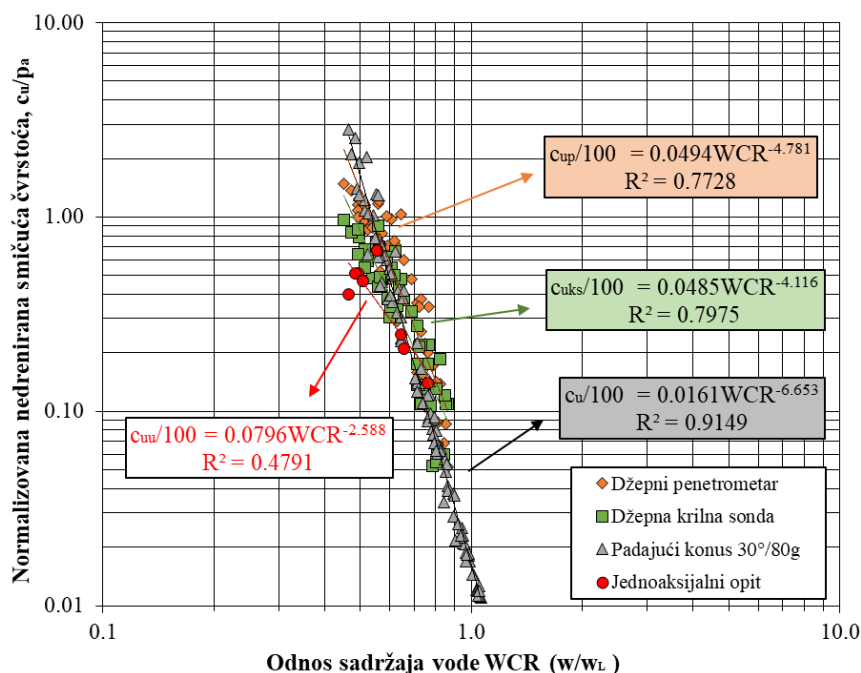
Nešto više o dobijanju granice plastičnosti opitom padajućeg konusa se može naći u dodatku.

Zavisnosti nedrenirane smičuće čvrstoće i vlažnosti dobijene na osnovu četiri različite metode: jednoaksijalni opit, metoda padajućeg konusa, džepna krilna sonda i džepni penetrometar, su prikazane na Slici 9.5.



Slika 9.5. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$  i vlažnosti  $w$  na osnovu različitih opita ispitivanja

Uočljivo je da opit padajućeg konusa ima najstrmiju krivu u odnosu na ostale opite pa se može reći da je ovaj opit najosetljiviji na promenu vlažnosti. Rezultati potvrđuju da izbor opita utiče kako će se interpretirati dobijeni podaci. Na osnovu sprovedene normalizacije, kao i u slučaju poređenja dva tipa konusa, u ovom delu su rezultati dobijeni različitim opitima ispitivanja prikazani na jedinstvenoj osnovi. Nedrenirana smičuća čvrstoća je podeljena sa atmosferskim pritiskom, a vlažnost sa granicom tečenja. Ovo omogućava sagledavanje međusobnih razlika (Slika 9.6.). Uočljivo je da se svi opiti slažu u pogledu opšteg trenda smanjenja čvrstoće sa porastom vlažnosti, ali se intenzitet promene zavisnosti (pada krivih) razlikuje. Poređenje na normalizovanoj osnovi ne samo da potvrđuje konzistentnost trenda, već ističe specifične karakteristike svakog opita u proceni mehaničkog ponašanja tla.



Slika 9.6. Poređenje metoda na osnovu normalizovanih parametara

Koeficijent determinacije za opit padajućeg konusa je vrlo jak, a korelaciona zavisnost koja se dobija je ista kao i u izdvojenoj Jednačini 9.5. Za jednoaksijalni opit koeficijent determinacije je ispod 0.5. Hair i sar. (2010) ovo definišu kao slabu povezanost, ali će se svakako dobijena jednačina koristiti kroz dalju analizu. Regresione jednačine za džepnu krilnu sondu i džepni penetrometar pokazuju visoku matematičku usklađenost podataka. Koeficijent determinacije je za oba opita  $R^2 = 0.77$ , što znači da više od 80% varijacija u merenim vrednostima može da se opiše jednačinama i kao takve pakazuju jaku povezanost. Dobijene jednačine za nedreniranu smičuću čvrstoću su izdvojene u daljem tekstu.

Za jednoaksijalni opit nedrenirana smičuća čvrstoća se računa prema jednačini:

$$c_{uu} = 7.96 \cdot WCR^{-2.588} \quad (9.9)$$

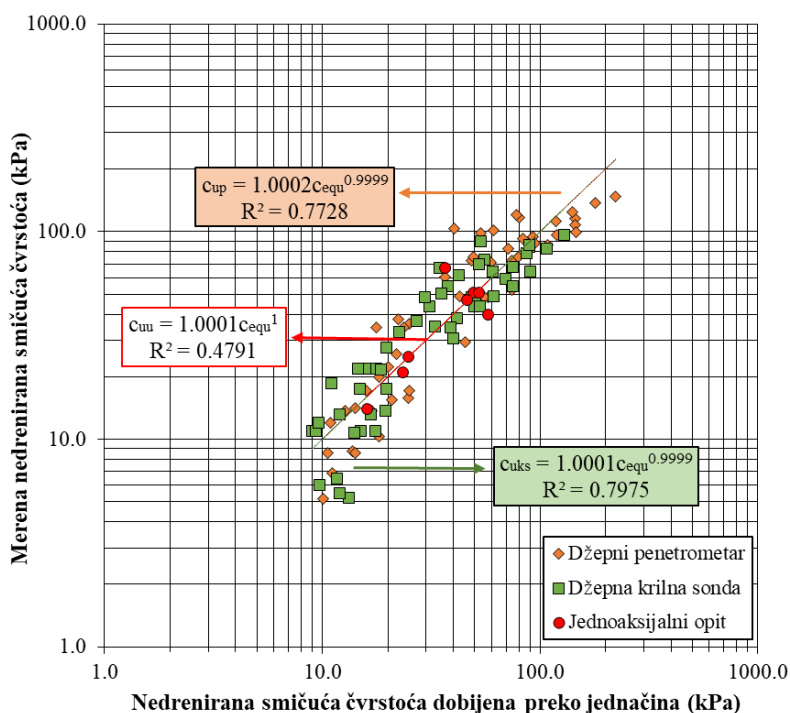
Za opit džepne krilne sonde nedrenirana smičuća čvrstoća se računa prema jednačini:

$$c_{uks} = 4.85 \cdot WCR^{-4.116} \quad (9.10)$$

Za opit džepnog penetrometra nedrenirana smičuća čvrstoća se računa prema jednačini:

$$c_{up} = 4.94 \cdot WCR^{-4.781} \quad (9.11)$$

Nakon sprovedene analize, sledeći korak obuhvata poređenje izračunatih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, dobijenih primenom usvojenih jednačina za jednoaksijalni opit, džepni penetrometar i džepnu krilnu sondu, sa eksperimentalnim rezultatima istih. Rezultati su prikazani na dijagramu (Slika 9.7.), što omogućava sagledavanje odstupanja između teorijski procenjenih i eksperimentalno merenih vrednosti, kao i ocenu pouzdanosti primenjenih korelacionih modela.



Slika 9.7. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće koja je dobijena opitima i računski na osnovu dobijenih jednačina

Može se uočiti dobra saglasnost između rezultata, jer se većina tačaka nalazi blizu linije jednakosti. Najveća korelacija dobijena je za rezultate džepnog penetrometra i džepne krilne sonde, dok je nešto slabija korelacija prisutna kod jednoaksijalnog opita. Pored koeficijenta determinacije izračunate su i statističke greške (Tabela 9.2.).

Tabela 9.2. Statističke greške za konus 30°/80g i 60°/60g

Tip konusa:	Statističke greške		
	RMSE	MAE	MAPE
<i>Jednoaksijalni opit</i>	12.53	7.09	15.64
<i>Džepni penetrometar</i>	23.65	16.56	30.68
<i>Džepna krilna sonda</i>	13.24	9.87	30.57

Iako je kod relacije zasnovane na rezultatima jednoaksijalnog opita dobijen niži koeficijent determinacije ( $R^2 = 0.4791$ ) u odnosu na relacije dobijene na osnovu džepnog penetrometra i džepne krilne sonde, analiza statističkih grešaka pokazuje drugačiji trend. Vrednosti RMSE, MAE i MAPE ukazuju da upravo jednoaksijalni opit ima najmanja odstupanja između merenih i proračunatih vrednosti. Ovo sugeriše da, iako je korelacija slabija u statističkom smislu (niži  $R^2$ ), apsolutne greške procene su manje, odnosno predviđene vrednosti su u proseku bliže merenim vrednostima. Kod jednoaksijalnog opita greške su se javile kod uzoraka sa najmanje dubine PB-27 (1.1-1.5 m) i najveće dubine ABo-41 (12.7-13.0 m), a kod opita džepne krilne sonde i džepnog penetrometra velike razlike se javljaju kod vlažnosti koje su niže od prirodne vlažnosti što drastično utiče na statističke greške. Džepna krilna sonda pokazuje nešto manja apsolutna odstupanja, dok džepni penetrometar ostvaruje nižu procentualnu grešku. Kako je u pitanju umerana korelacija, jednačine treba koristiti za preliminarnu procenu, ali ne kao zamenu za direktna merenja.

### 9.1.1. Verifikacija rezultata primenom programskog jezika Python

Korišćenjem baze podataka (Tabela 9.3.), koja obuhvata osnovne rezultate laboratorijskih ispitivanja na trasi istražnog područja, izračunata je nedrenirana smičuća čvrstoća tla ( $c_u$ ) na osnovu eksperimentalno utvrđenih korelacija (jednačina 9.7 – 9.11). Ovi podaci predstavljaju osnovu za primenu različitih empirijskih izraza i omogućavaju poređenje dobijenih modela sa modelima iz literature. Na taj način obezbeđena je osnova za analizu uzajamne povezanosti odnosa sadržaja vode (WCR) i nedrenirane smičuće čvrstoće ( $c_u$ ), kao i procena primenljivosti postojećih empirijskih modela na materijale obuhvaćene ovom studijom.

Tabela 9.3. Baza podataka korišćena za proveru empirijskih modela

Uzorak (m)	w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	WCR	I <sub>L</sub>	Uzorak (m)	w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	WCR	I <sub>L</sub>
<i>Eolski sedimenti – lesoidne gline</i>													
AB-26 (7.5-7.8)	25.7	39.8	19.9	19.9	0.65	0.29	ABo-26 (3.2-3.5)	24.1	36.6	20.2	16.4	0.66	0.24
AB-25 (6.6-6.9)	30.8	36.4	22.8	13.7	0.85	0.59	ABo-27 (3.5-3.8)	24.3	42.3	21.4	20.9	0.57	0.14
AB-31 (2.5-2.8)	24.1	33.0	21.5	11.4	0.73	0.22	ABo-28 (3.7-4.0)	31.4	47.8	21.4	26.3	0.66	0.38
AB-34 (1.5-4.0)	21.8	44.0	20.2	23.8	0.49	0.07	ABo-28 (11.5-11.8)	30.7	35.5	20.7	14.7	0.87	0.67
AB-37 (4.6-4.9)	24.7	50.0	20.7	29.2	0.49	0.14	ABo-29 (3.5-3.8)	27.3	32.3	20.9	11.4	0.85	0.56
AB-39 (4.5-4.8)	22.6	42.7	17.9	24.9	0.53	0.19	ABo-30 (3.8-4.0)	23.8	36.5	21.6	14.9	0.65	0.15
AB-40 (6.5-6.8)	25.2	35.5	22.5	12.9	0.71	0.21	ABo-31 (5.8-6.0)	32.7	40.9	24.9	16.0	0.80	0.49
AB-41 (6.3-6.6)	23.9	38.0	22.5	15.5	0.63	0.09	ABo-32 (2.3-2.6)	20.9	44.8	19.3	25.4	0.47	0.06
AB-42 (7.0-7.3)	28.4	43.1	22.5	20.6	0.66	0.28	ABo-34 (2.5-2.8)	25.4	36.6	22.6	14.0	0.69	0.20
AB-24 (3.4-3.7)	25.6	46.6	21.2	25.4	0.55	0.17	ABo-36 (8.3-8.6)	24.7	51.2	20.7	30.5	0.48	0.13
AB-26 (3.6-3.9)	22.2	38.7	19.8	18.9	0.57	0.13	ABo-37 (3.3-3.6)	22.5	41.8	18.7	23.1	0.54	0.16
AB-35 (2.7-3.0)	21.3	46.1	21.0	25.1	0.46	0.01	ABo-39 (4.4-4.7)	18.7	27.7	15.2	12.5	0.68	0.28
AB-37 (1.5-4.0)	23.2	43.7	18.9	24.8	0.53	0.17	ABo-39 (8.2-8.6)	25.9	44.2	19.4	24.8	0.59	0.26
AB-38 (4.3-4.6)	21.7	33.4	17.4	16.1	0.65	0.27	ABo-39 (11.2-11.4)	24.4	41.2	22.0	19.1	0.59	0.13
AB-40 (3.4-3.7)	22.8	38.5	22.5	16.0	0.59	0.02	ABo-40 (10.6-10.0)	25.3	49.3	21.4	28.0	0.51	0.14
AB-41 (3.4-3.6)	21.0	34.9	19.5	15.4	0.60	0.10	ABo-41 (4.5-4.8)	22.6	41.8	20.0	21.7	0.54	0.12
AB-43 (2.2-2.5)	21.3	43.1	18.8	24.3	0.49	0.10	ABo-41 (9.7-10.0)	24.0	40.3	20.0	20.3	0.60	0.20
AB-44 (5.7-6.0)	26.7	40.6	17.4	23.3	0.66	0.40	ABo-41 (13.0-13.3)	22.1	40.8	19.3	21.5	0.54	0.13
AB-45 (3.7-4.0)	22.1	33.6	18.4	15.2	0.66	0.25	ABo-42 (5.5-5.8)	22.7	35.9	17.8	18.1	0.63	0.27
ABo-22 (1.7-2.0)	27.9	39.3	22.8	16.5	0.71	0.31	ABo-43 (3.0-3.3)	21.1	34.4	16.6	17.8	0.61	0.25

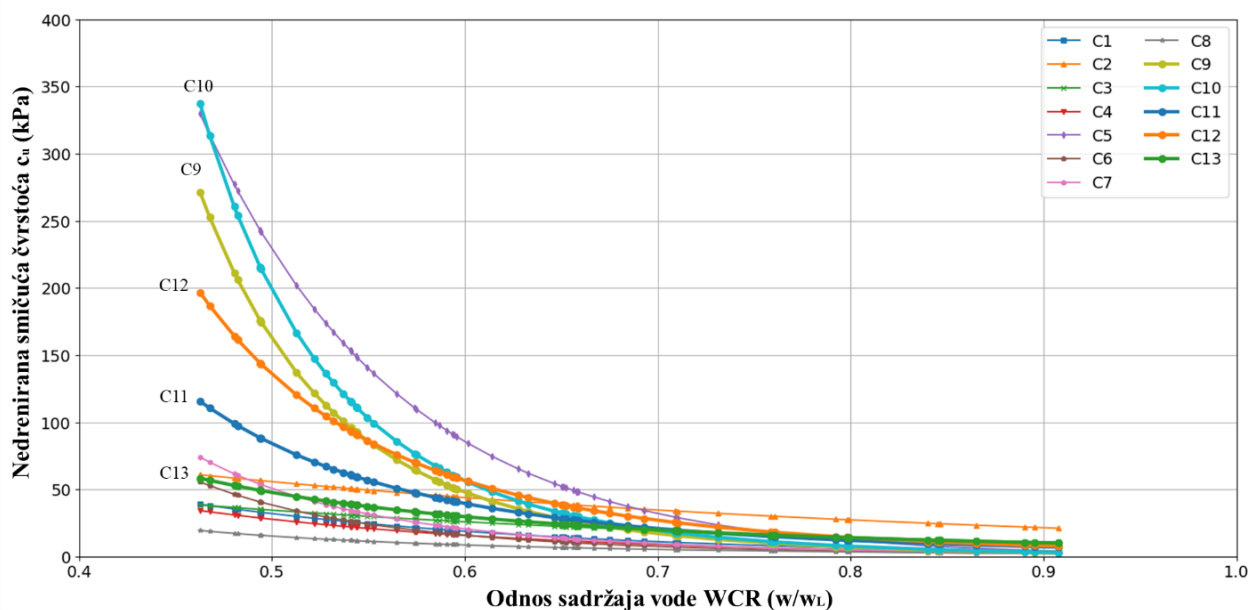
<i>ABo-23</i> (2.7-3.0)	25.1	43.0	23.1	19.9	0.58	0.10	<i>ABo-43</i> (7.5-7.8)	23.7	28.0	17.1	10.9	0.85	0.60
<i>ABo-23</i> (4.6-4.9)	30.1	44.0	21.7	22.3	0.68	0.38	<i>ABo-44</i> (4.2-4.5)	27.5	48.7	21.7	27.0	0.56	0.21
<i>ABo-24</i> (2.5-2.8)	27.8	46.8	23.0	23.8	0.59	0.20	<i>ABp-36</i> (2.5-2.8)	20.6	37.9	19.1	18.8	0.54	0.08
<i>ABo-25</i> (3.0-3.2)	25.9	32.4	21.0	11.4	0.80	0.43	<i>ABp-36</i> (7.2-7.4)	32.0	35.2	24.0	11.2	0.91	0.71
<b>Uzorak</b> (m)	<b>w</b> (%)	<b>w<sub>L</sub></b> (%)	<b>w<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>P</sub></b> (%)	<b>WCR</b>	<b>I<sub>L</sub></b>	<b>Uzorak</b> (m)	<b>w</b> (%)	<b>w<sub>L</sub></b> (%)	<b>w<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>P</sub></b> (%)	<b>WCR</b>	<b>I<sub>L</sub></b>
<i>Aluvijalni sedimenti – Aluvijalne gline</i>													
<i>AB-16</i> (2.7-3.0)	47.1	61.0	30.1	30.9	0.77	0.55	<i>ABo-24</i> (15-15.45)	29.3	37.0	23.0	14.1	0.79	0.45
<i>AB-19</i> (1.6-1.8)	28.0	31.3	23.3	8.0	0.90	0.59	<i>ABo-24</i> (22-22.45)	26.8	35.3	22.3	13.0	0.76	0.35
<i>AB-20</i> (5.4-5.8)	37.4	44.5	29.6	14.9	0.84	0.52	<i>ABo-41</i> (21.0-21.4)	22.0	33.0	21.8	11.2	0.67	0.01
<i>AB-21</i> (1.0-1.3)	29.7	33.4	19.1	14.3	0.89	0.74	<i>ABo-43</i> (29.0-29.3)	27.7	50.8	22.2	28.6	0.54	0.19
<i>AB-30</i> (7.4-7.5)	26.0	34.2	20.4	13.9	0.76	0.41	<i>ABo-44</i> (28.6-28.9)	31.1	64.7	25.5	39.2	0.48	0.14
<i>AB-39</i> (7.4-7.7)	27.4	52.5	20.8	31.7	0.52	0.21	<i>AB-35</i> (7.0-7.3)	37.3	67.4	25.0	42.4	0.55	0.29

Za ovu analizu korišćen je programski jezik Python, zajedno sa bibliotekama pandas, numpy i matplotlib za obradu podataka i vizualizaciju. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla ( $c_u$ ) izračunata je matematičkim putem pomoću empirijskih izraza u zavisnosti od odnosa sadržaja vode - WCR (Tabela 9.4.).

Tabela 9.4. Empirijske korelacije

Model	Istraživač	Empirijske korelacije
<b>C1</b>	Federico (1983)	$c_u = e^{5.25(1.161-WCR)}$
<b>C2</b>	Lee (2004)	$c_u = 182.93e^{-2.37WCR}$
<b>C3</b>	Berilgen i sar. (2007)	$c_u = 145e^{-2.86WCR}$
<b>C4</b>	Vardanega i Haigh (2014)	$c_u = 10^{2.662 - 2.432WCR}$
<b>C5</b>	Vardanega i sar. (2019)	$c_u = 1.7e^{\left(\frac{1-WCR}{0.102}\right)}$
<b>C6</b>	Kang i sar. (2017)	$c_u = 1.39 \cdot WCR^{-4.79}$
<b>C7</b>	Sharma i Sridharan (2018)	$c_u = 1.7 \cdot WCR^{-4.9}$
<b>C8</b>	Karakan (2023)	$c_u = 1.838 \cdot WCR^{-3.068}$
<b>C9</b>	Đurić (2025)	$c_u = 1.61 \cdot WCR^{-6.653}$
<b>C10</b>	Đurić (2025)	$c_u = 1.69 \cdot WCR^{-6.873}$
<b>C11</b>	Đurić (2025)	$c_{uks} = 4.85 \cdot WCR^{-4.116}$
<b>C12</b>	Đurić (2025)	$c_{up} = 4.94 \cdot WCR^{-4.781}$
<b>C13</b>	Đurić (2025)	$c_{uu} = 7.96 \cdot WCR^{-2.588}$

Dobijeni rezultati prikazani su na Slici 9.8. Ose su podešene tako da dijagram počinje od fizički relevantnih vrednosti ( $WCR \geq 0.4$ ,  $c_u \geq 0$ ). Poznati empirijski modeli iz literature upoređeni su sa modelima koji su dobijeni ovim istraživanjima.

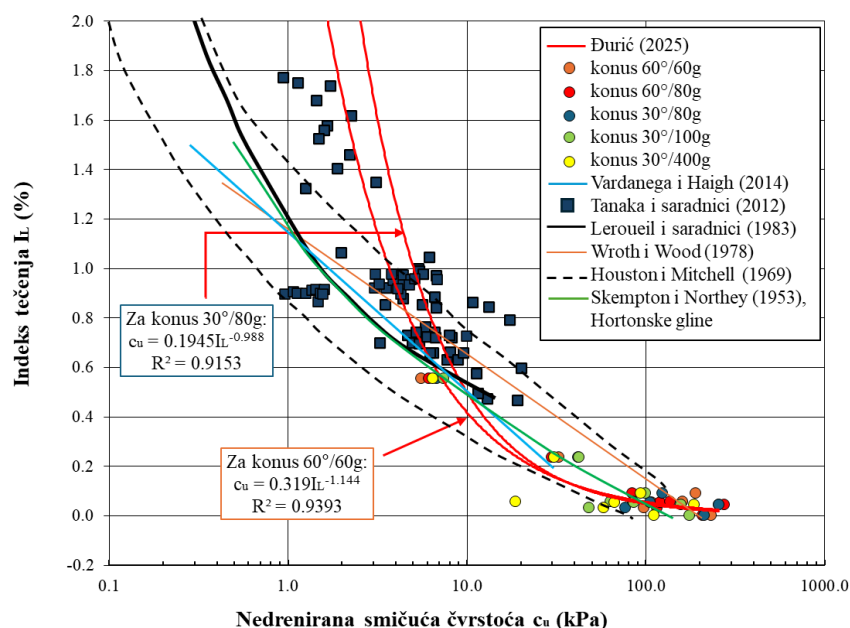


Slika 9.8. Primena različitih empirijskih modela

Posmatranjem svih krivih na dijagramu može se uočiti da modeli pokazuju veoma dobro slaganje pri visokim odnosima sadržaja vlažnosti i kada su nedrenirane čvrstoće niske. Većina literaturnih modela razvijena je za marinske gline ili veoma meka tla sa niskom čvrstoćom i visokim sadržajem vode, što nije slučaj sa materijalima istraženim u okviru ove disertacije. Stoga se svaki model u praksi mora primenjivati sa oprezom, uz prethodnu detaljnu analizu i dobro razumevanje osnovnih faznih svojstava tla. Modeli C9, C10, C11 i C12 se najbolje slažu sa modelom C5 (Vardanega i sar., 2019), dok se model C13 uklapa u sve ostale modele.

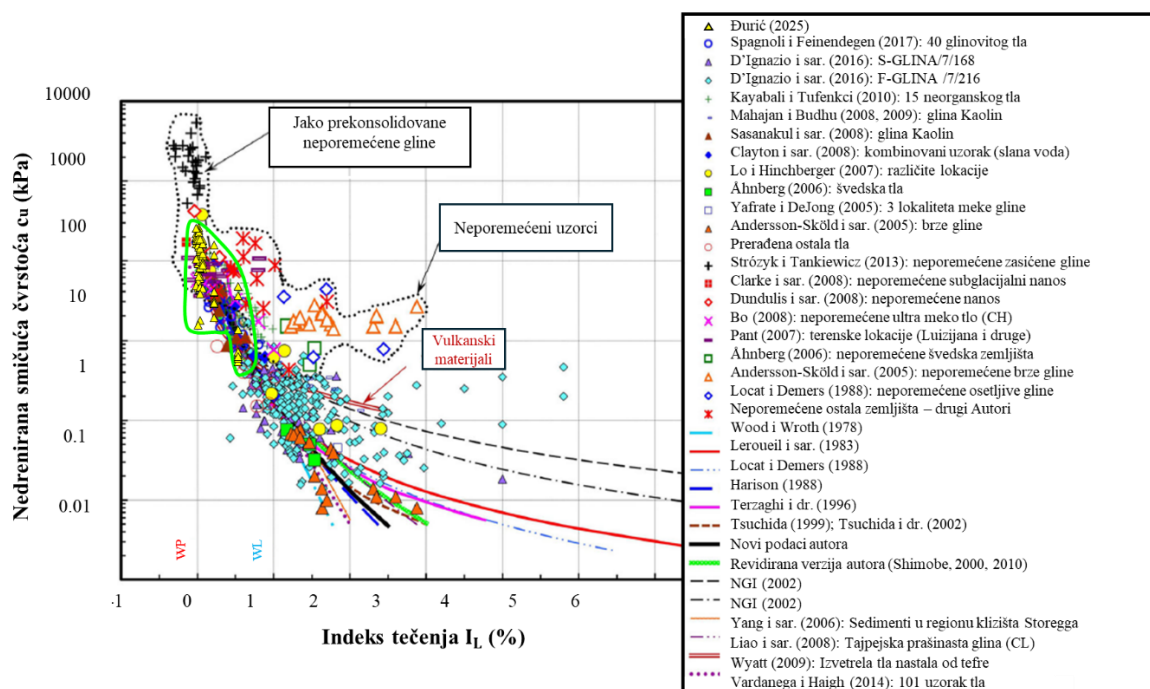
## 9.2. Verifikacija uspostavljenih korelacija između indeksa tečenja i nedrenirane smičuće čvrstoće

Skempton i Northei (1952) su prikazali da postoji linearna veza između nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja za četiri različita tipa glinovitog tla. Wroth (1968) je na osnovu prethodno objavljenih istraživanja Skempton i Northey (1952) uočio da se granica tečenja i granica plastičnosti približno mogu povezati sa određenim vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće i da se one javljaju u odnosu 1:100. Houston i Mitchell (1969) su potvrdili da se nedrenirana čvrstoća smanjuje sa povećanjem indeksa tečenja, ali da se njihova ograničenja uzimaju sa dozom obazrivosti jer se ona odnosi na određena tla sa visokom granicom tečenja. Wroth i Wood (1978) su smatrali da je nedrenirana smičuća čvrstoća 1.7 kPa na granici tečenja, dok na granici plastičnosti dostiže vrednost oko 170 kPa, što su prikazali jednačinom koja je istaknuta u Tabeli 2.3. Leroueil i sar. (1983) pokazali su da nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenih glinovitih materijala ima jasnu korelaciju sa indeksom tečenja  $I_L$ . Njihovi rezultati su korišćeni kao uporedna osnova pri analizi različitih glina, uključujući i Takuhoku gline koje su ispitali Tanaka i sar. (2012). Vardanega i Haigh (2014) su na osnovu analize velike baze podataka vezane za rezultate ispitivanja padajućeg konusa pokazali da se za bilo koje tlo mogu uspostaviti prihvatljive linearne korelacije između nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja. Na Slici 9.9. prikazani su rezultati gde se koristi metoda padajućeg konusa za uzorke tla prirodne vlažnosti. Jednačina dobijanja nedrenirane smičuće čvrstoće je izdvojena na dijagramu za konus 30°/80g i konus 60°/60g u potencijskom obliku. Dobijene zavisnosti pokazuju veoma visok koeficijent determinacije ( $R^2 = 0.9$ ), što ukazuje na jaku korelaciju između indeksa tečenja  $I_L$  i nedrenirane smičuće čvrstoće  $c_u$ .



Slika 9.9. Grupni dijagram odnosa nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja

Na Slici 9.10. su prikazani rezultati ispitivanja zajedno sa analizom velike baze podataka urađene od strane Shimobe i Spagnoli (2020a). Ispitani materijali su u zoni gde su i neporemećeni i prerađeni uzorci. Indeks tečenja se kreće od 0.004 do 0.556, tako da svi ispitani uzorci pripadaju plastičnom stanju konzistencije, što je i razlog dobijenih visokih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće.

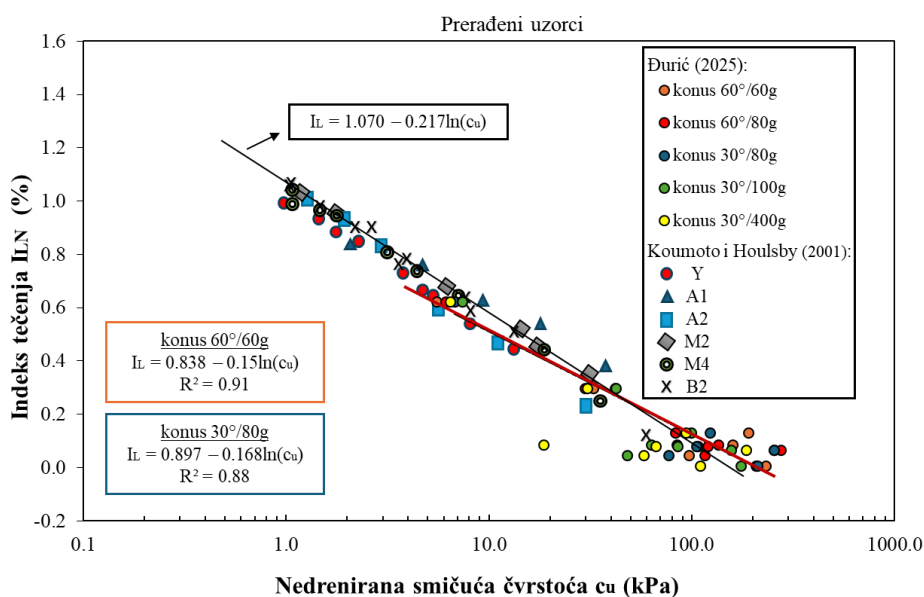


Slika 9.10. Zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i indeksa tečenja (Shimobe i Spagnoli, 2020a – dopunjeno od Đurić, T.)

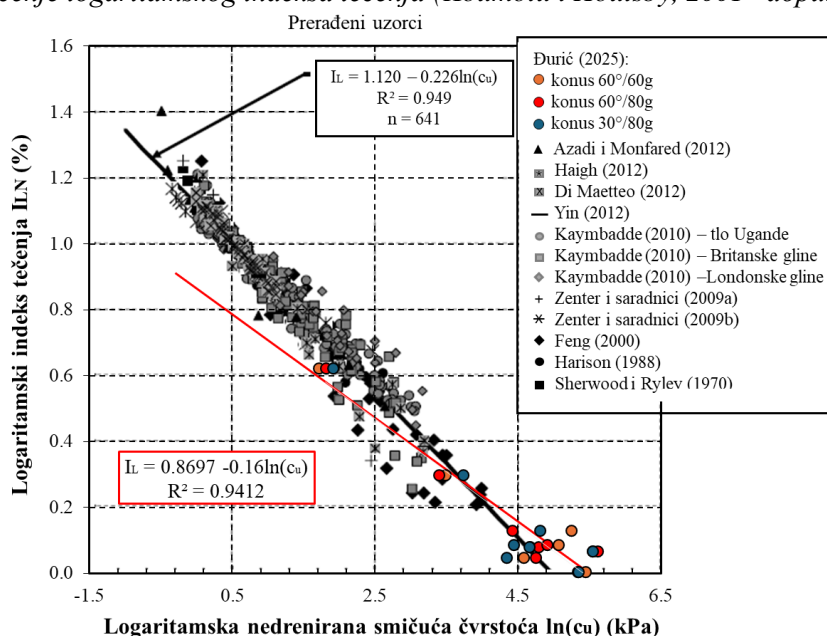
Prema Soltani i O'Kelly (2025), iako indeks tečenja ( $I_L$ ) predstavlja koristan parametar za opis ponašanja prerađenih uzoraka, njegova primena sama po sebi nije dovoljna da objasni sve faktore koji utiču na nedreniranu smičuću čvrstoću ( $c_u$ ). Nedrenirana smičuća čvrstoća može značajno varirati između različitih tipova sitnozrnih tla kada je  $I_L$  približno jednak 0, čak i pri istim vrednostima  $I_L$ .

Zbog toga se preporučuje razvoj višekriterijumskih korelacija  $c_u = f(I_L)$ , koje su prilagođene pojedinim intervalima  $I_L$  i dodatno zasnovane na specifičnim karakteristikama tla, kao što su granulometrijski sastav i koloidalna aktivnost. Na taj način bi se postigle pouzdanije i inženjerski relevantnije jednačine koje bi služile za predviđanje nedrenirane smičuće čvrstoće.

Koumotu i Houslybyju (2001) su uveli i pojam logaritamskog indeksa tečenja koji je ovde računat prema Jednačini 2.21. Pored njih Vardanega i Haigh (2014) su isto analizirali odnos između logaritma nedrenirane smičuće čvrstoće i logaritamskog indeksa tečenja. Iako se apsolutne vrednosti razlikuju u zavisnosti od vrste tla, definisani trendovi omogućavaju pouzdanu procenu nedrenirane smičuće čvrstoće pri prirodnom sadržaju vode, što je u saglasnosti sa rezultatima dobijenim ovim istraživanjima. Na Slici 9.11. je prikazana zavisnost nedrenirane smičuće čvrstoće i logaritamskog indeksa tečenja ( $I_{LN}$ ), a na Slici 9.12 zavisnost logaritma nedrenirane smičuće čvrstoće ( $\ln(c_u)$ ) i logaritamskog indeksa tečenja ( $I_{LN}$ ).



Slika 9.11. Korišćenje logaritamskog indeksa tečenja (Koumoto i Houslyby, 2001– dopunjeno od Đurić, T.)



Slika 9.12. Korišćenje logaritamskog indeksa tečenja i logaritamske nedrenirane smičuće čvrstoće (Vardanega i Haigh, 2014 – dopunjeno od Đurić, T.)

Upotreba logaritamskog indeksa tečenja ne menja se ništa znatno, jer se razlika odnosi samo na prikaz podataka. Ispitivani materijali su drugačijeg konzistentnog stanja u poređenju sa literaturnim, a njihova kriva je istaknuta na Slikama 9.11. i 9.12.

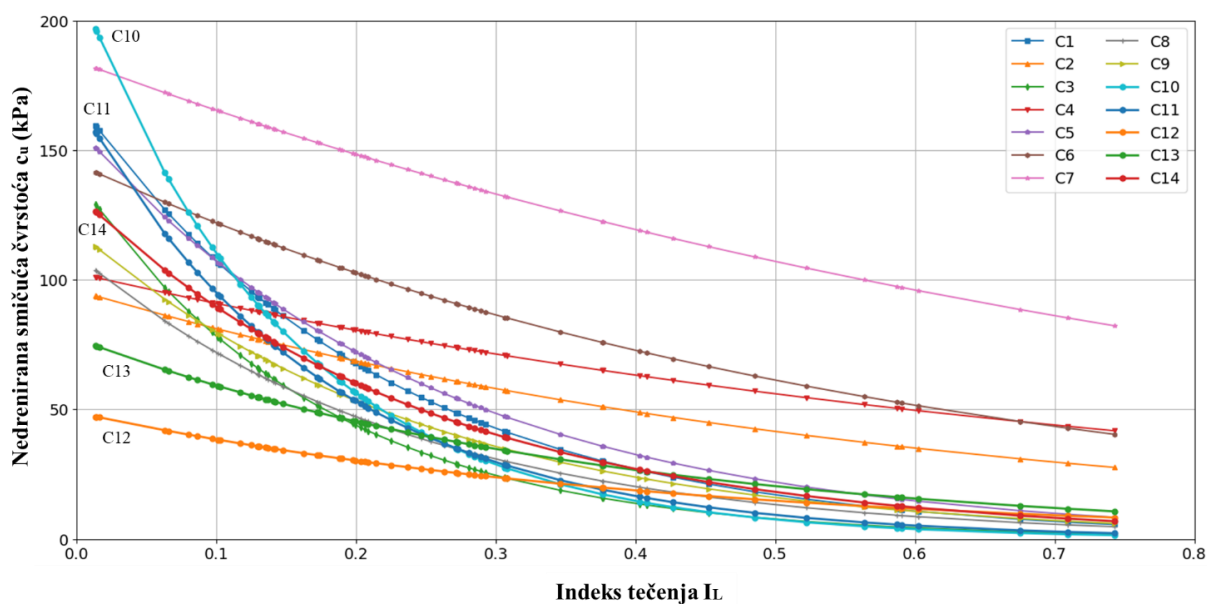
### 9.2.1. Verifikacija rezultata primenom programskog jezika Python

U literaturi postoji veliki broj objavljenih empirijskih korelacija koje su zasnovane na indeksu tečenja. Korišćenjem programskog jezika Python i empirijskih korelacija za indeks tečenja (Tabela 9.5.) sračunata je nedrenirana smičuća čvrstoća tla ( $c_u$ ).

Tabela 9.5. Empirijske korelacije

Model	Istraživač	Empirijske korelacije
C1	Wroth i Wood (1968)	$c_u = 170e^{-4.6I_L}$
C2	Whyte (1982)	$c_u = 1.6e^{4.23(1-I_L)}$
C3	Leroueil i sar. (1992)	$c_u = 140e^{-5.8I_L}$
C4	Yilmaz (2004)	$c_u = 102.63e^{-1.21I_L}$
C5	Yang i dr.(2006)	$c_u = 159.6e^{-3.97I_L}$
C6	Edil i Benson (2009)	$c_u = 144.9e^{-1.72I_L}$
C7	Vinod i sar. (2012)	$c_u = 184.45e^{-1.087I_L}$
C8	Kayabalia i sar. (2015)	$c_u = 96 \cdot 0.187I_L$
C9	Spagnoli i Feinendegen (2017)	$c_u = 119.283e^{-4.020I_L}$
C10	Đurić (2025), konus 60°/60g	$c_u = 216.25 \cdot I_L^{-6.718}$
C11	Đurić (2025), konus 30°/80g	$c_u = 170.26 \cdot I_L^{-5.819}$
C12	Đurić (2025), jednoaksijalc	$c_{uu} = 48.815 \cdot I_L^{-2.387}$
C13	Đurić (2025), džepna krilna sonda	$c_{uks} = 77.341 \cdot I_L^{-2.665}$
C14	Đurić (2025), džepni penetrometar	$c_{up} = 133.54 \cdot I_L^{-3.991}$

Dobijeni rezultati prikazani su na Slici 9.13. Ose su podešene tako da dijagram počinje od fizički relevantnih vrednosti ( $I_L \geq 0$  ( $I_{L\min}=0.01$ ),  $c_u \geq 0$ ).



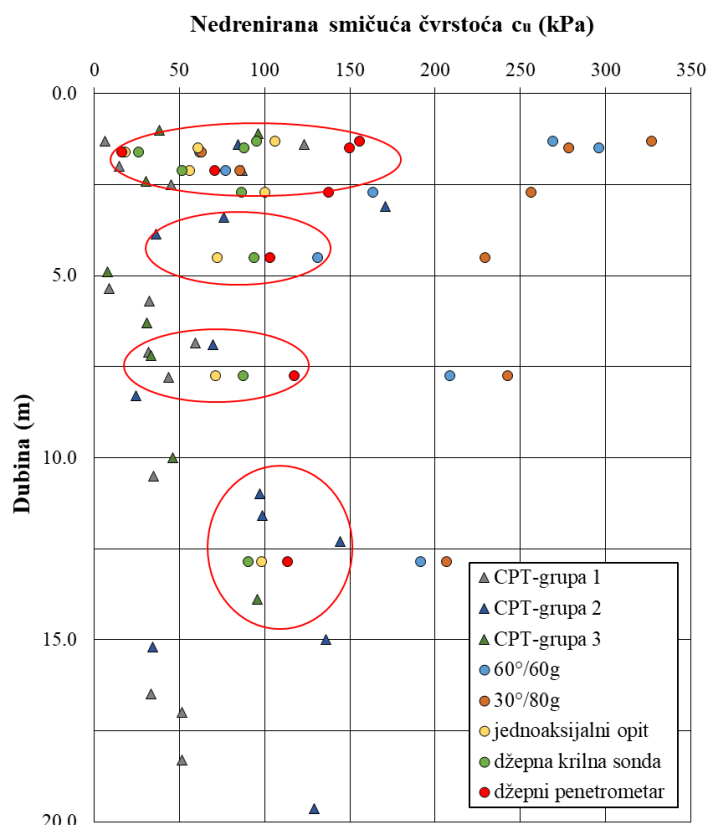
Slika 9.13. Primena različitih empirijskih modela

Svi modeli imaju sličan trend ponašanja. Jedna grupa ima ravniju liniju, dok druga pokazuje nagli rast nedrenirane smičuće čvrstoće. Model Kayabalia i sar. (2015), model C8, je napravljen upotrebom krilne sonde. Kada posmatramo njihov model i model ovih istraživanja napravljen za džepnu krilnu sondu – C13, zapaža se da se njihove putanje poklapaju do  $I_L > 0.2$ , a od  $I_L < 0.2$  njihov model (C8) ima porast dok model C13 ima ravniju putanju. Model C13 ima sličniju putanju kretanja modelima C2, C4, C6. Model C7 (Vinod i sar., 2012) prikazuje mnogo veća odstupanja u odnosu na sve ostale modele i ima izražen linearni oblik, ali je sličan modelu C13 i C12. Model C12 koji je dobijen jednoaksijalnim opitom ima sličan trend ponašanja kao model dobijen krilnom sondom (C13). Model C10, koji je dobijen konusom  $60^\circ/60g$ , daje najviše vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Ovaj model do  $I_L > 0.1$  daje niže vrednost, a od  $I_L < 0.1$  mu kreće nagli rast. Model C14 se veoma dobro uklapa sa C8 i C9 iako su u pitanju različite metode ispitivanja. Da bi se bilo koji model mogao koristiti u praksi, bitno je obratiti pažnju na lokaciju istraživanja tj. litološki sastav i prethodne istorije opterećenja (istorije stvaranja terena) i stepena prekonsolidacije, metodu ispitivanja i granulometrijski sastav. Sve to zajedno utiče na dobijanje korektnih rezultata. Prikazani modeli koji su dobijeni ovim istraživanjima C10 – C14 se mogu primeniti na normalno konsolidovane i slabo prekonsolidovane prašinsto glinovite materijale uz prethodno poznavanja osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika kao preliminarnih rezultata ispitivanja.

## 10. POREĐENJE DOBIJENIH VREDNOSTI NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE RAZLIČITIM OPITIMA

U ovom poglavlju prikazano je poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće tla dobijenih primenom različitih opita: opit padajućeg konusa, jednoaksijalni opit, opit džepne krilne sonde, opit džepnog penetrometra i opit statičke penetracije (CPT) na neporemećenim uzorcima. Cilj poređenja je da se sagleda konzistentnost i pouzdanost pojedinačnih metoda, kao i da se utvrdi njihova primenljivost u analizi normalno konsolidovanih do slabo prekonsolidovanih prašinsto glinovitih materijala. Poređenjem rezultata moguće je identifikovati odstupanja, sagledati prednosti i ograničenja svake metode, kao i dati preporuke za njihovu primenu u praksi.

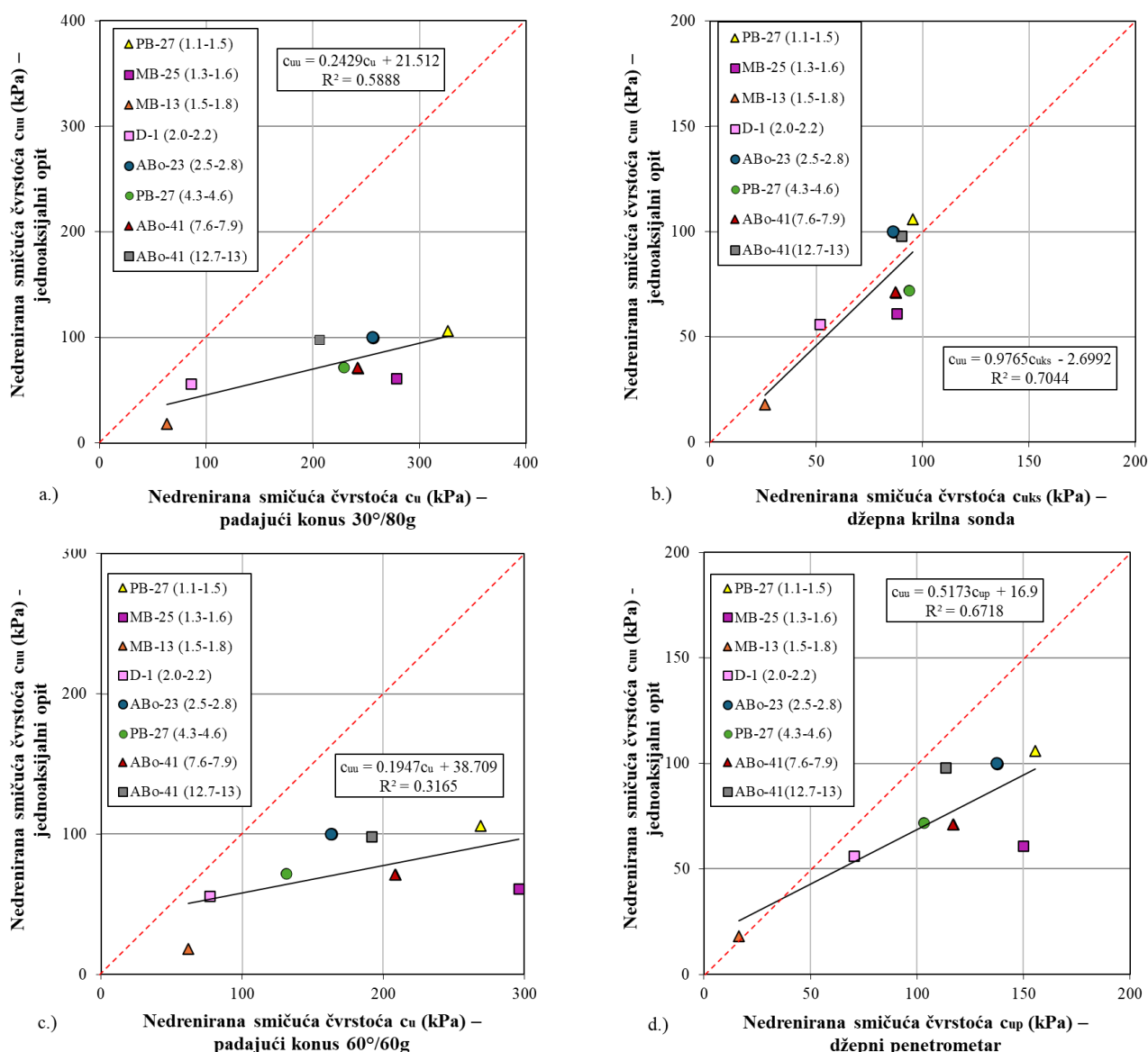
U cilju sagledavanja raspodele nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini, prikazani su rezultati svih opita. Opiti statičke penetracije (CPT), zbog velikog broja raspoloživih podataka, formirani su u grupama (definisano u Poglavlju 6.4.5). Na ovaj način omogućeno je direktno poređenje između kontinuiranog profila dobijenog CPT metodom i pojedinačnih vrednosti iz laboratorijskih ispitivanja. Na Slici 10.1. uočavaju se podudarnosti i odstupanja među metodama po vrednostima nedrenirane smičuće čvrstoće.



Slika 10.1. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini za različite metode

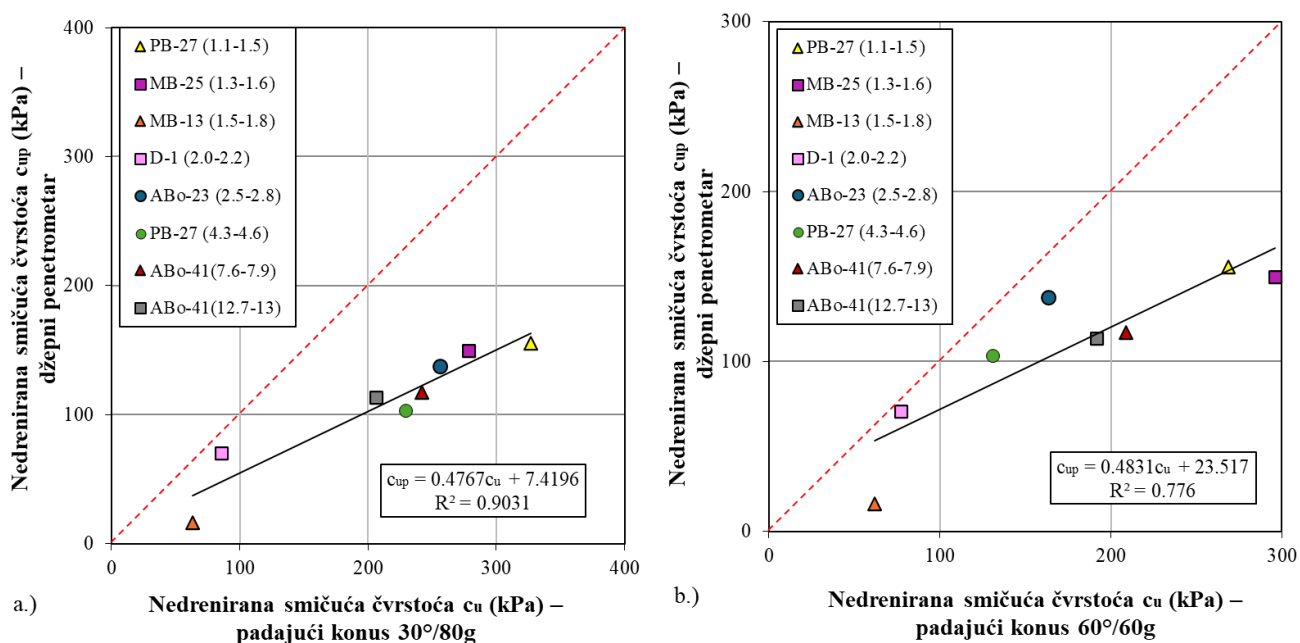
Posmatrajući sve opite, uočava se da podaci dobijeni CPT opitom u plićim delovima terena daju male vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, dok laboratorijski daju malo veće. Razlog tome je što laboratorijski opiti nedreniranu smičuću čvrstoću dobijaju direktnim merenjem ali one zavise i od kvaliteta uzorka (poremećenosti), a terenskim CPT opitom nedrenirana čvrstoća se dobija empirijskim putem. Prilikom izvođenja CPT opita na vrlo malim dubinama, kontakt između konusa i tla može biti pod uticajem površinskog otpora i na taj način uticati na dobijene vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Abimaje (2024) je razmatrao nedreniranu čvrstoću dobijenu CPT opitom i

laboratorijskim opitom dobivši veće vrednosti čvrstoće laboratorijskim opitom (triaksijalnim UU opitom) nego terenskim. U ovim istraživanjima jednoaksijalni opit i opit džepne krilne sonde su dali veoma slične vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, džepni penetrometar je dao malo veće vrednosti ali i dalje približne ovim dvema metodama, dok je opit padajućeg konusa dala veće vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene jednoaksijalnim opitom i opitom džepne krilne sonde se veoma dobro slažu sa vrednostima CPT opita. Statički penetracioni CPT opit obezbeđuje kontinuiran profil nedrenirane smičuće čvrstoće sa dubinom, a laboratorijske metode daju konkretne vrednosti za ispitivani uzorak na datoj dubini. Na ovaj način laboratorijski podaci dopunjuju CPT profil, i obratno, omogućavajući da se sagleda pouzdanost korelacija i identifikuju odstupanja. Kombinovanom analizom ovih opita dobija se kompletna slika o fizičko-mehaničkom ponašanju tla. Da bi se sagledale jasne razlike među laboratorijskim opitima i utvrdila pouzdanost pojedinačnih metoda u odnosu na druge radi se međusobno poređenje. Jednoaksijalni opit se poredi sa opitom padajućeg konusa 60°/60g i 30°/80g, džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom (Slika 10.2.).

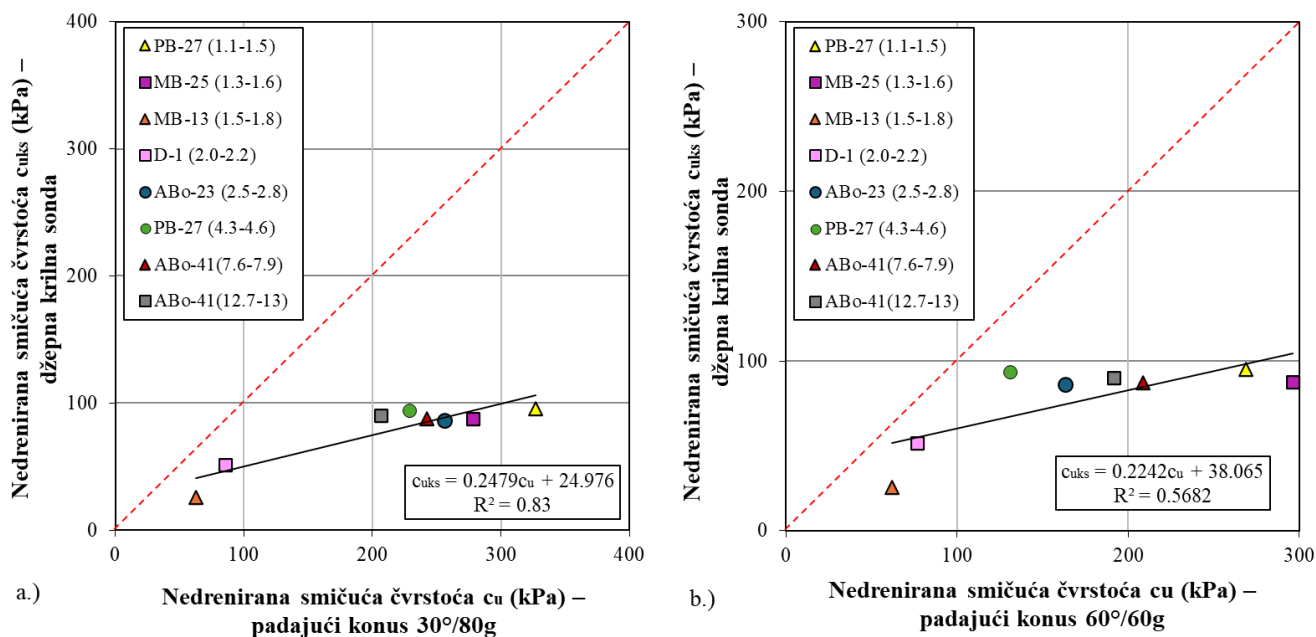


Slika 10.2. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene jednoaksijalnim opitom i drugim opitima

Na osnovu regresionih analiza i koeficijenta determinacije može se primetiti da je najslabije slaganje rezultata sa jednoaksijalnim opitom pokazala metoda padajućeg konusa 60°/60g ( $R^2 = 0.32$ ), što ukazuje na značajna odstupanja u dobijenim vrednostima. Najbolje slaganje je između jednoaksijalnog opita i opita sa džepnom krilnom sondom ( $R^2 = 0.71$ ), što potvrđuje pouzdanost ove metode u proceni nedrenirane smičuće čvrstoće. Džepni penetrometar takođe pokazuje visoku korelaciju ( $R^2 = 0.67$ ), dok metoda padajućeg konusa 30°/80g ima nižu korelaciju ( $R^2 = 0.58$ ). Na osnovu dobijenih korelacija i koeficijenta determinacije najmanje poklapanje dobijenih vrednosti  $c_u$  je sa konusom 60°/60g, a najbolje poklapanje je dobijeno sa džepnom krilnom sondom. Ukoliko bi se zanemario koeficijent determinacije, i sagledale veličine nedrenirane smičuće čvrstoće zaključak bi bio isti. Gribulis i sar. (2019) su isto dobili veliko poklapanje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće jednoaksijalnim opitom i džepnom krilnom sondom dok Tanaka i sar. (2012) pokazuju da se nedrenirana smičuća čvrstoća dobijena padajućim konusom i jednoaksijalnim opitom značajno razlikuju, što je i ovde pokazano. Rezultati dobijeni u ovom istraživanju pokazuju slična odstupanja između jednoaksijalnog opita i džepnog penetrometra kao što je zabeleženo u istraživanju koje je sproveo Yasun (2018). Prema istraživanjima koji su sproveli Budak i sar. (2022) poklapanje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijeni džepnim penetrometrom i padajućim konusom su jako bliski (ostupanje  $\pm 10$ – $20$  %), dok su odstupanja između jednoaksijalnog opita i padajućeg konusa veća ( $\pm 20$ – $30$  %). Kada razmatramo opit padajućeg konusa sa džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom dobijamo različite koeficijente determinacije koji se kreću u rasponu od 0.57 do 0.90 (Slika 10.3. i 10.4.).

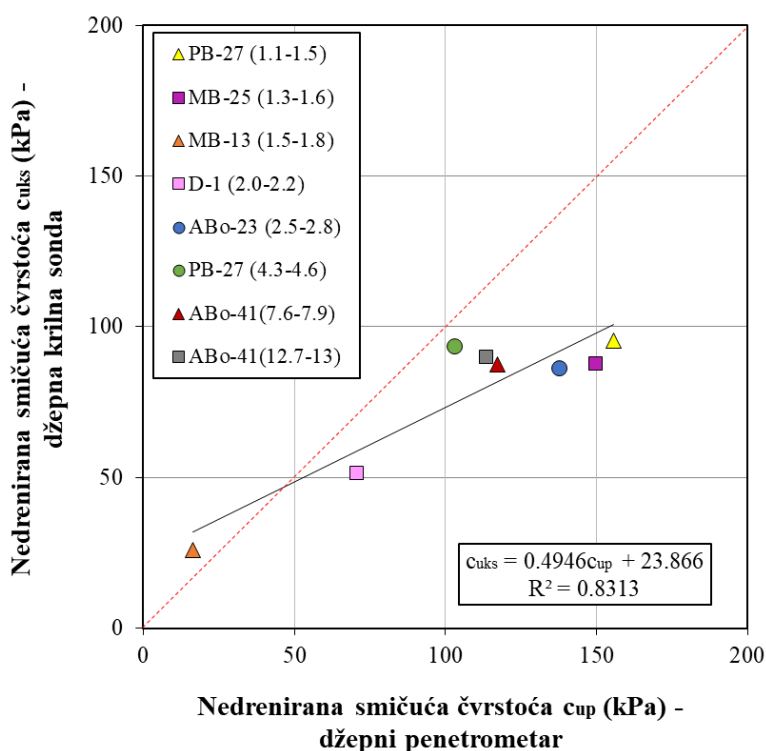


Slika 10.3. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene padajućim konusom i opitom džepnog penetrometra



Slika 10.4. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene padajućim konusom i opitom džepne krilne sonde

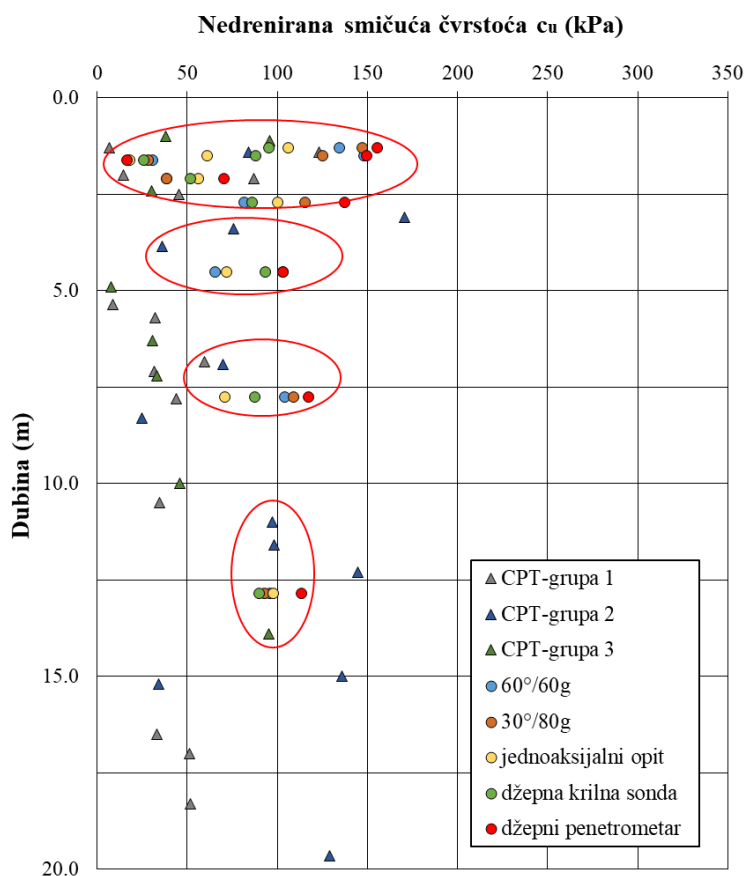
Prema koeficijentu determinacije idealno slaganje je dobijeno primenom metode konusa 30°/80g i džepnog penetrometra, ali realne vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su mnogo veće kod konusa nego kod penetrometra. Na Slici 10.5. je prikazan odnos rezultata dobijenih džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom.



Slika 10.5. Poređenje rezultata nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene džepnom krilnom sondom i džepnim penetrometrom

Koeficijent determinacije  $R^2$  je 0.83, što ukazuje na visoku korelaciju i slaganje dobijenih vrednosti, što i jeste slučaj. Rezultati džepnog penetrometra su malo viši nego rezultati dobijeni džepnom krilnom sondom.

Na osnovu sprovedenih poređenja može se zaključiti da različite metode određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće daju rezultate sa različitim stepenom slaganja na neporemećenim uzorcima. Metoda padajućeg konusa daje najviše rezultate merenja nedrenirane smičuće čvrstoće, dok jednoaksijalni opit, džepna krilna sonda i džepni penetrometar daju manje vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće. Ovi rezultati ukazuju da izbor metode ispitivanja znatno utiče na dobijene vrednosti. Rezultati opita padajućeg konusa u poređenju sa vrednostima dobijenim jednoaksijalnim, opitom džepne krilne sonde, džepnim penetrometrom i opitom statičke penetracije (CPT) uočavaju značajne razlike. Prilikom određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće koristi se konstanta  $c$ , koja je u ovim istraživanjima usvojena na osnovu podataka iz literature (Poglavlje 5.2.1.). Ukoliko se za konus  $60^\circ/60g$  usvoji druga vrednost konstante  $c$ , npr. 0.15 prema Koumoto i Houlsby (2001) ona je onda 3 puta manja nego za konus  $30^\circ/80g$ , što znači da bi za ovaj tip konusa konstanta  $c$  iznosila 0.45. Usvajanjem ovih vrednosti konstanti, izračunata nedrenirana smičuća čvrstoća na neporemećenim uzorcima se smanjuje i približava rezultatima dobijenim drugim ispitivanjima (Slika 10.6.).



Slika 10.6. Odnos nedrenirane smičuće čvrstoće po dubini za različite metode sa korekcijom vrednosti dobijenih metodom padajućeg konusa

U poređenju sa Slikom 10.1. jasno se vidi kako su se vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijene opitom padajućeg konusa približne vrednostima ostalih metoda ispitivanja. Vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće su prikazane preglednom Tabelom 10.1.

Tabela 10.1. Pregledna tabela vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće dobijenih različitim metodama

Metoda	Konus 30°/80g (korigovane vrednosti)	Konus 60°/60g (korigovane vrednosti)	Džepna krilna sonda	Džepni penetrometar	Jednoaksijalni opit	CPT opit
<b>Uzorak (m)</b>	<b>Nedrenirana smičuća čvrstoća za neporemećene uzorke (kPa)</b>					
<i>PB-27 (1.1-1.5)</i>	147.0	134.4	95.4	155.6	106	96
<i>MB-25 (1.3-1.6)</i>	125.1	148.0	87.9	149.8	61	-
<i>MB-13 (1.5-1.8)</i>	28.3	31.0	25.8	16.4	18	-
<i>D-1 (2.0-2.2)</i>	38.5	38.5	51.6	70.5	56	-
<i>ABo-23 (2.5-2.8)</i>	115.3	81.6	86.2	137.6	100	86.9
<i>PB-27 (4.3-4.6)</i>	103.2	65.6	93.6	103.2	72	76
<i>ABo-41 (7.6-7.9)</i>	109.0	104.3	87.5	117.2	71	64.7
<i>ABo-41 (12.7-13)</i>	92.9	95.8	90.1	113.5	98	98.7

## 11. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA, PREPORUKE I PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

U okviru ove doktorske disertacije sprovedena su laboratorijska i terenska ispitivanja sa ciljem određivanja i procene nedrenirane smičuće čvrstoće normalno konsolidovanog i slabo prekonsolidovanog sitnozrnog tla primenom različitih eksperimentalnih metoda, kao i numeričkih i statističkih analiza dobijenih rezultata. Istraživanje je obuhvatilo direktne metode određivanja nedrenirane smičuće čvrstoće, na osnovu kojih su uspostavljene različite korelacione zavisnosti sa osnovnim identifikaciono-klasifikacionim parametrima tla. Poseban akcenat stavljen je na ispitivanje uticaja vlažnosti, granica konzistencije i indeksnih pokazatelja (indeksa tečenja i indeksa plastičnosti) na vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće, imajući u vidu njihov značaj u geotehničkoj praksi.

Na osnovu sprovedenih laboratorijskih ispitivanja (opit padajućeg konusa, jednoaksijalni opit, opit džepne krilne sonde i opit džepnog penetrometra), kao i terenskih ispitivanja (CPT opit), izvršena je sveobuhvatna analiza ponašanja sitnozrnog tla u nedreniranim uslovima. Usporedna analiza i međusobno poređenje dobijenih rezultata pokazali su da je nedrenirana smičuća čvrstoća izrazito varijabilan geotehnički parametar. Utvrđeno je da na njenu vrednost presudan uticaj imaju međusobno povezani faktori, pre svega struktura tla, sadržaj vode, Atterbergove granice, istorija opterećenja tj. stepen prekonsolidacije (OCR), mineralni sastav tla, a vrlo značajnu ulogu ima i primenjena metoda ispitivanja. Analizom relevantne literature potvrđeno je da ne postoji jedinstvena univerzalna korelacija koja bi se mogla primeniti na sve vrste sitnozrnog tla i sve geotehničke uslove.

Literaturna istraživanja ukazala su na to da veza između nedrenirane smičuće čvrstoće i konzistentnog stanja tla ima ključnu ulogu, ali i da pokazuje izražen raspon vrednosti, naročito kada se materijal nalazi blizu granice tečenja i granice plastičnosti (Casagrande, 1932; Skempton i Northey, 1953; Wroth i Wood, 1978; Sridharan i Prakash, 1998; Koumoto i Houlsby, 2001; O'Kelly, 2013; Sharma i Sridharan, 2018; Shimobe i Spagnoli, 2020). Ovi zaključci iz literature predstavljali su osnov za detaljnu analizu opita padajućeg konusa u okviru ove doktorske disertacije.

Analiza rezultata laboratorijskih ispitivanja pokazala je da opit padajućeg konusa predstavlja jednostavnu i vremenski efikasnu metodu za procenu nedrenirane smičuće čvrstoće sitnozrnog tla, naročito u zavisnosti od vlažnosti i konzistentnog stanja. Ova metoda do sada nije bila sistematski primenjivana niti detaljno razmatrana u domaćoj geotehničkoj praksi. Dobijeni rezultati ukazuju na jasnu i ponovljivu zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće i Aterbergovih granica.

Džepna krilna sonda meri smičuću čvrstoću kroz rotaciono smicanje, pri čemu se čvrstoća određuje na osnovu izmerenog obrtnog momenta. Ovaj opit je dao rezultate dosta slične rezultatima jednoaksijalnog opita. Džepni penetrometar dao je rezultate malo veće u odnosu na džepnu krilnu sondu i jednoaksijalni opit, a veoma slične onima dobijenim opitom padajućeg konusa, što se može objasniti sličnim mehanizmom rada, odnosno prodiranjem odgovarajućeg nastavka u tlo pod dejstvom sile (sopstvena težina kod konusa i ručno primenjena sila kod džepnog penetrometra). U oba slučaja, na osnovu dubine ili sile prodiranja indirektno se procenjuje nedrenirana smičuća čvrstoća sitnozrnog tla. Jednoaksijalni opit pokazao se kao referentna laboratorijska metoda, ali je uočen izražen uticaj kvaliteta uzorka, anizotropije i poremećenosti strukture tla.

Terenski CPT opit omogućio je dobijanje kontinualnog profila nedrenirane smičuće čvrstoće sa dubinom. Međutim, primena statičkog penetracionog opita u velikoj meri zavisi od izbora empirijskih korelacija, kao i od programa koji se koristi za interpretaciju dobijenih podataka. Kombinovana interpretacija laboratorijskih i terenskih rezultata pokazala se kao najpouzdaniji pristup u proceni realnih vrednosti nedrenirane smičuće čvrstoće.

Statistička obrada podataka omogućila je kvantifikaciju pouzdanosti predloženih korelacionih zavisnosti. Modeli zasnovani na sadržaju vode i indeksu tečenja pokazali su se kao posebno pouzdani. Primena višestruke linearne regresije dokazala je da kombinacija dva ili više parametara tla dodatno unapređuje osnovne linearne modele u proceni nedrenirane smičuće čvrstoće.

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da se doprinosi ove disertacije ogledaju u unapređenju razumevanja ponašanja normalno konsolidovanih i slabo prekonsolidovanih sitnozrnih tla u nedreniranim uslovima, kao i u razvoju praktičnih i primenljivih korelacija koje mogu imati značajnu ulogu u geotehničkom projektovanju i inženjerskoj praksi.

### ***Naučni doprinosi doktorske disertacije***

Ova doktorska disertacija daje značajan naučni doprinos u oblasti geotehničkog modeliranja nedrenirane smičuće čvrstoće sitnozrnog tla, pre svega na regionalnom nivou, a delimično i u širem metodološkom smislu. Naučni doprinosi ogledaju se u sledećem:

- ✓ Regionalno utemeljene korelacione zavisnosti: po prvi put u Srbiji uspostavljene su i statistički verifikovane korelacione zavisnosti između nedrenirane smičuće čvrstoće i osnovnih faznih i fizičkih karakteristika tla ( $w$ ,  $w_L$ ,  $I_p$ ,  $I_L$ ,  $A$ ,  $OCR$ ) za normalno konsolidovana i slabo prekonsolidovana tla šireg beogradskog područja.
- ✓ Sistematski osvrt na primenu opita padajućeg konusa: disertacija predstavlja prvu sveobuhvatnu analizu primene opita padajućeg konusa u određivanju nedrenirane smičuće čvrstoće sitnozrnog tla u domaćim geotehničkim uslovima, u skladu sa standardom SRPS EN ISO 17892-6.
- ✓ Komparativna analiza laboratorijskih i terenskih opita: sprovedena je detaljna analiza više laboratorijskih i terenskih opita za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće (jednoaksijalni opit, opit padajućeg konusa, džepna krilna sonda, džepni penetrometar i CPT opit), čime je kvantifikovan njihov međusobni odnos i pouzdanost dobijenih rezultata.
- ✓ Verifikacija i prilagođavanje postojećih globalnih modela: pokazano je da globalno prihvaćeni modeli ne mogu uvek biti direktno primenjeni bez korekcija na lokalne uslove istraživanja.
- ✓ Statistički odabir najpouzdanijih korelacija: primena više statističkih pokazatelja omogućila je objektivnu procenu kvaliteta korelacionih zavisnosti i smanjenje subjektivnosti u interpretaciji rezultata.
- ✓ Procena nedrenirane smičuće čvrstoće: predloženi modeli omogućavaju brzu procenu nedrenirane smičuće čvrstoće vodeći računa o adekvatnom izboru metode ispitivanja.

***Preporuke za buduća istraživanja:***

- ✓ Uvođenje opita padajućeg konusa u praksu kao još jedne od standardizovanih metoda za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće tla.
- ✓ Usporedna analiza laboratorijskih i drugih terenskih ispitivanja (standardni penetracioni opit, terenska krilna sonda, presiometarski opit, dilatometarski opit) radi dobijanja pouzdanijih vrednosti geotehničkih parametara.
- ✓ Ispitivanje uticaja anizotropije i orijentacije uzorka prilikom izvođenja jednoaksijalnog opita.
- ✓ Razvoj lokalno kalibrisanih korelacija za terenske opite prilagođenih geološkim i geotehničkim uslovima.
- ✓ Primena naprednih statističkih i mašinskih metoda (višestruka regresija, neuronske mreže) radi unapređenja tačnosti prediktivnih modela.
- ✓ Istraživanje vremenskog efekta i brzine deformacija na nedreniranu smičuću čvrstoću pri seizmičkim delovanjima.

## LITERATURA

1. Abimaje, F. O. (2024). Estimation of undrained shear strength of soil from CPTu data. *Engineering and Technology Journal*, 9(10), 5406–5410. <https://doi.org/10.47191/etj/v9i10.22>
2. Alshibli, K. A., Okeil, A. M., Alramahi, B., & Zhang, Z. (2012). Reliability analysis of CPT measurements for calculating undrained shear strength. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 1–9.
3. Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. In *Developments in Geotechnical Engineering* (Springer). <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1>
4. Atterberg, A. (1911b). Die Plastizität der Tone. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*, 1, 4–37.
5. Bahar, R., Baidi, F., Belhassani, O., & Vincens, E. (2012). Undrained strength of clays derived from pressuremeter tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(10), 1238–1260. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.701930>
6. Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V., & Federico, A. (1985). Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering*, 18(5), 21–24
7. Bergaya, F., & Lagaly, G. (Eds.). (2013). *Handbook of clay science* (2nd ed., Vol. 5). Elsevier.
8. Berilgen, S. A., Kilic, H. O., & Zaydin, K. (2007). Determination of undrained shear strength for dredged Golden Horn marine clay with laboratory tests. In *Proceedings of the Sri Lankan Geotechnical Society's First International Conference on Soil & Rock Engineering* (Colombo, Sri Lanka).
9. Berisavljević, D. (2017). *Geotehničko modeliranje tla na osnovu parametara određenih seizmičkim dilatometrom* (doktorska disertacija). Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
10. Bishop, R. F., Hill, R., & Mott, N. F. (1945). The theory of indentation and hardness tests. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 57(3), 147–159.
11. Bjerrum, L. (1954). Geotechnical properties of Norwegian marine clays. *Geotechnique*, Vol. 4, pp. 49-69.
12. Bjerrum, L. (1972). Embankments on soft ground. In *ASCE Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures* (Vol. 2, pp. 1–54). Purdue University.
13. Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays. *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 3, pp. 111–159). Moscow.
14. Bjerrum, L., & Simons, N. E. (1960). Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clay. In *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils* (pp. 1771–1726). ASCE.
15. BS 1377-2:1990, Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification tests.
16. Budak, T. O., Gürbüz, A., & Ekşioğlu, B. (2022). Practical transitions among undrained shear strengths of remolded samples from pocket penetrometer tests and other laboratory tests. *Catena*, 213, 106148. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106148>

17. Burmister, D. M. (1951). The application of controlled test methods in consolidation testing.
18. Canelas, D., Fernandes, I., & Lopes, M. da G. (2018). Use of Fall Cone Test for the determination of undrained shear strength of cohesive soils. In *MATEC Web of Conferences*, 251, 04067. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825104067>
19. Carlson, L. (1948). Determination in situ of the shear strength of undisturbed clay by means of a rotating auger. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 265–270).
20. Carter, M., & Bentley, S. (1990). *Correlations of soil properties*. Pentech Press.
21. Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8), 121-136.
22. Casagrande, A. (1939). Classification and identification of soils. *Transactions of the ASCE*, 104, 901–930.
23. Casagrande, A. (1959). Selection of Soil Parameters for Design. *Proceedings of the First Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City.
24. Casagrande, A., & Carrillo, N. (1944). Shear strength of saturated clays as determined by the direct shear test. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 70(6), 283–321.
25. Ching, J., & Phoon, K. K. (2012). Modeling parameters of structured clays as a multivariate normal distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5), 522–545. <https://doi.org/10.1139/T2012-015>
26. Clemente, C., Faro, V. P., & Moncada, M. P. H. (2020). Determination of the undrained shear strength by the fall cone method in marine soils. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 20(3), 123–129.
27. D'Ignazio, M., Phoon, K.-K., Tan, S. A., & Lämsivaara, T. T. (2016). Correlations for undrained shear strength of Finnish soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1628–1645. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0037>
28. D'Ignazio, M., Phoon, K.-K., Lansivaara, T. T., & Tan, S. A. (2021). Uncertainties in modelling undrained shear strength of clays using critical state soil mechanics and SHANSEP. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 710, 012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/710/1/012075>
29. Das, B. M. (2014). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
30. Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
31. Dimgba, C., Nwaogazie, I. L., & Big-Alabo, A. (2023). Modeling the Undrained Shear Strength with Soil Index Properties for Niger Delta Soft Clays. *Open Journal of Civil Engineering*, 13(1), 113–126. <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.131008>
32. Drucker, D. C., Prager, W., & Richter, G. H. (1951). On the yielding of steel sheets containing discontinuities. *Quarterly of Applied Mathematics*, 9(2), 203–227. <https://doi.org/10.1090/qam/1061589>
33. Đurić, T., Rakić, D., Pantić, J.J., Ikodinović, B.I. and Milosavljević. M., (2025), Zavisnosti između nedrenirane smičuće čvrstoće tla i vlažnosti dobijene metodom padajućeg konusa, *Int. Sci. Forum GAGiEE 2025*, Vrnjačka Banja, Serbia, pp.163-170 [doi: 10.46793/GEOAG25.163DJ](https://doi.org/10.46793/GEOAG25.163DJ)

34. Edil, T. B., & Benson, C. H. (2009). Comparison of basic laboratory test results with more sophisticated laboratory and in situ test methods on soils in southeastern Wisconsin (Final report No. 0092-06-05). Wisconsin Highway Research Program.
35. Eid, H. T., & Stark, T. D. (1998). Undrained shear strength from cone penetration test. In *Geotechnical Site Characterization (ISC'98)* (Vol. 2, pp. 1021–1025).
36. Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje Autoputa E70, Obilaznica oko Beograda i Pančeva - Sektor "C" Deonica: od Bubanj Potoka do državnog puta I reda Pančevo - Vršac (DP IB-10) (2025), Saobraćajni Institut CIP d.o.o.
37. Elsayy, M. B. D., Alsharekh, M. F., & Shaban, M. (2022). Modeling Undrained Shear Strength of Sensitive Alluvial Soft Clay Using Machine Learning Approach. *Applied Sciences*, 12(19), 10177. <https://doi.org/10.3390/app121910177>
38. EN ISO 17892-6:2017, Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – part 6. Fall cone test.
39. Erik, P. (2017). Empirical correlation between undrained shear strength and preconsolidation pressure in Swedish soft clays (Master of Science thesis). *Division of Soil and Rock Mechanics*, Royal Institute of Technology, Stockholm. ISSN 1652-599X.
40. Farias, M. M., & Llano-Serna, M. A. (2016). Simple methodology to obtain critical state parameters of remolded clays under normally consolidated conditions using the fall-cone test. *Geotechnical Testing Journal*, 39(5), 1–10. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150207>
41. Federico, A. (1983). Relationships (Cu – w) and (Cu – s) for remolded clayey soils at high water content. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 17(1), 38–41.
42. Feng, T. W. (2000). Fall-cone penetration and water content relationship of clays. *Géotechnique*, 50(2), 181–187. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.2.181>
43. Feng, T. W. (2001). A Linear log d – log w Model for the Determination of Consistency Limits of Soils, *Canadian Geotechnical Journal* 38(6), 1335–1342. [doi: 10.1139/t01-061](https://doi.org/10.1139/t01-061)
44. Feng, T. W. (2004). Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), 630–635. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:6\(630\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(630))
45. Fukasawa, T., & Kusakabe, O. (2001). A history of development of cone penetration tests with reappraisal of interpretation methods and its applicability to clay soils (Technical Report No. 64). Tokyo Institute of Technology.
46. Habibullah, H. S., Lee, M. L., & Wong, S. Y. (2022). Correlation between undrained shear strength and liquidity index of soils in Malaysia. *E3S Web of Conferences*, 347, 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234703004>
47. Hadži-Niković, G. (2020). *Geostatički proračuni*. Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
48. Hafiy, S. H., Min, L. L., & Soon, Y. W. (2022). Correlation between undrained shear strength and liquidity index of soils in Malaysia. *Web of Conferences*, 347, 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234703004>
49. Haigh, S. K., Vardanega, P. J., and Bolton, M. D. (2013), The Plastic Limit of Clays, *Géotechnique* 63(6), 435–440. [doi:10.1680/geot.11.p.123](https://doi.org/10.1680/geot.11.p.123)
50. Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson.

51. Hansbo, S. (1957). A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test. Royal Swedish Geotechnical Institute.
52. Harison, J. A. (1988). Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils. *Géotechnique*, 38(3), 433–438. <https://doi.org/10.1680/geot.1988.38.3.433>
53. Herrmann, L. R., & Mello, J. (1994). Investigation of an alternative finite element procedure: A one-step, steady-state analysis (Report No. CR95.001). University of California at Davis.
54. Hong, S., Lee, M., Kim, J., & Lee, W. (2010). Evaluation of undrained shear strength of Busan clay using CPT. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)*.
55. Hrubesova, E., & Lunackova, B. (2022, July). Assessment of plastic limit of soil based on fall cone test. In *22nd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022* (pp. 563–570). Albena, Bulgaria.
56. Huang, W., Sheng, D., Sloan, S. W., & Yu, H. S. (2004). Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 31(7), 517–528.
57. Hutabarat, D., & Widjaja, B. (2020). Undrained shear strength of clayey soils at liquid limit. *International Journal of GEOMATE*, 18(67), 151–156. <https://doi.org/10.21660/2020.67.9390>
58. Janbu, N. (1989). *Grunnlag i geoteknikk*. Tapir Forlag.
59. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., & Lancellotta, R. (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. In *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 57–153).
60. Jevremović, D., Lazić, M., Vukadinović, I., (2021). *Regionalna inženjerska geologija Srbije*. Beograd.
61. Kang, G., Tsuchida, T., Tang, T., & Kalim, T. (2017). Consistency measurement of cement-treated marine clay using fall cone test and Casagrande liquid limit test. *Soils and Foundations*, 57(5), 802-814. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.010>
62. Kanungo, D. P., Sharma, S., & Pain, A. (2014). *Artificial Neural Network (ANN) and Regression Tree (CART) applications for the indirect estimation of unsaturated soil shear strength parameters*. *Frontiers of Earth Science*, 8(3), 439–456. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0416-0>
63. Karakan, E. (2023). Utjecaj mineralogije gline na nedreniranu posmičnu čvrstoću pomoću pokusa s padajućim šiljkom. *Grđevinar*, 75(7), 641–652. 641–652. <https://doi.org/10.14256/JCE.3558.2022>
64. Karakan, E. (2023). Flow index–liquid limit relationship by fall-cone tests in clay-sand mixtures. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101405. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101405>
65. Karlsrud, K., & Hernandez-Martinez, F. G. (2013). Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12), 1273–1293. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0298>
66. Karlsson, R. (1961). Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays. Paper presented at the *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France, 171–184.

67. Karlsson, R., & Viberg, L. (1967). Ratio  $c/p'$  in relation to liquid limit and plasticity index with special reference to Swedish clays. In *Proceedings of the Geotechnical Conference* (Vol. 1, pp. 43–47). Oslo, Norway.
68. Kayabali, K., & Tufenkci, O. (2010). Undrained shear strength of remolded clays at consistency limits. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2), 227–233. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0255-6>
69. Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., Dikmen, O., & Harputlugil, F. H. (2015a). Revisiting the Bjerrum's correction factor: Use of the liquidity index for assessing the effect of soil plasticity on undrained shear strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.07.003>
70. Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., Ustun, A. B., Dikmen, O., & Harputlugil, F. H. (2015b). Evaluation of undrained shear strength of fine-grained soils in consideration of soil plasticity. *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*.
71. Kezdi, A. (1974). *Handbook of soil mechanics* (Vol. 1). Elsevier.
72. Koumoto, T., & Houlby, G. T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique*, 51(8), 701–712. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.8.701>
73. Krage, C. P., Broussard, N. S., & DeJong, J. T. (2014). Estimating rigidity index ( $I_r$ ) based on CPT measurements. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing* (pp. 727–735).
74. Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design (EPRI Report EL-6800). Electric Power Research Institute.
75. Kuriakose, B., Abraham, B. M., Sridharan, A., & Jose, B. T. (2017). Water content ratio: An effective substitute for liquidity index for prediction of shear strength of clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1577–1586. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0193-0>
76. Kyambadde, B. S., & Stone, K. J. L. (2012). *Index and strength properties of clay–gravel mixtures*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 165(1), 13–21. <https://doi.org/10.1680/geng.2012.165.1.13>
77. *Geološki informacioni sistem Srbije (GeolISS) – Inženjersko-geološka karta 1:300 000*. Dostupno na: <https://geoliss.mre.gov.rs/vebkarte/igk300.html>
78. Gribulis, D., Žaržojus, G., Gadeikis, S., Gadeikytė, S., & Urbaitis, D. (2019). Research of undrained shear strength of till fine soils (moraine). In *13th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques* (pp. 329–335).
79. Gulen, M., Saltali, O., Kilic, H. "Determination of Plastic Limit by Fall Cone Test for Soils with Different Grain Size Distribution", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.3311/PPci.38114>
80. Ladd, C.C. and Foote, R. (1974). A new design procedure for stability of soft clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol. 100, No. GT7. pp. 763-786.
81. Ladd, C. C. (1986). Stability evaluation during staged construction: 22nd Terzaghi Lecture. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(4), 537–615.
82. Ladd, C. C. (1991). Stability evaluation during staged construction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(4), 540–615.

83. Larsson, R., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (1984). *Evaluation of shear strength in cohesive soils with special reference to Swedish practice and experience* (Swedish Geotechnical Institute Information No. 3E). Linköping: Swedish Geotechnical Institute.
84. Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P. E., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet: Utvärdering i kohesionsjord* (2nd ed.). Swedish Geotechnical Institute (SGI).
85. Lee, L. T. (2004). Predicting geotechnical parameters for dredged materials using the slump test method and index property correlations (ERDC TN-DOER-D-1). U.S. Army Engineer Research and Development Center.
86. Lemos, S. G. F. P., & Pires, P. J. M. (2017). The undrained strength of soft clays determined from unconventional and conventional tests. *Soils and Rocks*, 40(3), 291–301. <https://doi.org/10.28927/SR.403291>
87. Leroueil, S., Tavenas, F., & Le Bihan, J. P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 681–705.
88. Locat, J., & Demers, D. (1988). Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 799–806.
89. Londalen, M. M. (2018). *Correlation of properties in geotechnical engineering* (Master's thesis). Norwegian University of Science and Technology.
90. Look, B. G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. London: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203946602>
91. Lunne, T., Eide, O., & Ruiter, J. D. (1976). Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(4), 430–441.
92. Lunne, T., & Kleven, A. (1981). Role of CPT in North Sea foundation engineering. In *ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Materials* (pp. 76–107).
93. Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional.
94. Medhat, A., & Whyte, I. L. (1986). Consistency limits and undrained shear strength of soils by the fall cone test. *Ground Engineering*, 19(3), 21–24.
95. Maksimović, M. (2001). *Mehanika tla* (2. izd.). Beograd.
96. Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(3), 299–321.
97. Mayne, P. W., & Kulhawy, F. H. (1991). Calibration of cone penetration test for estimating undrained shear strength of clays. *Geotechnical Testing Journal*, 14(2), 227–237.
98. Mayne, P. W., & Peuchen, J. (2022). Undrained shear strength of clays from piezocone tests: A database approach. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'22)* (pp. 546–551).
99. Medhat, F., & Whyte, I. L. (1986). *Engineering Geology Special Publications* (Vol. 2, pp. 317–323). Geological Society, London.
100. Menard, E. (1957). Mesure de la cohésion des argiles par le penetromètre à plaque et par l'essai au cisaillement non-drainé. *Annales des Ponts et Chaussées, Série 2*, 29, 185–196.
101. Ménard, L. (1963). The Ménard pressuremeter: Interpretation and application of pressuremeter test results.

102. Mesri, G. (1975). Discussion on “New design procedure for stability of soft clays.” *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(4), 409–412.
103. Mesri, G. (1989). A re-evaluation of  $su(mob) = 0.22\sigma'_p$  using laboratory shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(1), 162–164. <https://doi.org/10.1139/t89-017>
104. Meyerhof, G. G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301–332. <https://doi.org/10.1680/geot.1951.2.4.301>
105. Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije. (n.d.). Inženjersko-geološka karta 1:300 000. (GeolISS). <https://geoliss.mre.gov.rs/vebkarte/igk300.html>
106. Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior* (2nd ed.). Wiley.
107. Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
108. Mohd Amin, J., Taha, M. R., Ahmed, J., Kassim, A. A., Jamaluddin, A., & Jaadil, J. (1997). Prediction and determination of undrained shear strength of soft clay at Bukit Raja. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 5(1), 111–126.
109. Muntohar, A. S., & Hashim, R. (2005). Determination of plastic limits of soils using cone penetrometer: Re-appraisal. *Jurnal Teknik Sipil/Civil Engineering Journal*, 11(2), 87–98.
110. Myślińska, Z., (2006). *Laboratoryjne badania gruntów*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
111. Nagaraj, T. S., Sridharan, A., & Mallikarjuna, H. (2012). Reappraisal of the plastic limit of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 165(2), 119–126. <https://doi.org/10.1680/geng.9.00052>
112. Nooteboom, M. M. (2023). Strength development of soft soils: Prediction and verification of undrained shear strength for loaded soft soils (Master’s thesis, Delft University of Technology).
113. Obasi, N. L., & Anyaegbunam, A. J. (2005). Correlation of the undrained shear strength and plasticity index of tropical clays. *Nigerian Journal of Technology*, 24(2), 1–11. <https://doi.org/10.4314/njt.242.506>
114. O’Kelly, B. C. (2012). Undrained shear strength–water content relationship for sewage sludge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 166(6), 576–588. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00016>
115. O’Kelly, B. C. (2013). Atterberg limits and remolded shear strength–water content relationships. *Geotechnical Testing Journal*, 36(6), 939–947. <https://doi.org/10.1520/GTJ20130012>
116. O’Kelly, B. C. (2013). Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations. *Geotechnics*, 1, 59–75. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004>
117. O’Kelly, B. C. (2022). Discussion of “Practical transitions among undrained shear strengths of remolded samples from pocket penetrometer tests and other laboratory tests” by Budak, T. O., Gurbuz, A., & Eksioğlu, B. *Catena*, 213, 106148. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106148>
118. O’Kelly, B. C., Vardanega, P., & Haigh, S. (2018). Use of fall cones to determine Atterberg limits: A review. *Géotechnique*, 68(10), 843–856. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.r.039>
119. Ohde, J. (1938). *Erddruck und Grundwiderstand*. Springer-Verlag.
120. Oliveira, J. R., Almeida, M. S., Motta, H. P., & Almeida, M. C. (2010). Influence of penetration rate on penetrometer resistance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(7), 695–703.
121. Olphen, H. (1963). *An introduction to clay colloid chemistry*. Interscience Publishers.

122. Phoon, K.-K., & Ching, J. (2015). *Better correlations for geotechnical design*. CRC Press.
123. Padmini, D., Srinivasan, R., & Sivakumar, B. (2008). *Prediction of soil strength parameters using regression and neural network techniques*. *Engineering Geology*, 96(3–4), 231–241.
124. Raheem, A. M., & Joshaghani, M. S. (2016). Modeling of shear strength-water content relationship of ultra-soft clayey soil. *International Journal of Advanced Research*, 4(4), 537–545. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/255>
125. Rakić, D. (2015). *Mehanika tla 1* (PowerPoint prezentacija). Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
126. Rakić, D. (2018). *Zbirka rešenih zadataka iz mehanike tla*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet. ISBN 978-86-7352-307-1
127. Ratananikom, W., Yimsiri, S., & Likitlersuang, S. (2015). Undrained shear strength of very soft to medium stiff Bangkok clay from various laboratory tests. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46(1).
128. Rémai, Z. (2013). Correlation of undrained shear strength and CPT resistance. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57(1), 39–45.
129. Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151–158. <https://doi.org/10.1139/t90-014>
130. Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
131. Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: An update. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10) (Vol. 2, pp. 575–583).
132. Robertson, P. K. (2016). *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—an update*. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
133. Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). *Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering*. Gregg Drilling & Testing.
134. Robertson, P. K., Campanella, R. G., & Wightman, A. (1983). SPT–CPT correlations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(GT11), 1449–1459.
135. Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). *On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay*. In J. Heyman & F. A. Leckie (Eds.), *Engineering plasticity* (pp. 535–609). Cambridge University Press.
136. Roy, D., & Singh, R. (2008). Mechanically stabilized earth wall failure at two soft and sensitive soil sites. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22(6), 373–380.
137. Salgado, R., Boulanger, R. W., & Mitchell, J. K. (1997). Lateral stress effects on CPT liquefaction resistance correlations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 726–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:8\(726\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(726))
138. Salgado, R., Lyamin, A. V., Sloan, S. W., & Yu, H. S. (2004). Two- and three-dimensional bearing capacity of foundations in clay. *Géotechnique*, 54(5), 297–306. <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.5.297>
139. Sanglerat, G. (1972). *The penetrometer and soil exploration*. Elsevier.
140. Schmertmann, J. H. (1955). The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay. *Trans. ASCE*, 120, pp. 1201 through 1233.
141. Schofield, A. N., & Wroth, C. P. (1968). *Critical state soil mechanics*. McGraw-Hill.

142. Seal, H. L. (1967). The historical development of the Gauss linear model. *Biometrika*, 54(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1093/biomet/54.1-2.1>
143. Seah, T. H., & Lai, K. C. (2003). Strength and deformation behavior of soft Bangkok clay. *Geotechnical Testing Journal*, 26(4), 421–431. <https://doi.org/10.1520/GTJ11260J>
144. Sharma, B., & Bora, P. K. (2003). Plastic limit, liquid limit and undrained shear strength of soil—Reappraisal. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(8), 774–777. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(774))
145. Sharma, B., & Sridharan, A. (2018). Liquid and plastic limits of clays by cone method. *International Journal of Geo-Engineering*, 9, Article 22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(774))
146. Shimobe, S., (2000). Correlations among liquidity index, undrained shear strength and fall cone penetration of fine-grained soils. In: Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Balkema, Rotterdam (the Netherlands), Vol. 1, 141–146.
147. Shimobe, S., & Spagnoli, G. (2019). Some relations among fall cone penetration, liquidity index and undrained shear strength of clays considering the sensitivity ratio. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(7), 5029–5038. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01478-2>
148. Shimobe, S., & Spagnoli, G. (2020a). Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(9), 4707–4716. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01844-5>
149. Shimobe, S., & Spagnoli, G. (2020b). Fall cone tests considering water content, cone penetration index, and plasticity angle of fine-grained soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 1347–1355. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.02.005>
150. Sivakumar, V., Glynn, D., Cairns, P. and Black, J. A. (2009), A new method of measuring plastic limit of fine materials, *Geotechnique* 59(10), 813–823, [doi:10.1680/geot.2009.59.10.813](https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.10.813)
151. Skempton, A. W., & Northey, R. (1952). The sensitivity of clays. *Géotechnique*, 3(1), 30–53. <https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.1.30>
152. Skempton, A. W. (1957). Discussion: The planning and design of the New Hong Kong Airport. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 7(2): 305–307, <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1957.2568>
153. Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3), 425–447.
154. Soil Survey Staff. (2024). *Field book for describing and sampling soils, version 4.0*. USDA Natural Resources Conservation Service. U.S. Government Printing Office. [Preuzeto s https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/field-book-for-describing-and-sampling-soils](https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/field-book-for-describing-and-sampling-soils)
155. Soltani, A., & O’Kelly, B. C. (2025). Discussion of “Prediction of the undrained shear strength of remolded soil with nonlinear regression, fuzzy logic, and artificial neural network.” *Journal of Mountain Science*, 22(7). <https://doi.org/10.1007/s11629-025-9538-y>
156. Spagnoli, G., & Feinendegen, M. (2015). Relationship between measured plastic limit and plastic limit estimated from undrained shear strength, water content ratio and liquidity index. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1235–1246. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0665-1>

157. Spagnoli, G., M. Feinendegen, L. DiMatteo, and D. A. Rubinos. (2019). The Flow Index of Clays and Its Relationship with Some Basic Geotechnical Properties, *Geotechnical Testing Journal* 42 (6): 1685–1700. <https://doi.org/10.1520/GTJ20180110>
158. Sridharan, A., & Prakash, K. (1998). Mechanisms controlling the undrained shear strength at the plastic limit of soils. *Géotechnique*, 48(2), 165–176. <https://doi.org/10.1680/geot.1998.48.2.165>
159. SRPS EN ISO 14688-2:2018. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Identifikacija i klasifikacija tla – Deo 2: Principi klasifikacije*. Institut za standardizaciju Srbije.
160. SRPS EN ISO 17892-1:2015 *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 1: Određivanje vlažnosti*. Institut za standardizaciju Srbije.
161. SRPS EN ISO 17892-2:2015. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 2: Određivanje zapreminske mase*. Institut za standardizaciju Srbije.
162. SRPS EN ISO 17892-4:2017. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 4: Određivanje granulometrijskog sastava*. Institut za standardizaciju Srbije.
163. SRPS EN ISO 17892-5:2017. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 5: Edometarsko ispitivanje stepenastim opterećenjem*. Institut za standardizaciju Srbije.
164. SRPS EN ISO 17892-6:2017 *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 6: Ispitivanje padajućim konusom (Fall cone test)*. Institut za standardizaciju Srbije.
165. SRPS EN ISO 17892-7:2017. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 7: Jednoaksijalna kompresija*. Institut za standardizaciju Srbije.
166. SRPS EN ISO 17892-12:2018: *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Laboratorijsko ispitivanje tla – Deo 12: Određivanje tečenja i plastičnosti tla*. Institut za standardizaciju Srbije.
167. SRPS EN ISO 22476-1:2013. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terenska ispitivanja – Deo 1: Ispitivanje statičkom penetracijom (CPT)*. Institut za standardizaciju Srbije.
168. SRPS EN ISO 22476-3:2013. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terenska ispitivanja – Deo 3: Standardni penetracioni test (SPT)*. Institut za standardizaciju Srbije.
169. SRPS EN ISO 22476-4:2013. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terenska ispitivanja – Deo 4: Presiometarsko ispitivanje Menardovim presiometrom*. Institut za standardizaciju Srbije.
170. SRPS EN ISO 22476-9:2020. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terensko ispitivanje – Deo 9: Ispitivanje terenskom krilnom sondom (FVT)*. Institut za standardizaciju Srbije.
171. SRPS EN ISO 22476-11:2017. *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terenska ispitivanja – Deo 11: Ispitivanje ravnim dilatometrom (DMT)*. Institut za standardizaciju Srbije.
172. Stefaniak, K. (2015). Assessment of shear strength in silty soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(2), 67-76. <https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0020>
173. Stone, K. J. L., & Phan, K. D. (1995). Cone penetration tests near the plastic limit. *Géotechnique*, 45(1), 155–158. <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.155>
174. Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. In *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing* (Vol. 2, pp. 367–375).
175. Stróżyk, J., & Tankiewicz, M. (2014). The undrained shear strength of overconsolidated clays. *Procedia Engineering*, 91, 317–321. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.067>

176. Swedish Railways. (1922). *Slutbetänkande avgivet till Kungl. Järnvägsstyrelsen den 31 maj 1922*. In *Statens järnvägars geotekniska kommission 1914–1922* (Nyutgåva 1, p. 188). Stockholm: Svenska Geotekniska Föreningen.
177. Tanaka, H., Hirabayashi, H., Matsuoka, T., & Kaneko, H. (2012). Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials. *Soils and Foundations*, 52(4), 590–599. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.002>
178. Teh, C. I., & Houlsby, G. T. (1991). An analytical study of the cone penetration test in clay. *Géotechnique*, 41(1), 17–34. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.1.17>
179. Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke.
180. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
181. Terzaghi, K. (1944). *Ends and means in soil mechanics*. Harvard University.
182. Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
183. Tsuchida, T. (1999). Development and use of foamed treated soil in port and airport project. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 38(2), 131–167.
184. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (n.d.). *Field book for describing and sampling soils*. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/field-book-for-describing-and-sampling-soils>
185. Vardanega, P., & Haigh, S. (2014). The undrained strength and liquidity index relationship. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9), 1073–1086. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0169>
186. Vardanega, P. J., Hickey, C. L., Lau, K., Sarzier, H. D. L., Couturier, C. M., & Martin, G. (2018). Investigation of the Atterberg limits and undrained fall-cone shear strength variation with water content of some peat soils. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(2), 131–138. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0017-0>
187. Vardanega J. P., Haigh K.S., O’Kelly B., Zhang X., Liu X., Chen C. and Wang G. (2023), Use of fall-cone flow index for soil classification: a new plasticity chart, *Géotechnique* 73(7), 648–654, [doi:10.1680/jgeot.21.00268](https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00268)
188. Vardanega, P. J., & Gan, J. S. (2023). Comparison of data from fall-cone and laboratory vane tests to investigate undrained shear strength for some fine-grained materials. In *Proceedings of the 17th Danube European Conference on Geotechnical Engineering (17DECGE)* (June 7–9, 2023, Bucharest, Romania)
189. Vahedifard, F., Howard, I. L., Badran, W. H., Carruth, W. D., Hamlehdari, M., & Jordan, B. D. (2016). Strength indices of high-moisture soils using handheld gauges. *Ground Improvement*, 169(3), 167–181.
190. Vesić, A. S. (1972). *Expansion of cavities in infinite soil mass*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(3), 265–290. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001740>
191. Vinod, P., Sridharan, A., & Deepa, K. A. (2012). Remoulded shear strength at plastic and semi-solid states. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*, 166(4), 415–424. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00071>
192. Wasti, Y., & Bezirci, M. H. (1986). Determination of consistency limits and undrained shear strength of soils by the fall cone test. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(2), 174–180.

193. Westerberg, B., Müller, R., & Larsson, S. (2015). Evaluation of undrained shear strength of Swedish fine-grained sulphide soils. *Engineering Geology*, 188, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.007>
194. Whyte, I. L. (1982). Soil plasticity and strength: A new approach using extrusion. *Ground Engineering*, 15(1), 16–24.
195. Wood, D. M. (1985). Index properties and consolidation history. In *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 703–706. San Francisco, CA, USA.
196. Wood, D. M. (1990). *Soil behaviour and critical state mechanics*. Cambridge University Press.
197. Wroth, C. P., & Wood, D. M. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2), 137–145. <https://doi.org/10.1139/t78-014>
198. Whyte, I. L. (1982), Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion, *Ground Engineering* 15(1), 16-24. [doi:10.1016/0148-9062\(82\)91670-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)91670-9)
199. Yang, S. L., Kvalstad, T., Solheim, A., & Forsberg, C. F. (2006). Parameter studies of sediments in the Storegga Slide region. *Geo-Marine Letters*, 26(4), 213–224. <https://doi.org/10.1007/s00367-006-0033-5>
200. Yasun, A. S. (2018). Capability of pocket penetrometer to evaluate unconfined compressive strength of Baghdad clayey soil. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 21(1), 66–73. <https://doi.org/10.29194/NJES21010066>
201. Yilmaz, I. (2000). Evaluation of shear strength of clayey soils by using their liquidity index. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(3), 227–229. <https://doi.org/10.1007/s100640000064>
202. Yilmaz, I. (2004). Relationships between liquid limit, cation exchange capacity, and swelling potentials of clayey soils. *Eurasian Soil Science*, 37(5), 506–512.
203. Young, A., & Warkentin, B. P. (1966). *Soil properties and behaviour*. Elsevier.
204. Youssef, M. S., Ramli, A. H. E. L., & Demery, M. E. I. (1965). Relationship between shear strength, consolidation, liquid limit and plastic limit for remolded clays. In *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics*, 126–129. Montreal.
205. Youssouf, C., Philippe, R., & Zadjajoui, A. (2020). Applicability of SHANSEP method in evaluating the preconsolidation pressure. *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek*, 13–24.
206. Zentar, R., Abriak, N. E., & Dubois, V. (2009). Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(1), 153–157. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(153))
207. Zhang, W., Wu, C., Zhong, H., Li, Y., & Wang, L. (2021). Prediction of undrained shear strength using extreme gradient boosting and random forest based on Bayesian optimization. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.007>

## **DODATAK**

## D.1. Uvod

Granice konzistencije tla predstavljaju veoma bitne parametre u geotehničkom inženjerstvu, jer pružaju uvid u ponašanje finih čestica u zavisnosti od količine i sadržaja vode i definišu prelaze između različitih stanja konzistencije. Indeksna svojstva sitnozrnih tla, poput granice tečenja i granice plastičnosti, široko se koriste kao glavni pokazatelji. Za razliku od granice tečenja, koja se može pouzdano utvrditi mehaničkim ispitivanjima, određivanje granice plastičnosti predstavlja znatno složeniji postupak, a standardni opit valjanja sve je više predmet kritika zbog subjektivnog karaktera. Zbog toga postoji potreba za novom, mehaničkom, pouzdanijom i ponovljivom metodom za određivanje granice plastičnosti. U ovom delu istraživanja izvršeno je poređenje alternativnih metoda dobijanja granice plastičnosti sa opitom valjanja. Alternativne metode ispitivanja granice plastičnosti koje se analiziraju su:

1. Ispitivanje sa konusom mase 240 g.
2. Ispitivanje sa konusom mase 400 g.
3. Metoda indeksa nagiba  $\beta$ .
4. Empirijski pristup zasnovan na nedreniranoj smičućoj čvrstoći.

Pored navedenih alternativnih metoda koje se analiziraju, Feng (2004) je predložio da se granica plastičnosti može odrediti pomoću standardnog konusa  $30^\circ/80g$ . Prilikom ispitivanja granice plastičnosti koristila bi se posuda prečnika 20 mm i dubine 20 mm. Za razliku od granice tečenja granica plastičnosti bi se odredila pri dubini penetracije od  $h = 2$  mm. Sivakumar i sar. (2009) predložili su primenu dodatne sile od 54 N na standardni konus mase 80g i ugla od  $30^\circ$ , gde bi se pomoću pneumatskog sistema granica plastičnosti odredila na penetraciji od 20 mm.

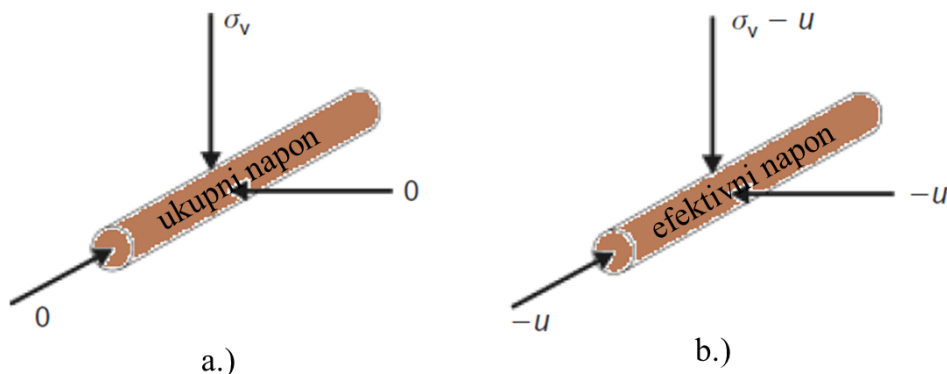
Metoda valjanja je izrazito subjektivna i zavisi od osobe koja je izvodi (Slika D.1.1). Prema Whyte (1982), tokom ovog ispitivanja uzorak tla je izložen određenim naprezanjima. Rezultat dobijene granice plastičnosti pre svega zavisi od više faktora:

- pritisak koji se primenjuje tokom oblikovanja „valjka“ između ruke i uzorka,
- pritisak između uzorka i staklene ploče,
- ugao i geometrija između uzorka i ruke,
- brzina izvođenja ispitivanja.



Slika D.1.1. Postupak izvođenja opita valjanja

Prema Haigh i sar. (2013) pritisak ruke koji deluje na uzorak predstavljen je naponima. Napon smicanja koji se javlja je veoma mali u poređenju sa vertikalnim naponom. Ukupni i efektivni napon koji deluju na ispitivani uzorak mogu se prikazati Slikom D.1.2.



Slika D.1.2. Ukupni i efektivni naponi tokom metode valjanja (Haigh i sar., 2013)

## D.2. Alternativne metode za dobijanje granice plastičnosti

Cilj ovog dodatka je da se alternativne i nestandardizovane metode za određivanje granice plastičnosti porede sa standardnom metodom valjanja i da se pokaže njihova pouzdanost i primenljivost.

Prva navedena alternativna metoda je predložena od strane Wood i Wroth (1978). Za određivanje granice plastičnosti koristili su konus težine 240 g i ugla od 30°. Oni su granicu plastičnosti računali prema sledećoj jednačini:

$$w_P = w_L - \frac{\Delta w}{\log \frac{m_2}{m_1}} \quad (D1)$$

Gde su:

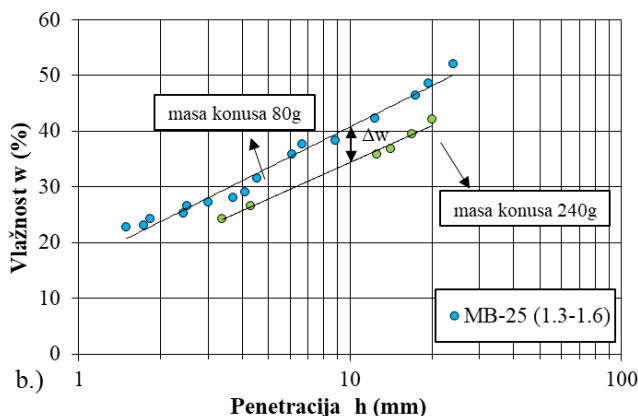
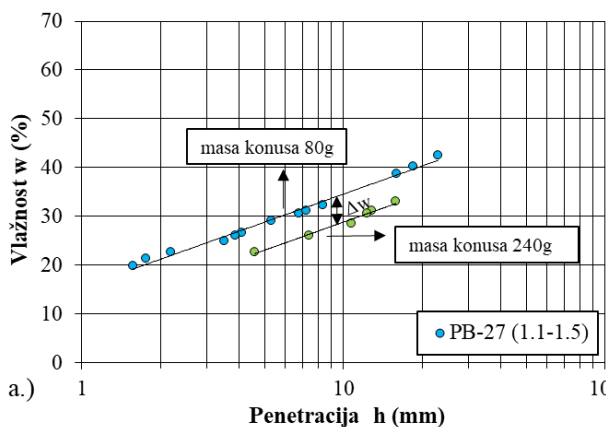
$w_P$  – granica plastičnosti,

$w_L$  – granica tečenja,

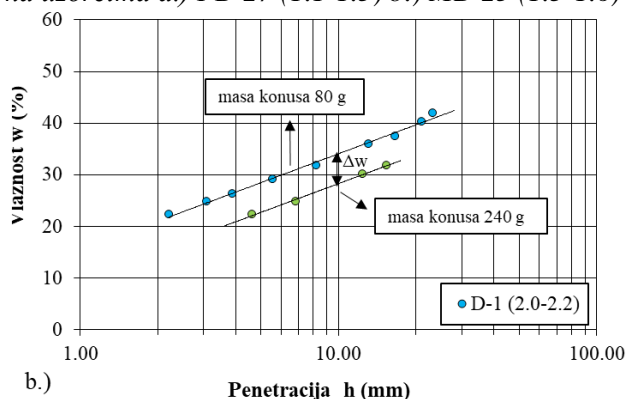
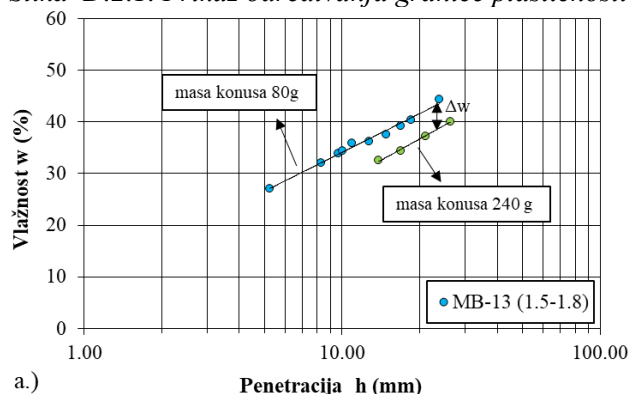
$\Delta w$  – razlika u vlažnosti i

$m_1$  i  $m_2$  – konusi različitih masa (80g i 240g).

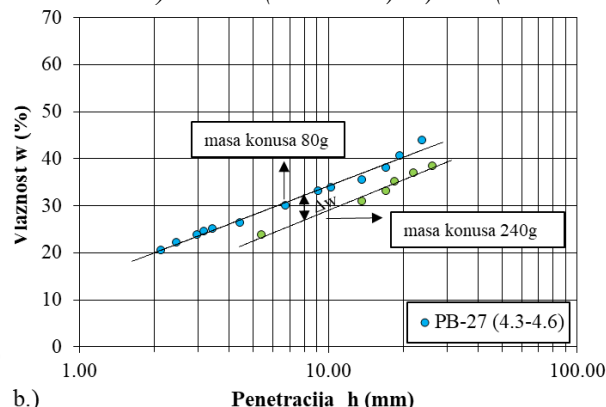
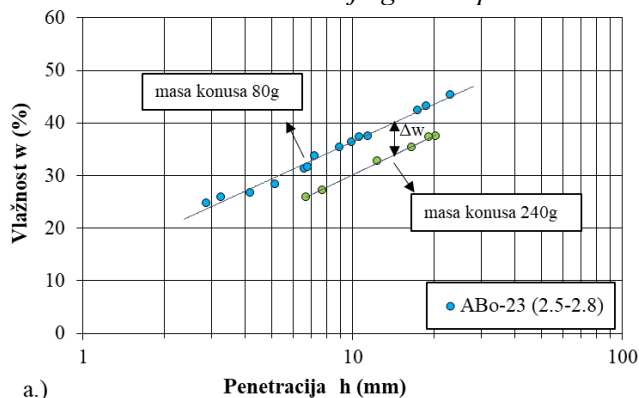
Na logaritamskom dijagramu se dobijaju dve paralelne krive. Granica plastičnosti se računa na osnovu razlike vlažnosti koja se dobije prilikom merenja penetracije koja se ostvari za konus 30°/80 g i 30°/240g. Na osnovu konusa od 240g za sve uzorke je ispitana granica plastičnosti čiji su dijagrami prikazani na Slici D.2.1-D.2.4.



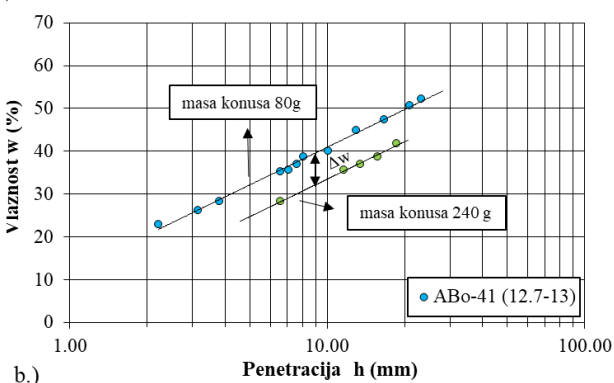
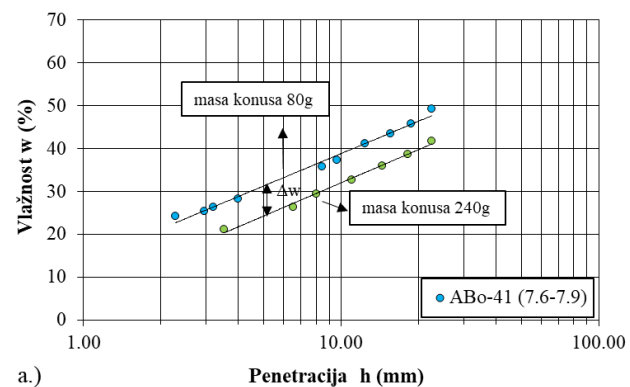
Slika D.2.1. Prikaz određivanja granice plastičnosti na uzorcima a.) PB-27 (1.1-1.5) b.) MB-25 (1.3-1.6)



Slika D.2.2. Prikaz određivanja granice plastičnosti na uzorcima a.) MB-27 (1.5-1.8 m) b.) D-1 (2.0-2.2 m)



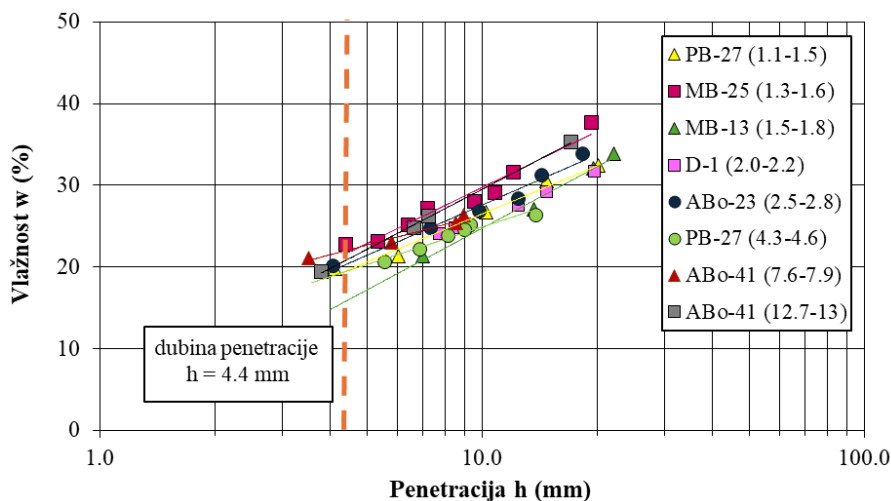
Slika D.2.3. Prikaz određivanja granice plastičnosti na uzorcima a.) ABo-23 (2.5-2.8 m) b.) PB-25 (4.3-4.6 m)



Slika D.2.4. Prikaz određivanja granice plastičnosti na uzorcima a.) ABo-41 (7.6-7.9 m) b.) ABo-41 (12.7-13.0 m)

Standardni opit valjanja daje vrednosti granice plastičnosti  $w_p$  u opsegu od 19 do 24 %, dok se vrednosti granice plastičnosti  $w_p$  dobijene metodom padajućeg konusa mase 240g kreću u opsegu od 19 do 22 % (Tabela D.2.1). Metoda padajućeg konusa mase 240g daje nešto niže vrednosti u odnosu na standardni opit valjanja.

Druga alternativna metoda za ispitivanje granice plastičnosti je primena tega od 400g. Prema Sharma i Bora (2003) granica plastičnosti se određuje pri dubini penetracije od  $h = 4.4$  mm korišćenjem konusa mase 400 g. Ispitivani uzorci su prikazani na Slici D.2.5.



Slika D.2.5. Određivanje granice plastičnosti primenom konusa od 400 g

Dobijeni rezultati granice plastičnosti (Tabela D.2.1) u velikoj meri prate vrednosti dobijene ostalim alternativnim metodama, osim kod uzorka MB-13 (1.5–1.8 m), koji pokazuje znatno nižu vrednost. Ovoj uzorak je veoma mekan, ima prirodnu vlažnost veću od ostalih ispitanih uzorka i njegova nedrenirana smičuća čvrstoća je veoma mala. Razlike između ove metode i standardne metode valjanja kreću se u opsegu od 1 do 4 %, osim kod uzorka MB-13 (1.5–1.8 m), gde razlika dostiže 12 %.

Treći pristup se zasniva na zavisnosti penetracije konusa  $h$  i vlažnosti  $w$ , na osnovu kojeg se izračunava indeks penetracije konusa  $\beta$ . Detaljna analiza je sprovedena u Poglavlju 7.2.1. na dva tipa konusa:  $30^\circ/80g$  i  $60^\circ/60g$ . Dijagrami su prikazani na Slikama 7.1 i 7.2, iz kojih su određene vrednosti parametara  $C_0$  i  $\beta$  (detalji su prikazani u Tabeli 7.3.). Vrednosti granice plastičnosti izračunate su pomoću jednačina 7.3 i 7.4. Prednost ove metode ogleda se u činjenici da se granica plastičnosti određuje na osnovu celokupne relacije između penetracije konusa i vlažnosti tla, a ne na osnovu jednog pojedinačnog merenja. Time se smanjuje uticaj eksperimentalnih grešaka i povećava pouzdanost dobijenih rezultata. Dodatno, indeks penetracije konusa  $\beta$  predstavlja parametar koji opisuje osetljivost tla na promenu vlažnosti, čime ova metoda omogućava i dublju interpretaciju mehaničkog ponašanja sitnozrnih tla. Rezultati su prikazani u Tabeli D.2.1 gde su posebno razmatrane vrednosti za oba tipa konusa.

Četvrta metoda je zasnovana na empirijskom pristupu na osnovu nedrenirane smičuće čvrstoće (Poglavlje 9.1.). Kroz analizu nedrenirane smičuće čvrstoće za oba tipa konusa,  $30^\circ/80g$  i  $60^\circ/60g$ , dobijena je jednačina za računanje granice plastičnosti  $w_{p100}$  (Jednačina 9.7 i 9.8). Nedrenirana smičuća čvrstoća izračunata je za različite vlažnosti, nakon čega je vrednost nedrenirane smičuće čvrstoće podeljena sa 1.6 kPa, što odgovara nedreniranoj smičuće čvrstoći pri granici tečenja

(Poglavlje 9.1, Slika 9.3.). Pošto su dobijene jednačine 9.7 i 9.8 gotovo identične, koeficijent je zaokružen na 0.5, a tako dobijene vrednosti granice plastičnosti prikazane su u Tabeli D.2.1.

Tabela D.2.1. Vrednosti granice plastičnosti dobijena različitim metodama

Uzorak (m)	Metoda valjanja	Granica plastičnosti $w_P$ (%)				
		Metoda konusom mase 240 g	Metoda konusom mase 400 g	Indeks $\beta$ za konus 30°/80g	Indeks $\beta$ za konus 60°/60g	Empirijski pristup
PB-27 (1.1-1.5)	19	20	20	22	23	20
MB-25 (1.3-1.6)	23	20	22	24	25	24
MB-13 (1.5-1.8)	24	21	12	21	20	21
D-1 (2.0-2.2)	22	19	19	22	22	22
ABo-23 (2.5-2.8)	24	19	20	22	23	21
PB-27 (4.3-4.6)	21	21	19	21	21	23
ABo-41 (7.6-7.9)	22	22	22	23	24	25
ABo-41 (12.7-13)	23	21	22	23	26	20

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da alternativne metode određivanja granice plastičnosti zasnovane na penetraciji konusa predstavljaju značajan potencijal za objektivnije i ponovljivije određivanje ovog parametra u odnosu na standardni opit valjanja. Rezultati pokazuju da sve analizirane metode daju vrednosti granice plastičnosti koje su u dobrom slaganju sa referentnom metodom, pri čemu se odstupanja u većini slučajeva kreću u rasponu od približno 1 do 5 %.

Najbolje slaganje sa standardnom metodom pokazuje metoda zasnovana na indeksu penetracije konusa  $\beta$ . Ova metoda omogućava određivanje granice plastičnosti na osnovu relacije između penetracije konusa i vlažnosti tla, pri čemu se koristi veći broj eksperimentalnih tačaka. Na taj način se smanjuje uticaj pojedinačnih merenja i povećava pouzdanost dobijenih rezultata. Odstupanje između standardne metode valjanja i metoda indeksa nagiba  $\beta$  iznosi oko 2 %, gde se razlika primenom konusa 30°/80g kreće u opsegu od 0.4 % do 3.4 %, a primenom konusa 60°/60g se kreće u opsegu od 0.2 % do 4 %.

Empirijski pristup zasnovan na nedreniranoj smičućoj čvrstoći takođe daje zadovoljavajuće rezultate, sa apsolutnim odstupanjem od približno 2–3 %. Prednost ovog pristupa je u tome što povezuje granicu plastičnosti sa mehaničkim parametrom tla, čime se dodatno naglašava fizička osnova određivanja granica konzistencije.

Metode koje koriste konuse većih masa (240 g i 400 g) pokazuju nešto veća odstupanja u pojedinim slučajevima, posebno kod uzoraka sa većom prirodnom vlažnošću i manjom nedreniranom smičućom čvrstoćom. Kada se koristi konus od 400g kod mekih materijala, razlike u granici plastičnosti u odnosu na druge metode su mnogo veće, te se iz tih razloga primena ovog konusa ne preporučuje za mekane materijale. Ipak, i ove metode pokazuju relativno dobru podudarnost sa referentnim rezultatima i mogu predstavljati jednostavnu eksperimentalnu alternativu standardnom opitu valjanja.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da metode zasnovane na penetraciji konusa, a posebno metoda indeksa penetracije  $\beta$ , predstavljaju obećavajući pristup za određivanje granice plastičnosti. Njihova osnovna prednost ogleda se u većoj objektivnosti, boljoj ponovljivosti i mogućnosti mehaničke interpretacije rezultata, što može doprineti unapređenju laboratorijskih postupaka određivanja granica konzistencije sitnozrnih tla.

Dalja istraživanja trebalo bi da obuhvate veći broj tipova sitnozrnih tla, naročito materijale čija je granica tečenja veća od 50 %, kako bi se dodatno potvrdila primenljivost ovih metoda u širem geotehničkom kontekstu.

## BIOGRAFIJA

Tina Đurić je rođena 20.01.1991. godine u Loznici. Osnovnu školu „Kadinjača“ i srednju školu Gimnazija „Vuk Karadžić“ završila je u Loznici. Smer za Geotehniku na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je školske 2011/2012. godine, a četiri godine kasnije diplomirala sa prosečnom ocenom 8,77 i odbranom završnog rada pod nazivom „Geotehnička istraživanja terena za potrebe izgradnje mosta preko Kameničke reke u Velikoj Kamenici“, ocenjenog sa 10 (deset).

Master akademske studije završila je školske 2015/2016. godine odbranom master rada pod nazivom „Geotehnički uslovi plitkog fundiranja na osnovu rezultata SPT i CPT opita primenom EC 7 standarda na području Beograd na vodi“, ocenjenog sa 10 (deset), sa opštim prosekom 9,20.

Doktorske studije upisala je školske 2016/2017. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na studijskom programu Geotehnika, gde je zaključno sa školskom 2020/2021. godinom položila sve ispite predviđene studijskim planom i programom sa opštom prosečnom ocenom 10,00.

Nakon završetka master studija, 2016. godine počela je sa radom kao saradnik u nastavi na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu, gde je naredne dve godine bila angažovana na održavanju vežbi iz predmeta „Inženjerska geologija“ na osnovnim akademskim studijama. Od 2017. godine zaposlena je kao istraživač na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, pri Departmanu za Geotehniku. Svoj rad započela je u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (TR 36014) pod nazivom „Geotehnički aspekti istraživanja i razvoja savremenih tehnologija građenja i sanacija deponija komunalnog otpada“, a trenutno svoja istraživanja realizuje u okviru projekta finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (evidencioni broj: 451-03-33/2026-03/200126).

Učesnik je brojnih naučnih i stručnih skupova iz oblasti geotehničkog inženjerstva, gde je kao autor ili koautor objavila više naučnih i stručnih radova u međunarodnim i nacionalnim časopisima. Kao član organizacionog odbora učestvovala je na nekoliko naučnih konferencija i skupova.

Pored naučno-istraživačkog rada, bavi se i stručnim radom u rešavanju različitih problema iz oblasti geotehničkog inženjerstva (geotehnička istraživanja i ispitivanje tla, laboratorijska geomehanička ispitivanja, zaštita životne sredine itd.).

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Tina D. Đurić

Broj indeksa G 805/16

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

GEOTEHNIČKO MODELIRANJE NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO  
PREKONSOLIDOVANOG TLA PRIMENOM NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, 31.03.2026.

Tina Đurić

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Tina D. Đurić

Broj indeksa G 805/16

Studijski program Geotehnika

Naslov rada GEOTEHNIČKO MODELIRANJE  
NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO PREKONSOLIDOVANOG TLA  
PRIMENOM NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE

Mentor dr Dragoslav Rakić, redovni profesor

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis autora**

U Beogradu, 31.03.2026.

Tina Đurić

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### GEOTEHNIČKO MODELIRANJE NORMALNO KONSOLIDOVANOG I SLABO PREKONSOLIDOVANOG TLA PRIMENOM NEDRENIRANE SMIČUĆE ČVRSTOĆE

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorsvo (CC BY)
2. Autorsvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorsvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorsvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorsvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorsvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.  
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

**Potpis autora**

U Beogradu, 31.03.2026.

Jana Đurić

1. **Autorsvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorsvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorsvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorsvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuiše pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorsvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorsvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopšavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuiše pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.