

Primljen / Received: 26.7.2022.

Ispravljen / Corrected: 27.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 30.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.8.2023.

Utjecaj mineralogije gline na nedreniranu posmičnu čvrstoću pomoću pokusa s padajućim šiljkom

Autor:

Izv.prof.dr.sc. **Eyyüb Karakan**, dipl.ing.grad.

Sveučilište Kilis 7 Aralık, Kilis, Turska

Odjel za građevinarstvo

eyyubkarakan@kilis.edu.tr

Autor za korespondenciju

Izvorni znanstveni rad

Eyyüb Karakan

Utjecaj mineralogije gline na nedreniranu posmičnu čvrstoću pomoću pokusa s padajućim šiljkom

Granice konzistencije su osnovni parametri koji se primjenjuju kao standardni ulazni podaci za bilo koji program istraživanja tla za procjenu geotehničkih svojstava sitnozrnatog tla. Primarni je cilj ovog rada istražiti varijabilnost u nedreniranoj posmičnoj čvrstoći glina s različitim svojstvima plastičnosti na temelju udjela finih čestica, mineralogije gline i sposobnosti apsorpcije vode. Kako bi se postigao taj cilj, provedena su 33 pokusa s padajućim šiljkom na mješavinama gline niske, visoke i vrlo visoke plastičnosti. Različite mješavine različite plastičnosti osigurane su pripremom smjesa Na-montmorilonita (NaM)/Ca-montmorilonita (CaM), Na-montmorilonita (NaM)/kaolinita (K), i Na-montmorilonita (NaM)/sepiolita (S). Prema eksperimentalnim rezultatima, najviša granica tečenja (LL) dobivena je u 100 % NaM gline pri 255,07 %, dok je najniža LL dobivena u 100 % S gline pri 33,55 %. Najveća nedrenirana posmična čvrstoća dobivena je na 160 kPa pri 30 % vlažnosti u 100 % NaM gline, a najmanja nedrenirana posmična čvrstoća dobivena je na 10 kPa pri 100 % S gline pri istoj vlažnosti. Stoga, na temelju eksperimentalnog okvira, dobivene su empirijske jednadžbe koje se mogu primijeniti za utvrđivanje odnosa između prodiranja šiljka i vlažnosti, granice tečenja i udjela gline te nedrenirane posmične čvrstoće i prodiranja šiljka.

Ključne riječi:

Atterbergove granice, nedrenirana posmična čvrstoća, mineralogija gline, pokus s padajućim šiljkom

Original research paper

Eyyüb Karakan

Influence of clay mineralogy on undrained shear strength using Fall cone test

Consistency limits are the basic parameters used as standard inputs for any soil investigation program to evaluate the geotechnical properties of fine-grained soils. The primary objective of this study is to investigate the variations in the undrained shear strength of clays with different plasticity properties based on the fine content, clay mineralogy, and water absorption capacity. To achieve this objective, 33 Fall cone tests were conducted on low-, high-, and very high-plastic clay mixtures. Various blends of different plasticity were ensured by preparing mixtures of Na-montmorillonite (NaM)/Ca-montmorillonite (CaM), Na-montmorillonite (NaM)/Kaolinite (K), and Na-montmorillonite (NaM)/Sepiolite (S). According to the experimental results, the highest liquid limit (LL) was obtained in 100 % NaM clay at 255.07 %, whereas the lowest LL was obtained in 100 % S clay at 33.55 %. Similarly, the highest undrained shear strength was obtained at 160 kPa at 30 % water content in the 100 % NaM clay, whereas the lowest undrained shear strength was obtained at 10 kPa in the 100 % S clay at the same water content. Consequently, based on an experimental framework, empirical equations were obtained which could be used to establish the relationships among cone penetration-water content, liquid limit-clay content, and undrained shear strength-cone penetration.

Key words:

Atterberg limits, undrained shear strength, clay mineralogy, fall cone test

1. Uvod

Minerali gline su vrlo male veličine, a kristalna struktura im je elektrokemijski vrlo aktivna. Stoga, ista količina gline može uzrokovati značajne promjene u tehničkim svojstvima tla zbog njihovih različitih mineraloških svojstava. Ako je postotak gline u granicama između 25-35 %, većina krupnozrnatih čestica (pijesak ili šljunak) u tlu će plutati u matrici koju tvori glina, a takve krupnozrnate čestice slabo utječu na cjelokupna tehnička svojstva [1]. Još jedna važna značajka glinenih tala je ta da, dok prisutnost vode značajno utječe na cjelokupno ponašanje glina, njezin utjecaj na raspodjelu veličine zrna je manje značajan. Nasuprot tome, oblik i veličina zrna bitno utječu na ponašanje krupnozrnatih tala, dok je utjecaj vode na takva tla manje važan. Kao što je prikazano na slikama 1.a do 1.d (Ca-montmorilonit/Na-montmorilonit (CaM-NaM), analiza pretražnom elektronskom mikroskopijom (SEM), kristali montmorilonita mogu biti iznimno mali, ali stvarati izrazito visoke privlačne sile. S povećanjem vlažnosti u glinama s montmorilonitom značajno se povećava potencijal bubrenja između slojeva. Gline s različitim mineraloškim svojstvima, kao što su montmorilonit i bentonit, imaju različite bilance naboja i stoga imaju različite tendencije privlačenja zamjenjivih kationa [2]. To objašnjava bitno veći afinitet montmorilonitne gline za zamjenjive katione od kaolinita.

Struktura sitnozrnatog tla značajno utječe na tehničko ponašanje. Trag naprezanja utječe na formiranje kombinacija prirodnih mješavina gline. Odnos između mikro i makro

Popis kratica i oznaka koje se koriste u članku

β	- nagib prilagođenog pravca
A	- djelovanje
C_o	- presjek vode pri $d=1$ mm
CF	- frakcija gline
d	- prodiranje šiljka [mm]
K	- faktor šiljka
I_L	- indeks tečenja
I_{LN}	- logaritamski indeks tečenja
LL	- granica tečenja [%]
m	- masa (80 g)
PL	- granica plastičnosti [%]
PI	- indeks plastičnosti [%]
R_p	- omjer plastičnosti (PL/LL)
R^2	- koeficijent determinacije
R_s	- omjer čvrstoće
P_r	- omjer plastičnosti (PI/PL)
S_u	- nedrenirana posmična čvrstoća [kPa]
S_{uLL}	- nedrenirana posmična čvrstoća na granici tečenja [kPa]
S_{uPL}	- nedrenirana posmična čvrstoća na granici plastičnosti [kPa]
S_t	- omjer osjetljivosti
w	- vlažnost [%]
WCR	- omjer vlažnosti

ponašanja gline dosad su istraživali mnogi istraživači [2-6]. U tlu je struktura definirana tako da uključuje teksturu ili geometrijski raspored zrna i/ili mineralnih čestica i sile između zrna. U ovom slučaju tekstura tla definira samo geometrijski raspored zrna. Budući da je površinska aktivnost svakog zrna izrazito niska u krupnozrnatim tlima, sile između zrna također su izrazito niske. Stoga su definicije teksture i strukture za krupnozrnata tla jednake. Nasuprot tome, međuzrnske sile u glinenim tlima prilično su visoke. Stoga su i međuzrnske sile i tekstura tla komplementarne definicije.

Primarni je cilj ovog istraživanja ispitati na koji način fizikalna svojstva glinenog tla utječu na nedrenirane posmične čvrstoće glina s različitim mineraloškim svojstvima. Ta fizikalna svojstva uključuju vlažnost, omjer vlažnosti, Atterbergove granice, indeks tečenja i logaritam indeksa tečenja. U tom su kontekstu procijenjene Atterbergove granice za različite mješavine gline s tri različite razine plastičnosti i za gline navedene u literaturi. Podaci dobiveni u eksperimentalnom ispitivanju i rezultati prethodno objavljenih istraživanja uspoređeni su kako bi se razjasnilo ponašanje glina s različitim mineraloškim svojstvima. Odnosi između nedrenirane posmične čvrstoće, Atterbergovih granica, udjela gline i vrsta gline detaljno su ispitani.

2. Pregled literature

Prema britanskoj normi BS1377-1990 [7], dubina prodiranja šiljka od 20 mm u pokusu s padajućim šiljkom definirana je kao granica tečenja (engl. *Liquid limit* - LL) sitnozrnatog tla. Mnogi istraživači [8-17] preporučuju univerzalno usvajanje pokusa s padajućim šiljkom za definiranje LL-ova glina. U ovom radu, vlažnost koja je potrebna za prodiranje šiljka od 2 mm u pokusu s padajućim šiljkom, prema prijedlogu autora Hansboa [17], prihvaćena je kao granica plastičnosti (engl. *Plastic limit* - PL). Wroth i Wood [18] pokazali su da je $(S_u)_{PL}/(S_u)_{LL}$ bio 100. Nagaraj i sur. [10] eksperimentalno su utvrdili da S_u vrijednosti koje odgovaraju vlažnosti pri LL nisu konstantne. Nagaraj i sur. [10] primijetili su da su se dobivene S_u vrijednosti razlikovale pri primjeni različitih metoda. Metoda pokusa s padajućim šiljkom može se primijeniti za dobivanje S_u vrijednosti u mnogim tlima, kao što su CH, CL, ML i MH tla. Hansbo [17] je predložio izraz (1) za izračunavanje nedrenirane posmične čvrstoće (S_u) sitnozrnatih tala primjenom pokusa s padajućim šiljkom.

$$S_u = K \cdot \left(\frac{mg}{d^2} \right) \text{ [kPa]} \quad (1)$$

pri čemu je K faktor šiljka (0,867), m je masa (80 g), g je gravitacijsko ubrzanje (9,81 m/s²), a d je prodiranje šiljka (mm). Odnos između vlažnosti, indeksa tečenja i nedrenirane posmične čvrstoće tla proučavali su mnogi istraživači [11, 12, 20]. Međutim, dvologaritamski grafički prikaz indeksa tečenja i nedrenirane snage neizbježno će postići nedefinirane vrijednosti kako se vrijednost PL približava, jer je $\log 0 \rightarrow -\infty$. Koumoto i Houlsby [20] objašnjavaju da se pri primjeni modela

snage mora definirati "logaritamski indeks tečenja". Indeks tečenja (I_L) i logaritamski indeks tečenja (I_{LN}) izračunavaju se pomoću izraza (2) odnosno izraza (3). Granice tečenja i plastičnosti tla primijenjene su za izračun indeksa plastičnosti, koji se empirijski može povezati s mnogim svojstvima tla. Indeks plastičnosti primijenjen je za predviđanje nedrenirane posmične čvrstoće tla. Nedrenirana posmična čvrstoća gline povezana je s indeksom tečenja I_L , koji je definiran u izrazu (2). Indeks tečenja je identifikator konzistencije tla i može se empirijski povezati s nedreniranom posmičnom čvrstoćom, dinamičkim svojstvima i karakteristikama tlaka. Stoga konzistencija ima značajnu ulogu tijekom odabira modela koji se primjenjuju u modeliranju ponašanja naprežanja i deformacija. Štoviše, polulogaritamski model može se primijeniti za utvrđivanje generalizirane

jednadžbe između nedrenirane posmične čvrstoće i indeksa tečenja. Analiza eksperimentalnih rezultata otkrila je da podaci nisu pokazali linearno ponašanje. Stoga bi se za linearizaciju podataka trebala primijeniti dvostruka logaritamska os. Međutim, dvologaritamski grafički prikaz indeksa tečenja i nedrenirane posmične čvrstoće neizbježno će biti neidentificiran kako se vrijednost PL približava nuli. Stoga, ako se upotrebljava model snage, "logaritamski indeks tečenja" mora biti definiran kao u izrazu (3).

$$I_L = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (2)$$

$$I_{LN} = \frac{\ln(w / PL)}{\ln(LL / PL)} \quad (3)$$

Tablica 1. Ovisnost nedrenirane posmične čvrstoće o fizikalnim svojstvima glina

Izraz br.	Autori	Izraz
1	Whyte [21]	$S_u = 1.6e^{4.23(1-I_L)}$
2	Federico [23]	$S_u = e^{5.25\left(1.161\frac{w}{LL}\right)}$
3	Locat i Demers [26]	$S_u = \left(\frac{19.8}{I_L}\right)^{2.64}$
4	Terzaghi i sur. [34]	$S_u = 2(I_L)^{-2.80}$
5	Koumoto i Houlsby [21]	$S_u = e^{\left(\frac{1.070-I_{LN}}{0.217}\right)}$
6	Lee [29]	$S_u = 182.93e^{-2.3714\left(\frac{w}{LL}\right)}$
7	Berilgen i sur. [30]	$S_u = 145e^{-2.86\left(\frac{w}{LL}\right)}$
8	Berilgen i sur. [30]	$S_u = 28e^{-1.33I_L}$
9	Edil i Benson [31]	$S_u = 144.9e^{-1.72I_L}$
10	Edil i Benson [31]	$S_u = 191.4e^{-(0.33LL)}$
11	Shimobe [35, 36]	$S_u = 98.S_r.exp\left[\ln\left\{\frac{0.4755}{\left(I_L + 0.5012(1-I_L)\right)}\right\} / 0.19\right]$
12	O'Kelly [37]	$\log S_u = \log(S_{uLL}) + \left(\frac{\log R_s}{\log\left(\frac{LL}{PL}\right)}\right) \cdot \log\left(\frac{1}{WCR}\right)$
13	Vardanega i Haigh [11]	$\log_{10}(S_{u,C}) = 2.662 - 2.432\left[\frac{w}{LL}\right]$
14	Cangir i Dipova [38]	$S_u = -41\ln(I_L) + 19.41$
15	Kang i sur. [39]	$S_u = 1.71(WCR) - 4, 1$
16	Sharma i Sridharan [40]	$\log(S_{u,C} / 1.7) = \log(1.04) - 4.9\log(WCR)$
17	Karakan i sur. [17]	$S_u = 210.51e^{-4.516I_L}$
18	Karakan i sur. [17]	$S_u = 119.62e^{-4.533I_L}$

Mnogi su istraživači pomoću empirijskih jednadžbi dobili različite oblike odnosa između vlažnosti, omjera vlažnosti, granice tečenja, indeksa tečenja i indeksa konzistencije na temelju nedrenirane posmične čvrstoće [21-33]. Ti su odnosi sažeti u tablici 1.

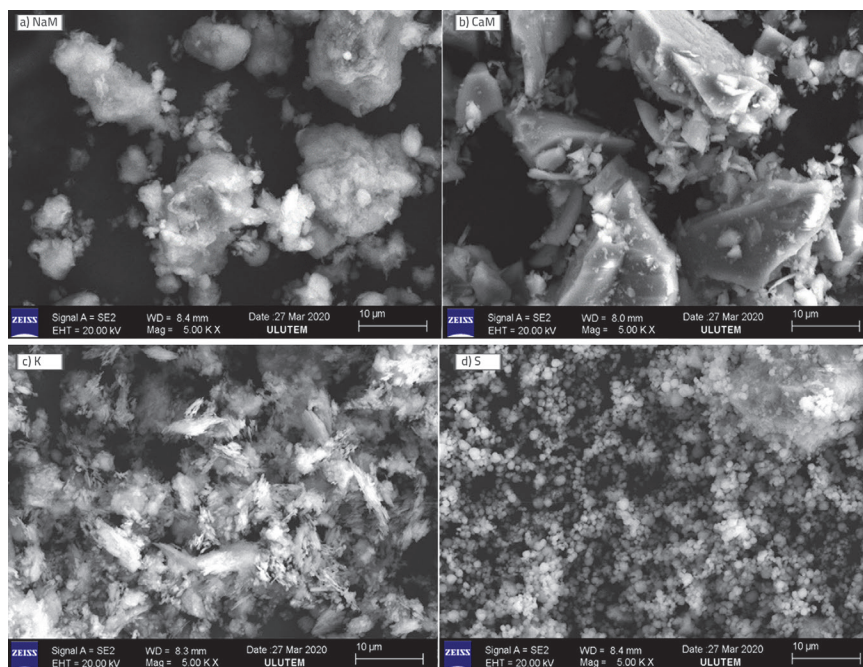
3. Materijali i metode

Sva tla upotrijebljena u ovom istraživanju nastala su od dvokomponentnih mješavina visokoplastične gline Na-montmorilonita (*NaM*) s Ca-montmorilonit (*CaM*), kaolinit (*K*) i sepiolit (*S*) glinom. Kao primarni materijal za ovo istraživanje odabran je *NaM* jer pokazuje najveću plastičnost i djelovanje. Mikrostrukturalna svojstva *NaM*, *CaM*, *K* i *S* gline određena su pretražnom elektronskom mikroskopijom – energetsko disperzivnom rendgenskom analizom (SEM–EDX). Slika 1. prikazuje SEM fotografije *NaM*, *CaM*, *K* i *S* glina

primijenjenih u ovom istraživanju. Kemijska svojstva gline upotrijebljene u ovom radu sažeta su u tablici 2. Raspodjela veličine zrna svih glina prikazana je na slici 2.

Pokus s padajućim šiljkom proveden je pomoću opreme i postupaka u skladu s britanskom normom BS 1377-1990 [7]. Primijenjena je standardna posudica za uzorke promjera 55 mm i dubine 40 mm. Vlažnost je određena pomoću prodiranja između 5 i 30 mm za šiljak od 80 g s kutom vrha od 30°. Prema BS 1377-1990 [7], granica tečenja u tlu definirana je kao vlažnost koja odgovara prodiranju šiljka od 20 mm.

U tom kontekstu, proveden je pokus s padajućim šiljkom kako bi se dodatno procijenili odnosi između fizikalnih svojstava (Atterbergove granice, vlažnost, omjer vlažnosti, indeks tečenja i logaritamski indeks tečenja) i nedrenirane posmične čvrstoće glinenih mješavina s različitim razinama



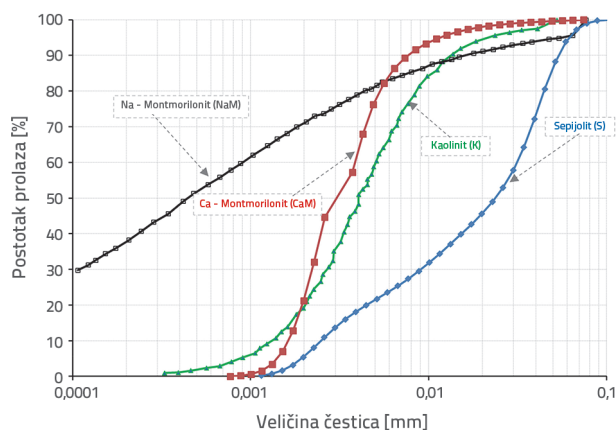
Slika 1. SEM fotografije: a) Na-montmorilonita (*NaM*); b) Ca-montmorilonita (*CaM*); c) kaolinita (*K*); d) sepiolita (*S*)

plastičnosti i mineraloških svojstava. Svi su eksperimenti izvedeni na dvokomponentnim mješavinama, pri čemu je udio *NaM*, koji se nalazi u svim mješavinama, bio od 0 do 100 % u intervalima od 10 %. Sve mješavine i odgovarajući rezultati ispitivanja primijenjeni u eksperimentima navedeni su u tablici 3.

Kako bi se pokazala ponovljivost eksperimentalnih rezultata, uloženi su značajni naponi u pripremu ispitnih uzoraka. Sličan postupak primijenjen je na metodu pripreme uzorka za sve mješavine u pokusu s padajućim šiljkom. Za potrebe eksperimenta gline su najprije sušene u pećnici najmanje 24 sata na 110°C, a zatim su pripremljene suhe mješavine. Suho miješanje trajalo je najmanje 10 minuta dok mješavina nije postala potpuno homogena. Na kraju je suhoj mješavini dodana voda i mješavina je 24 sata držana u eksikatoru.

Tablica 2. Kemijska analiza *NaM*, *CaM*, *K* i *S* gline

Minerali	<i>NaM</i>	<i>CaM</i>	<i>K</i>	<i>S</i>
SiO ₂	83	72,2	50,7	47
Al ₂ O ₃	5,5	14	34	36
Fe ₂ O ₃	0,2	0,7	0,6	0,6
TiO ₂	0,05	0,05	0,8	0,8
CaO	0,4	1,1	0,6	0,6
MgO	2,10	3,2	0	1,4
Na ₂ O	0,15	0,25	0	0
K ₂ O	0,6	1	0	0
SO ₃	0	0	0,3	0,6



Slika 2. Raspodjela veličine zrna Na-montmorilonita (NaM), Ca-montmorillonita (CaM), kaolinita (K) i sepijilita (S)

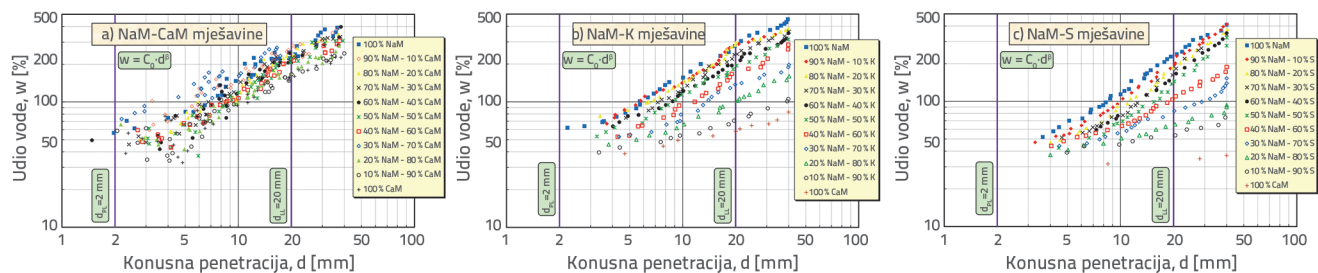
4. Procjena rezultata eksperimentalnih ispitivanja

4.1. Varijacije prodiranja šiljka ovisno o vlažnosti

Nekoliko je istraživača eksperimentalno ispitivalo odnos između prodiranja šiljka i vlažnosti kako bi odredili granice tečenja i plastičnosti kohezivnih tala primjenom pokusa s padajućim šiljkom [17, 21, 41–44]. U takvim se slučajevima ne može dobiti konstantna vrijednost prodiranja šiljka za različite tipove tla (prirodna tla, mješavine pijeska i gline, pjeskovita tla i glinena tla) s različitom vlažnosti. Gline različitih svojstava također pokazuju različitu sposobnost upijanja vode u tekućem i plastičnom stanju. Stoga se ne očekuje da će gline s različitim mineraloškim svojstvima imati jedinstvene vrijednosti prodiranja šiljka zbog različitih granica tečenja i plastičnosti [13–16, 21, 30, 45–47].

Tablica 3. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Mješavina br.	NaM [%]	S [%]	K [%]	CaM [%]	LL _c [%]	PL _c [%]	$PI = LL_c - PL_c$	$R_{pc} = PL_c / LL_c$	$Pr_c = PI / PL_c$	$\tan \alpha_c = PI_c / (LL_c - 20)$	G_s ρ_s [g/cm ³]	Frakcija gline, CF [%]	Djelovanje (A)	C_0	β	R^2
1	100	0			255,07	68,99	186,08	0,270	0,371	0,792	2,350	71,35	2,61	15,304	0,900	0,994
2	90	10			204,49	62,94	141,55	0,308	0,445	0,767	2,355	64,75	2,19	12,264	0,938	0,991
3	80	20			183,80	58,39	125,41	0,318	0,466	0,766	2,360	58,15	2,16	10,608	0,949	0,990
4	70	30			174,05	52,60	121,45	0,302	0,433	0,788	2,365	51,55	2,36	8,922	0,983	0,973
5	60	40			162,41	49,32	113,10	0,304	0,436	0,794	2,370	44,95	2,52	7,434	1,028	0,997
6	50	50			142,50	47,27	95,23	0,332	0,496	0,777	2,375	38,35	2,48	7,652	0,970	0,976
7	40	60			103,89	39,33	64,57	0,379	0,609	0,770	2,380	31,76	2,03	15,935	0,635	0,974
8	30	70			82,42	38,36	44,07	0,465	0,870	0,706	2,385	25,16	1,75	16,407	0,554	0,967
9	20	80			62,82	37,65	25,17	0,599	1,496	0,588	2,390	18,56	1,36	21,847	0,369	0,979
10	10	90			54,48	34,66	19,83	0,636	1,748	0,575	2,395	11,96	1,66	25,138	0,271	0,949
11	0	100			33,55	30,51	3,04	0,909	10,023	0,225	2,400	5,36	0,57	25,719	0,095	0,969
12	100		0		255,86	67,42	188,44	0,264	0,358	0,799	2,350	71,35	2,64	27,519	0,759	0,990
13	90		10		252,38	64,50	187,88	0,256	0,343	0,809	2,360	66,31	2,83	25,742	0,768	0,986
14	80		20		239,56	65,26	174,30	0,272	0,374	0,794	2,370	61,27	2,84	26,286	0,749	0,973
15	70		30		239,56	65,85	173,71	0,275	0,379	0,791	2,380	56,22	3,09	20,934	0,793	0,987
16	60		40		193,40	60,58	132,81	0,313	0,456	0,766	2,390	51,18	2,59	22,236	0,734	0,991
17	50		50		180,89	51,47	129,42	0,285	0,398	0,804	2,400	46,14	2,80	21,011	0,727	0,991
18	40		60		154,47	49,84	104,63	0,323	0,476	0,778	2,410	41,10	2,55	16,522	0,755	0,991
19	30		70		121,08	48,69	72,39	0,402	0,673	0,716	2,420	36,06	2,01	18,224	0,646	0,974
20	20		80		99,18	41,03	58,15	0,414	0,706	0,734	2,430	31,02	1,87	18,461	0,573	0,980
21	10		90		70,30	39,17	31,13	0,557	1,258	0,619	2,440	25,97	1,20	22,638	0,392	0,967
22	0		100		58,20	38,36	19,84	0,659	1,934	0,519	2,450	20,93	0,95	23,057	0,322	0,969
23	100			0	255,57	68,00	187,57	0,266	0,363	0,796	2,350	71,35	2,63	31,213	0,693	0,955
24	90			10	239,71	66,35	173,36	0,277	0,383	0,789	2,350	66,34	2,61	31,405	0,688	0,941
25	80			20	224,65	65,96	158,69	0,294	0,416	0,775	2,350	61,32	2,59	19,373	0,823	0,969
26	70			30	217,91	55,57	162,35	0,255	0,342	0,820	2,350	56,31	2,88	20,992	0,792	0,969
27	60			40	207,24	53,32	153,92	0,257	0,346	0,822	2,350	51,30	3,00	20,859	0,772	0,907
28	50			50	196,56	52,27	144,29	0,266	0,362	0,817	2,350	46,29	3,12	16,442	0,834	0,926
29	40			60	184,84	51,96	132,88	0,281	0,391	0,806	2,350	41,27	3,22	20,396	0,748	0,964
30	30			70	176,27	50,98	125,30	0,289	0,407	0,802	2,350	36,26	3,46	20,110	0,606	0,905
31	20			80	166,02	49,74	116,28	0,300	0,428	0,796	2,350	31,25	3,72	21,554	0,688	0,918
32	10			90	150,79	47,04	103,74	0,312	0,453	0,793	2,350	26,24	3,95	20,317	0,680	0,891
33	0			100	148,28	47,97	100,31	0,324	0,478	0,782	2,350	21,22	4,73	21,698	0,648	0,877



Slika 3. Odnos prodiranja šiljka i vlažnosti za: a) NaM-CaM mješavine; b) NaM-K mješavine; c) NaM-S mješavine

Slika 3. prikazuje odnose između prodiranja šiljka i vlažnosti pomoću izraza (4) do (6) na temelju eksperimentalnih rezultata. Log-log odnos prikazan u izrazima (5) i (6), mješavine *NaM-CaM*, *NaM-K*, i *NaM-S* za prodiranja šiljka u rasponu od 1 do 40 mm i odgovarajuća vlažnost u rasponu od 30 do 500 %, prikazani su na slikama 2.a do 2.c. Slike 3.a, 3.b i 3.c pokazuju da postoji mogućnost ovisnosti koeficijenta prodiranja šiljka o mineralogiji tla, vrsti tla i plastičnosti tla.

Promjene u prodiranju šiljka s vlažnosti za *NaM-CaM*, *NaM-K* i *NaM-S* mješavine na bilogaritamskoj skali prikazane su u tablici 3. i slikama 3.a, 3.b i 3.c. Budući da *NaM-CaM* mješavine imaju izrazito visoku vlažnost, one variraju u užem pojasu u usporedbi s druge dvije mješavine (slika 3.a). U *NaM-CaM* mješavinama prikazanim na slici 3.a, vlažnost pri prodiranju od 20 mm varirala je između 180 % i 300 %. Nasuprot tome, u *NaM-K* mješavinama prikazanim na slici 3.b, promjena u vlažnosti s prodiranjem šiljka bila je u širem rasponu zbog nižeg vodnog kapaciteta kaolinske gline.

Kada je vlažnost 300 % pri prodiranju od 20 mm za *NaM*, ta vrijednost značajno opada s povećanjem udjela kaolinita u mješavini; prema tome, za 100 % udjela *K*, dobiva se vrijednost od 60 %. Isti odnos za *NaM-S* mješavine prikazan je na slici 3c; smanjenje vlažnosti je jasnije u usporedbi s druge dvije mješavine. U ovom slučaju, s povećanjem količine sepiolitne gline s najnižim afinitetom prema vodi po težini, zadržavanje vode se znatno smanjuje. Dakle, promjena vlažnosti bila je unutar širokog raspona. Slika 3.c pokazuje da se vlažnosti koja odgovara istom prodiranju za 100 % *S* smanjuje na otprilike 35 %. To pokazuje da smanjenje kapaciteta zadržavanja vode čini značajnu razliku za mješavine glina s različitim mineraloškim svojstvima.

LL ispitivanja glinenih mješavina primijenjenih u ovom istraživanju provedeni su pomoću standardnog britanskog šiljka (engl. *BS fall cone*) [7]. Pokus s padajućim šiljkom ima prednost u odnosu na Casagrandeovu metodu jer se granične vrijednosti tečenja i plastičnosti u pokusu s padajućim šiljkom mogu zajedno odrediti, a rezultati se mogu ponoviti. Odnosi između prodiranja šiljka (d) i vlažnosti (w) definirani su pomoću jednadžbe (4) prema Fengu [42, 48]:

$$w = C_0 \cdot d^\beta \quad (4)$$

pri čemu je C_0 presjek vlažnosti pri $d = 1$ mm, a β je nagib prilagođenog pravca. Prodiranje šiljka koja odgovara $d_{LL} = 20$

mm i $d_{PL} = 2$ mm pokazuje vrijednosti ograničenja tečenja (LL) i plastičnosti (PL) BS padajućeg šiljka [7]. Stoga su granične vrijednosti tečenja i plastičnosti padajućeg šiljka definirane u izrazima (5) i (6) prema [35]:

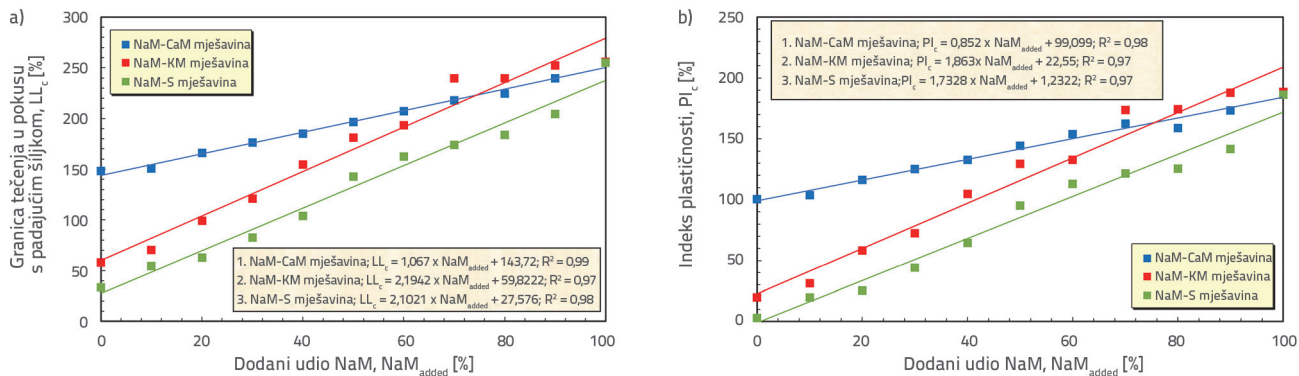
$$LL_c = C_0 \cdot (20)^\beta \quad (5)$$

$$PL_c = C_0 \cdot (2)^\beta \quad (6)$$

Koeficijenti C_0 i β za svaku mješavinu sa slika 3.a, 3.b i 3.c, koje su dobivene pomoću izraza (5) i (6), i odgovarajućih R^2 vrijednosti prikazane su u tablici 3. Za *NaM-S* mješavine, C_0 vrijednosti variraju između 7,434 i 25,719, a β vrijednosti variraju između 0,095 i 1,028. R^2 vrijednosti dobivene za *NaM-S* mješavine iznose najmanje 0,949, a najviše 0,997. C_0 vrijednosti dobivene za *NaM-K* mješavine iznose najviše 27.519, a najmanje 16.522, dok β vrijednosti iznose najviše 0,768, a najmanje 0,322. R^2 vrijednosti *NaM-K* mješavine iznose između 0,967 i 0,991. Konačno, C_0 vrijednosti u *NaM-CaM* mješavini iznosile su najmanje 16.442, a najviše 31.405, a β vrijednosti variraju između 0,606 i 0,823. R^2 vrijednosti mješavina u rasponu su od 0,877 do 0,969.

Za *NaM-S* mješavine, dok se LL kontinuirano smanjuje s povećanjem udjela sepiolita, C_0 koeficijent se smanjuje sa 15,304 na 7,434 i doseže najnižu vrijednost za 60 % *NaM* i 40 % *S* mješavine. C_0 koeficijent se posljedično povećava s povećanjem udjela sepiolita i doseže najveću vrijednost od 25,719 za 100 % sepiolita. Slično ponašanje uočeno je u *NaM-K* i *NaM-CaM* mješavinama. Promjena u β koeficijentu proturječila je promjeni u C_0 koeficijentu. Na primjer, u *NaM-S* mješavinama, LL kontinuirano opada s povećanjem udjela sepiolita, a β koeficijent se povećava sa 0,9 na 1,028 dok se ne dobije mješavina od 60 % *NaM* i 40 % *S*. β koeficijent dostiže najveću vrijednost u mješavini od 60 % *NaM* i 40 % *S*, nakon čega slijedi nagli pad s povećanjem udjela sepiolita, a najniža vrijednost od 0,095 dobivena je za 100 postotni sepiolit.

Slika 4.a pokazuje da LL za *NaM-K* i *NaM-S* mješavine drastično rastu i paralelne su jedna s drugom povećanjem udjela *NaM*. Vrijednosti LL za čisti sepiolit i kaolinit su 33,55 % odnosno 58,2 %, a vrijednost od 255,1 % postiže se u slučaju 100 postotnog udjela *NaM*. Povećanje vrijednosti LL u *NaM-S* mješavinama utvrđeno je kao (255,1 - 33,55 = 221,55 %), dok je porast vrijednosti LL u *NaM-K* mješavinama izračunana kao (255,1 -



Slika 4. Učinak dodanog NaM s tri različite vrste gline (CaM, K i S) na: a) LL mješavine s glinama; b) indeks plastičnosti mješavine s glinama

58,2 = 196,9 %). Međutim, stopa povećanja LL-a niža je u NaM-CaM mješavinama od ostalih mješavina jer se mineraloška svojstva NaM znatno razlikuju od svojstava K i S, dok je njegovo djelovanje snažnije od djelovanja druga dva minerala glina. LL-ovi za CaM i NaM su 148,3 % odnosno 255,1 %. Povećanje LL-a sa 148,3 % na 255,1 % uzrokovalo je povećanje plastičnosti gline od visoke do vrlo visoke. Vrijednosti indeksa plastičnosti prikazane su na slici 4.b. Učinak povećanog udjela NaM indeksa plastičnosti je vidljiv. Dodavanje 10 % K i S u NaM dovelo je do značajnih povećanja indeksa plastičnosti za približno 25 % odnosno 41 %. Razlog je visoka aktivnost dodanog NaM i njegova sklonost upijanju vode.

Budući da aktivnost tla varira ovisno o udjelu PI i CF, vrijednost PI može se dobiti kao funkcija CF [24]. Na aktivnost utječu mnogi čimbenici, kao što su vrsta minerala gline, vrsta apsorbiranog kationa, pH, stupanj kristalnosti i udio čistog minerala gline. Prisutnost kaolinita i montmorilonita u tlu daje širi raspon vrijednosti djelovanja u kombinaciji s ovim čimbenicima. Što je veće djelovanje glinenih tala, to je važniji učinak frakcije gline na intrinzična svojstva. Štoviše, djelovanje je osjetljivije na promjene u vrsti izmjenjivih kationa i sastavu vode u porama. U ovom radu, vrijednosti djelovanja za S, K, NaM, i CaM mogu se poredati od visokih prema niskima. Djelovanja 100 postotnih S, K, NaM i CaM iznosila su 0,57, 0,95, 2,61, odnosno 4,73. U NaM-S i NaM-K mješavinama, djelovanje se smanjivalo sa smanjenjem udjela NaM.

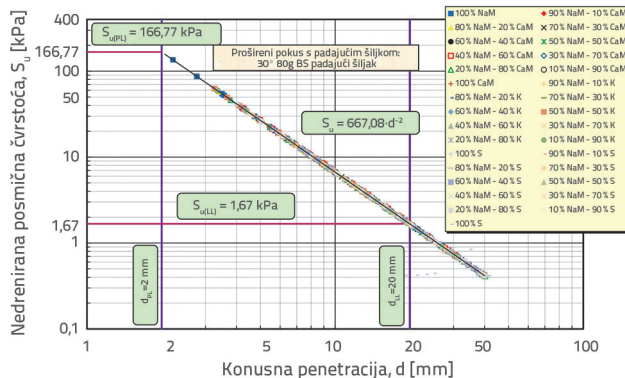
4.2. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće, prodiranja šiljka i vlažnosti

Hansbo je proveo jedno od prvih eksperimentalnih istraživanja kako bi utvrdio odnos između nedrenirane posmične čvrstoće, prodiranja šiljka i konzistencije sitnozrnatog tla [18]. Prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, Hansbo [17] je predložio izraz (1) koja se temelji na odnosu između prodiranja šiljka i nedrenirane posmične čvrstoće. Mnogi su istraživači predložili empirijske jednadžbe između prodiranja šiljka i nedrenirane posmične čvrstoće provodeći regresijsku analizu na temelju velike količine podataka [23, 35, 36]. Slika 5. prikazuje odnos prodiranja šiljka (d) i nedrenirane posmične čvrstoće (S_v)

koji su predložili autori na dvologaritamskoj skali. Procjenom eksperimentalnih rezultata izveden je sljedeći izraz:

$$S_v = 667,08 \cdot (d)^{-2} \tag{7}$$

Rezultati prikazani na slici 5. pokazuju da odnos prodiranja šiljka i nedrenirane posmične čvrstoće ima ograničenu raspršenost unutar malog raspona prodiranja šiljka. Zanimljivo je kako eksperimentalni rezultati pokazuju da je ponašanje tla neovisno o fizikalnim svojstvima tla, kao što su Atterbergove granice, vrijednosti plastičnosti i raspodjela veličine zrna.

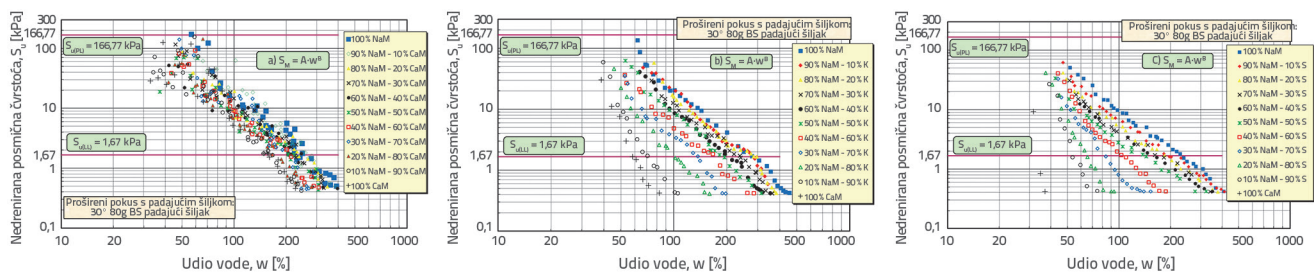


Slika 5. Odnos prodiranja šiljka i nedrenirane posmične čvrstoće za NaM-CaM, NaM-K, i NaM-S mješavine

Slika 6. pokazuje dvologaritamske grafičke prikaze vlažnosti i nedrenirane posmične čvrstoće NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavina. Funkcija snage prikazana u jednadžbi (8) najprikladniji je odnos za opisivanje odnosa između vlažnosti i nedrenirane posmične čvrstoće [17, 28, 37].

$$S_v = A \cdot (w)^B \tag{8}$$

pri čemu je A konstanta, a B je nagib krivulje. Kao što je prikazano na slici 6, NaM-CaM mješavine imaju mnogo veće nedrenirane vrijednosti posmične čvrstoće od NaM-K i NaM-S mješavina. Najniža vlažnost dobivena je za NaM-S mješavinu, a najveća



Slika 6. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i vlažnosti za: a) NaM-CaM; b) NaM-K; c) NaM-S mješavine

za NaM-CaM mješavinu. Eksperimentalni su rezultati pokazali da su nedrenirane vrijednosti posmične čvrstoće NaM-CaM mješavina veće od vrijednosti NaM-K i NaM-S mješavina. Slika 6. pokazuje da mineraloška svojstva i svojstva plastičnosti utječu na vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće tla. Također prikazuje pogodnost u izračunavanju nedrenirane posmične čvrstoće koja odgovara željenoj vlažnosti u mješavini gline i gline prema njihovim svojstvima plastičnosti.

Rezultati prikazani na slikama 6.a, 6.b i 6.c mogu se lako razumjeti ispitivanjem promjena u vlažnosti za svaku mješavinu gline i gline pri konstantnoj nedreniranoj vrijednosti posmične čvrstoće od 1,67 kPa. Na primjer, kao što je prikazano na slici 6a, vlažnost pri nedreniranoj posmičnoj čvrstoći od 1,67 kPa za 100 postotni NaM je 248 %, a za 100 postotni CaM je 160 %. Slike 6.b i 6.c pokazuju da je vlažnost dobivena za nedreniranu posmičnu čvrstoću od 1,67 kPa za čisti K i S 58 % odnosno 34 %. Sve izračunane vrijednosti vlažnosti također su LL vrijednosti tla. To pokazuje da kada se uzima u obzir vlažnost koja odgovara konstantnoj nedreniranoj posmičnoj čvrstoći ($S_{u(LL)} = 1,67$ kPa), vlažnosti potrebne za NaM-CaM, NaM-K, i NaM-S mješavine su u silaznom redoslijedu. Rezultati su pokazali da su i mineraloške granice i granice konzistencije mješavina bile značajno učinkovite u variranju nedrenirane posmične čvrstoće i vlažnosti.

4.3. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i omjera vlažnosti

Novo alternativno rješenje je neizravno dobivanje nedrenirane posmične čvrstoće regresijskom analizom primjenom omjera vlažnosti (WCR) i indeksa tečenja (I_L) gline. Kuriakose i sur. [12] prikazali su omjer vlažnosti kao omjer vlažnosti u odnosu na LL. I_L je dobiven za izračunavanje udaljenosti od prirodne vlažnosti u uzorcima glinenog tla do granica tečenja i plastičnosti. PL

je dobiven kada je I_L vrijednost iznosila nula, a LL je dobiven kada je I_L vrijednost iznosila jedan. Ako su I_L vrijednosti manje od nule, vlažnost u tlu manja je od PL, a ako su veće od jedan, vlažnost u tlu je veća od LL. Kuriakose i sur. [12] pokazali su da je primjena omjera vlažnosti prikladnija od primjene I_L za određivanje nedrenirane posmične čvrstoće glinenih tala. Odnosi nedrenirane posmične čvrstoće i WCR-a za NaM-CaM, NaM-K i NaM-S prikazani su na slici 7. Iz dvologaritamskog (WCR)-(S_u) grafa prikazanog na slici 7, nedrenirana posmična čvrstoća može se lako izračunati pomoću jednadžbe (9) ovisno o omjeru vlažnosti (WCR).

$$S_u = F \cdot (WCR)^\theta \tag{9}$$

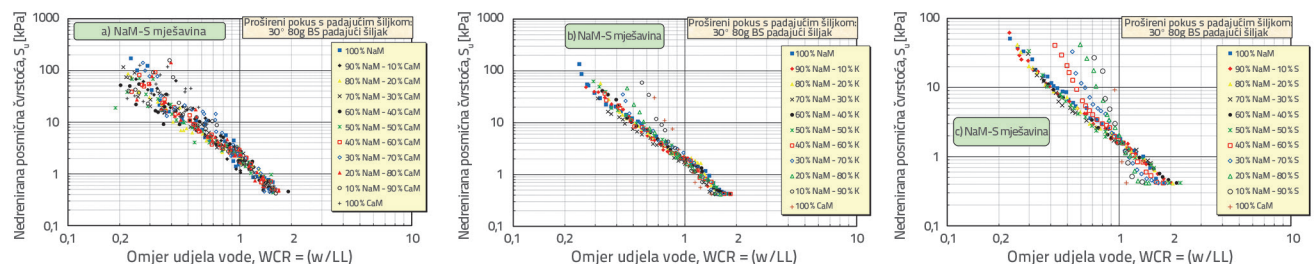
pri čemu je F konstanta, a θ je nagib linije do podatkovnih točaka. U ovom su istraživanju izrazi (10), (11) i (12) primijenjeni za dobivanje S_u -WCR odnosa za NaM-CaM, NaM-K, i NaM-S mješavine.

$$S_u = 1.873 \times (WCR)^{-2.449} (NaM - CaM) \tag{10}$$

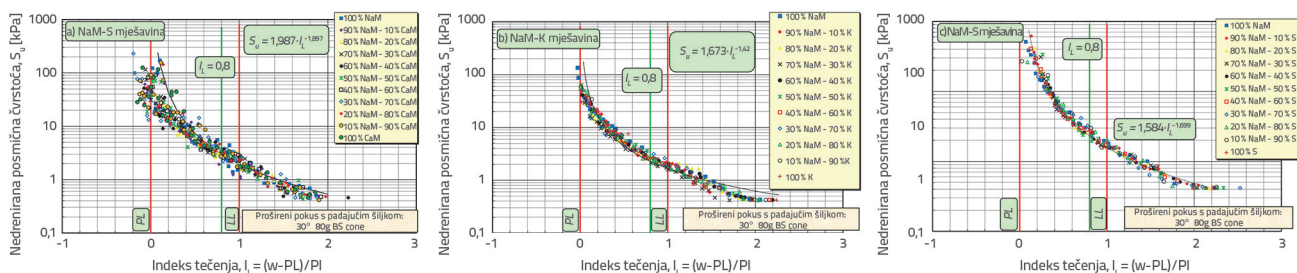
$$S_u = 1.904 \times (WCR)^{-2.608} (NaM - K) \tag{11}$$

$$S_u = 1.838 \times (WCR)^{-3.068} (NaM - S) \tag{12}$$

Vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće smanjivale su se s povećanjem omjera vlažnosti do 2. U NaM-CaM i NaM-K mješavinama, nedrenirane vrijednosti posmične čvrstoće smanjuju se sa 180 kPa na 0,4 kPa, a WCR vrijednosti rastu od 0,2 do 2, kao što je prikazano na slikama 7.a i 7.b. U usporedbi s druge dvije mješavine gline (NaM-CaM, NaM-K), u NaM-S mješavinama slabije plastičnosti, nedrenirane vrijednosti posmične čvrstoće smanjuju se sa 70 kPa na 0,4 kPa, a WCR



Slika 7. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i omjera vlažnosti za: a) NaM-CaM; b) NaM-K; c) NaM-S mješavine



Slika 8. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i indeksa tečenja (I_L) za: a) NaM-CaM; b) NaM-K; c) NaM-S mješavine

vrijednosti povećavaju s 0,2 na 2 kao što je prikazano na slici 7.c. Osim toga, sa smanjenjem NaM udjela u mješavinama, nagib se pravca s najboljim uklapanjem (jednadžbe 10–12) povećao. U ovom slučaju, za konstantnu nedreniranu posmičnu čvrstoću ($S_u = 10$ kPa) WCR vrijednosti za 100 postotne NaM i CaM iznose 0,50 odnosno 0,59. Slika 7.b jasno pokazuje da za S_u vrijednost od 10 kPa, potrebna WCR vrijednost iznosi 0,50 za 100 % NaM, dok se WCR vrijednost povećava na 0,83 za 100 % K. Mješavine glina sa sličnim LL vrijednostima na slici 7a pokazuju da je, pri konstantnoj nedreniranoj posmičnoj čvrstoći ($S_u = 10$ kPa), razlika između WCR vrijednosti beznačajna. Na slici 7.c, WCR vrijednosti koje odgovaraju nedreniranoj posmičnoj čvrstoći od 10 kPa su 0,50 za 100 % NaM i 1,01 za 100 % S. Zahvaljujući niskoj LL vrijednosti, WCR vrijednosti su malo premašile vrijednost od 2 s povećanjem udjela sepiolita u NaM-S mješavinama (slika 7.c). Stoga rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju dobre korelacije dobivene regresijskom analizom, što pomaže u točnijem i pouzdanijem dobivanju nedrenirane posmične čvrstoće mješavina gline i gline na temelju omjera vlažnosti.

Ako je WCR veći od 0,8, glina se klasificira kao "meka ilovača i temeljni materijal s kojim je teško raditi" [49]. Prema rezultatima ispitivanja i uzimajući u obzir izrazi (10) do (12), θ vrijednosti opadaju s porastom LL-a i smanjenjem omjera plastičnosti (PL/LL). Stoga je vidljivo da omjer plastičnosti (PL/LL) ili karakteristike konzistencije značajno utječu na S_u -WCR odnos. Izrazi (10–12) predloženi u ovom radu zahtijevaju primjenu WCR vrijednosti između 0,8 i 2.

4.4. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i indeksa tečenja

Nedrenirana posmična čvrstoća može se jednostavno izračunati pomoću jednadžbe (13) na temelju indeksa tečenja (I_L).

$$S_u = D \cdot (I_L)^\lambda \tag{13}$$

pri čemu je D konstanta, a λ je nagib pravca. Slika 8. prikazuje odnos između S_u - I_L i NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavina. Slika 8.a pokazuje da su NaM-CaM mješavine imale širi raspon distribucije od NaM-K i NaM-S mješavina.

Kao što je prikazano u jednadžbi (2), kada je prirodna vlažnost jednaka plastičnosti i LL-ovima, I_L je jednak nuli odnosno jedan.

Slika 8. prikazuje LL i PL granice svih triju mješavina. Lako se može zaključiti da je u NaM-CaM mješavinama s vrlo visokom plastičnošću, I_L bio manji od 0; međutim, slično ponašanje nije uočeno u NaM-K i NaM-S mješavinama, koje imaju puno manju plastičnost.

Postoje mnoge jednadžbe koje su predložili istraživači u literaturi primjenjujući glinene minerale s različitim svojstvima [11, 28, 30, 34, 37, 39, 50, 51]. Stoga je analiza podataka o ispitivanju različitih mješavina glina otkrila da jedinstven odnos između S_u i I_L ne postoji (slike 8.a do 8.c). Slika 8.c prikazuje korelaciju između S_u i I_L za NaM-S mješavine. Također prikazuje ujednačeni trag od onog prikazanog na slici 8.a. Osim toga, zelena $I_L = 0,8$ linija je na slici 8 dodana na zbog klasifikacije, što je jedno od tehničkih svojstava tla [49, 51, 52]. Eksperimentalni rezultati o fizikalnom značenju ove vrijednosti, S_u pri $I_L = 0,8$ je 1,8 i 2,2 puta veći od LL, izraz (14).

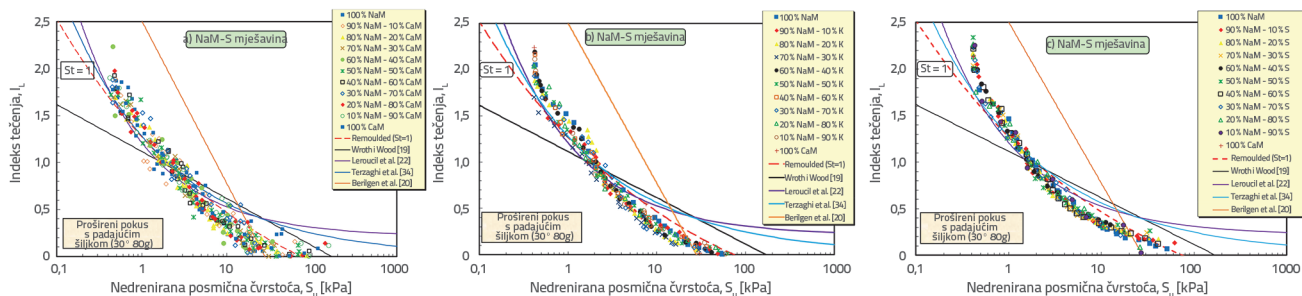
$$1,8 \cdot S_{u,LL} \leq S_{u(I_L=0,8)} \leq 2,2 \cdot S_{u,LL} \tag{14}$$

4.5. Odnosi nedrenirane posmične čvrstoće, indeksa tečenja i omjera osjetljivosti

Indeks tečenja (I_L) i omjer osjetljivosti (S_t) mogu se primijeniti zajedno kao funkcija za izračunavanje nedrenirane posmične čvrstoće kohezivnih tala kako slijedi [47]:

$$S_{u,c} = f(I_L, S_t) = 98 \times S_t \times e^{\left(\frac{\ln \left(\frac{0,4755}{0,5012 + 0,4988 \times I_L} \right)}{0,19} \right)} \tag{15}$$

Kada je omjer osjetljivosti u izrazu (15) jednak jedan, nedrenirana posmična čvrstoća može se dobiti za ponovno oblikovana tla. Uzimajući u obzir mješavine NaM-CaM, NaM-K i NaM-S, korelacije između indeksa tečenja i nedrenirane posmične čvrstoće dobivene su na temelju omjera osjetljivosti. Nadalje, I_L - S_u - S_t odnos pruža opći pregled svojstava čvrstoće ovih mješavina. U ovom slučaju, omjer osjetljivosti, na koji utječu sedimentni okoliš, mineraloški sastav i struktura glina, također se može povezati s vrijednostima indeksa tečenja. U jednadžbi (15), S_u - I_L odnosi za $S_t = 1$ pojedinačno su prikazani za NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavine (slike 9.a, 9.b i 9.c). Kao što je prikazano u sva tri grafikona, kada je I_L veći od 2,0, odgovarajuće S_u vrijednosti



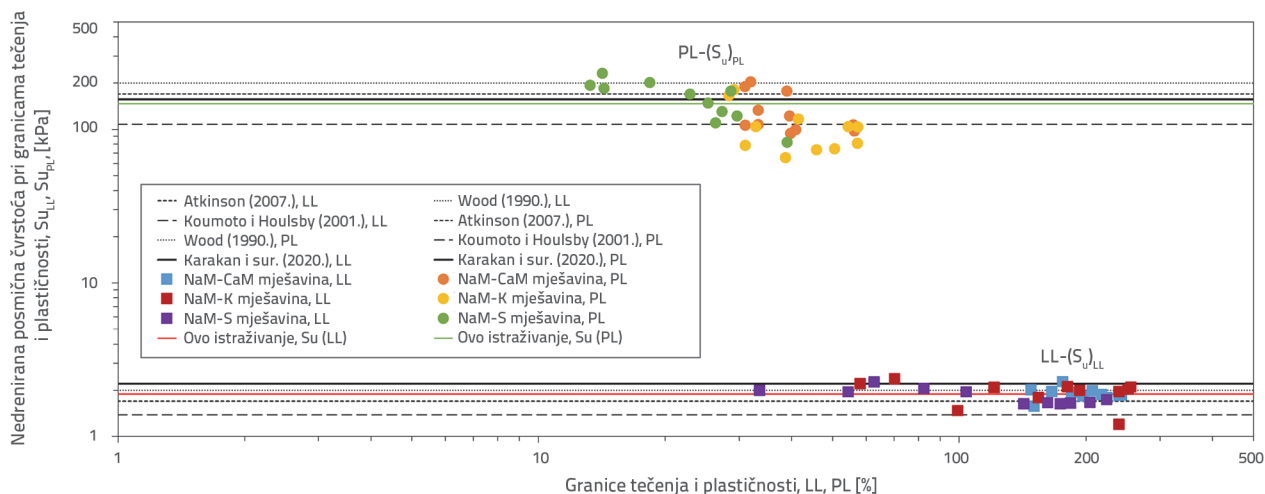
Slika 9. Odnos nedrenirane posmične čvrstoće i indeksa tečenja za: a) NaM-CaM; b) NaM-K; c) NaM-S mješavine

ostaju konstantne, a I_L vrijednost se povećava. Štoviše, u jednadžbi (15), kada je I_L jednak jedan (na LL), $(S_u)_{LL}$ je jednak 1,91 kPa, 1,90 kPa i 1,87 kPa, a kada je I_L jednak nuli (pri PL), $(S_u)_{PL}$ je jednak 54,16 kPa, 61,66 kPa i 82,05 kPa za NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavine. Ovi se rezultati slažu s onima objavljenima u literaturi [36, 47]. Na primjer, vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće koje odgovaraju PL-u koji su dobili Li [53], Zentar i sur. [54] te Shimobe i Spagnoli [47] iznose 71,2 kPa, 65 kPa, odnosno 74,3 kPa. Te se vrijednosti podudaraju s vrijednostima dobivenima u ovom radu. Odnos između indeksa tečenja i nedrenirane posmične čvrstoće koji su predložili razni istraživači [19, 22, 30, 34] na temelju ispitivanja na ponovno oblikovanim tlima s različitim mineraloškim svojstvima iz različitih regija svijeta prikazan je na slici 9. Analizirajući S_u - I_L dijagram, očito je da jednadžba koju su predložili Berilgen i sur. [30] precjenjuje čvrstoću glinenih mješavina (slika 9). Kada je nedrenirana posmična čvrstoća manja od 30 kPa, jednadžbom se izračunavaju veće vrijednosti indeksa tečenja. Pri primjeni jednadžbe koju su predložili Wroth i Wood [19], dobivene vrijednosti indeksa tečenja bile su znatno niže od eksperimentalnih rezultata kada je nedrenirana posmična čvrstoća bila izuzetno niska. Osim toga, iznad određene nedrenirane vrijednosti posmične čvrstoće ($S_u > 2$ kPa), ova jednadžba precjenjuje vrijednosti indeksa tečenja.

U usporedbi s jednadžbama Berilgena i sur. [30] i Wrotha i Wooda [19], jednadžbe Terzaghija i sur. [34] i Lerouella i sur. [22] bolje se slažu s eksperimentalnim rezultatima. Nasuprot tome, jednadžbe autora Terzaghija i sur. [34] i Lerouella i sur. [22] precjenjuju vrijednosti indeksa tečenja, osobito pri višim vrijednostima nedrenirane posmične čvrstoće. U ovom slučaju, utvrđeno je da je jednadžba koju su predložili Shimobe i Spagnoli [47] najprikladnija.

4.6. Prosječna nedrenirana posmična čvrstoća uzoraka na granicama tečenja i plastičnosti

Nedrenirane posmične čvrstoće dobivene pomoću granica tečenja i plastičnosti NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavina prikazane su uključivanjem eksperimentalnih rezultata iz literature, kao što je prikazano na slici 10. [17, 20, 28, 55]. Prosječne vrijednosti $(S_u)_{LL}$ i $(S_u)_{PL}$ za NaM-CaM mješavine iznose 1,90 kPa odnosno 130,55 kPa, dok su one za NaM-K mješavine bile 1,94 kPa odnosno 104,30 kPa. Na kraju, prosječne vrijednosti $(S_u)_{LL}$ i $(S_u)_{PL}$ za NaM-S mješavine su 1,83 kPa odnosno 205,23 kPa. Ispitivanjem NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavina dobivena je nedrenirana posmična čvrstoća od veće prema nižoj. Osim toga, prosječne nedrenirane posmične čvrstoće mješavina



Slika 10. Nedrenirane posmične čvrstoće na granicama tečenja i plastičnosti za NaM-CaM, NaM-K i NaM-S mješavine (podaci dobiveni primjenom pokusa s padajućim šiljkom)

gline i gline na njihovim granicama plastičnosti i tečenja iznose 166,77 kPa odnosno 1,67 kPa.

Wood [20] je naveo da je nedrenirana posmična čvrstoća mješavina kaolina i pijeska u PL manja nego kod mješavina montmorilonita i pijeska. $(S_{v,LL})$ su iznosile najviše 2,36 kPa, a najmanje 1,20 kPa, a razlika između njih $(\Delta(S_{v,LL}))$ iznosila je 1,16 kPa (slika 10.). Međutim $(S_{v,PL})$ su dobiveni kao maksimum od 425 kPa i minimum od 65,16 kPa, a razlika između njih $(\Delta(S_{v,PL}))$ iznosi 359,84 kPa (slika 10). U ovom slučaju, dok je $\Delta(S_{v,LL})$ u slučaju *NaM-CaM*, *NaM-K* i *NaM-S* mješavina manje značajan, $\Delta(S_{v,PL})$ je znatno značajniji.

5. Zaključak

U ovom je radu istražen utjecaj mineralogije gline na odnose između vrijednosti *LL*, *PL*, *WCR*, S_v i I_c . Tri vrste glinenih (*CaM*, *K* i *S*) mješavina pomiješane su sa *NaM* kako bi se dobilo tlo s različitim karakteristikama plastičnosti. *NaM* je pomiješan s tri

vrste gline u 11 različitih koncentracija u rasponu između 0 % i 100 % u intervalima od 10 % po težini.

Analizom rezultata utvrđeno je da su se *LL* vrijednosti *NaM-S* mješavina znatno smanjile s povećanjem udjela *S* u smjesi. Štoviše, i mineraloška svojstva i granice konzistencije mješavina bile su značajno učinkovite u variranju nedrenirane posmične čvrstoće i vlažnost. Osim toga, s obzirom na veliku količinu podataka za vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće mješavina *NaM* i gline, odnos između nedrenirane posmične čvrstoće i omjera vlažnost nije bio jedinstven. Prema dobivenim rezultatima, odnosi nedrenirane posmične čvrstoće i indeksa tečenja za različite mješavine glina bili su manje podložni utjecajima mineralogije gline i bili su koherentniji od odnosa nedrenirane posmične čvrstoće i vlažnosti u istim mješavinama. Za buduća istraživanja, empirijske jednadžbe predložene u ovom radu trebale bi se potvrditi pomoću podataka ispitivanja na tlima iz različitih dijelova svijeta.

LITERATURA

- [1] Kumar, G.V., Wood, D.M.: Fall cone and compression tests on clay-gravel mixtures, *Géotechnique*, 49 (1999) 6, pp.727-739. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.727>
- [2] Mitchell, J.K., Soga, K.: *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley and Sons, 2005.
- [3] Kashani, M.M., Hin, L.S., Ibrahim, S.B., Sulaiman, N.M.B.N., Teo, F.Y.: An investigation into the effects of particle texture, water content and parallel plates' diameters on rheological behavior of fine sediment, *Int J Sediment Res.*, 31 (2016), pp.120–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.11.001>
- [4] Kimiaghaham, N., Clark, S.P., Ahmari, H.: An experimental study on the effects of physical, mechanical and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate, *Int. J. Sediment Res.*, 31 (2016) 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.01.001>
- [5] Tanzadeh, R., Vafaeian, M., Fard, M.Y.: The influence of lime powder on the behaviour of clay soil, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 907-915, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1871.2016>
- [6] Abdulhussein Saeed, K., Kassim, K.A., Nur, H.: Physicochemical characterization of cement treated kaolin clay, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 6, pp. 513-521, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.976.2013>
- [7] British Standards Institute (BSI) BS 1377-2: Methods for test of soils for civil engineering purposes: Classification tests, British Standards Institute, London, United Kingdom, 1990.
- [8] Sherwood, P.T., Ryley, M.D.: An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of liquid limit, *Géotechnique*, 20 (1970) 2, pp. 203-208. <https://doi.org/10.1680/geot.1970.20.2.203>
- [9] Wood, D.M.: Cone penetrometer and liquid limit, *Géotechnique*, 32 (1982) 2, pp. 152-157. <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.2.152>
- [10] Nagaraj, H.B., Sridharan, A., Mallikarjuna, H.M.: Re-examination of Undrained Strength at Atterberg Limits Water Contents, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (2012) 4, pp. 727-736. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9489-7>
- [11] Vardanega, P.J., Haigh, S.K.: The undrained strength – liquidity index relationship. *Canadian Geotechnical Journal*, 51 (2014) 9, pp. 1073-1086. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0169>
- [12] Kuriakose, B., Abraham, B.M., Sridharan, A., Jose, B.T.: Water content ratio: an effective substitute for liquidity index for prediction of shear strength of clays, *Geotech Geol Eng*, 35 (2017) 4, pp.1577-1586. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0193-0>.
- [13] O'Kelly, B.C.: Fall-cone strength testing of municipal sludges and residues, *Environmental Geotechnics*, 5 (2018)1, pp. 18-30. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00080>.
- [14] Karakan, E., Demir, S.: Effect of fines content and plasticity on undrained shear strength of quartz-clay mixtures, *Arab J Geosci.*, 11 (2018) 23, <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4114-1>.
- [15] Karakan, E., Demir, S.: Relationship between undrained shear strength with Atterberg limits of kaolinite/montmorillonite-quartz mixtures, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 10 (2018) 3, pp. 92–102.
- [16] Karakan, E., Demir, S.: Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures, *Arab J Geosci*, 13 (2020), <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05762-4>.
- [17] Karakan, E., Shimobe, S., Sezer, A.: Effect of clay fraction and mineralogy on fall cone results of clay-sand mixtures, *Eng Geol*, 279 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105887>.
- [18] Hansbo, S.: A new approach to the determination of shear strength of clay by the fall cone test, *Proceedings of the Royal Swedish Geotechnical Institute*, 14 (1957), pp. 5-47.
- [19] Wroth C.P., Wood, D.M.: The correlation of index properties with some basic engineering properties, *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (1978) 2, pp. 137-145. <https://doi.org/10.1139/t78-014>

- [20] Wood, D.M.: Soil behaviour and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, UK., 1990.
- [21] Koumoto, T., Houlsby, G.T.: Theory and practice of the fall cone test, *Géotechnique*, 51 (2001) 8, pp. 701–712. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.8.701>
- [22] Leroueil, S., Tavenas, F., Le Bihan, J.P.: Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada (Characteristic properties of eastern Canada clays), *Can Geotech J.*, 20 (1983) 4, pp. 681–705. <https://doi.org/10.1139/t83-076>
- [23] Federico, A.: A comment on undrained residual strength, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 17 (1983) 3, pp. 164–166.
- [24] Skempton, A.W., Northey, R.D.: The sensitivity of clays, *Géotechnique*, 3 (1952) 1, pp. 30–53. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1952.3.1.30>
- [25] Schofield, A.N., Wroth, C.P.: Critical state soil mechanics, McGraw Hill, London, 1968.
- [26] Locat, J., Demers, D.: Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays, *Can Geotech J.*, 25 (1988) 4, pp. 799–806. <https://doi.org/10.1139/t88-088>
- [27] Yilmaz, I.: Evaluation of shear strength of clayey soils by using their liquidity index, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 59 (2000) 3, pp. 227–229. <https://doi.org/10.1007/s100640100109>
- [28] Whyte, I.L.: Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion, *Ground Eng.*, 15 (1982) 1, pp. 16–20.
- [29] Lee, L.T.: Predicting geotechnical parameters for dredged materials using the slump test method and index property correlations. DOER Technical Notes collection (ERDC TNDOR-D-1), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, 2004. <http://www.wes.army.mil/el/dots/doer>
- [30] Berilgen, S.A., Kılıç, H., Özyayın, K.: Determination of undrained shear strength for dredged golden horn marine clay with laboratory tests, *Proceedings of the Sri Lankan geotechnical society's first international conference on soil & rock engineering, Colombo, Sri Lanka, 2007.*
- [31] Edil, T.B., Benson, C.H.: Comparison of basic laboratory test results with more sophisticated laboratory and in situ tests methods on soils in southeastern Wisconsin, Final report of Wisconsin highway research program #0092-06-05, pp. 11–12, 2009.
- [32] Tanzadeh, R., Vafaeian, M., Fard, M.Y.: The influence of lime powder on the behaviour of clay soil, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 907–915, <https://doi.org/10.14256/JCE.1871.2016>
- [33] Lebo, Ž., Bačić, M., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Zagreb clay improved with various binders, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 871–880, <https://doi.org/10.14256/JCE.3300.2021>.
- [34] Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G.: Soil mechanics in engineering practice, 3rd edn. John Wiley & Sons, New York 1996.
- [35] Shimobe, S.: 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), pp. 141–146, 2000.
- [36] Shimobe, S.: Determination of index properties and undrained shear strength of soils using the fall-cone test, In: *Proceeding of the 7th International Symposium on Lowland Technology*, pp. 16–18, 2010.
- [37] O'Kelly, B.C.: Atterberg limits and remolded shear strength – water content relationships, *Geotech Test J.*, 36 (2013) 6, pp. 939–947. <https://doi.org/10.1520/GTJ20130012>.
- [38] Cangir, B., Dipova, N.: Estimation of undrained shear strength of Konyaaltı silty clays, *Indian J Geo Mar Sci.*, 46 (2017) 3, pp. 513–520.
- [39] Kang, G., Tsuchida, T., Tang, T.X., Kalim, T.P.: Consistency measurement of cement-treated marine clay using fall cone test and Casagrande liquid limit test, *Soils Found.*, 57 (2017) 5, pp. 802–814. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.010>
- [40] Sharma, B., Sridharan, A.: Liquid and plastic limits of clays by cone method, *Int J Geo-Eng.*, 9 (2018) 1, pp. 22–31. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0092-0>
- [41] Di Matteo, L.: Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71 (2012) 1, pp. 79–85. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0412-5>
- [42] Feng, T.W.: Fall-cone penetration and water content relationship of clays, *Géotechnique*, 50 (2000) 2, pp. 181–187. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.2.181>
- [43] Sivakumar, G.V., Glynn, D., Cairns, P., Black, J.A.: A new method of measuring plastic limit of fine materials, *Géotechnique*, 59 (2009) 10, pp. 813–23. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.1.88>
- [44] Spagnoli, G.: Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay, *Canadian Journal of Soil Science*, 92 (2012) 6, pp. 859–64. <https://doi.org/10.4141/cjss2012-011>
- [45] Hong, Z., Liuz, S., Shen, S., Negami, T.: Comparison in Undrained Shear Strength between Undisturbed and Remolded Ariake Clays, *J Geotech Geoenv Eng*, 132 (2006) 2, pp. 272–275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(272))
- [46] O'Kelly, B.C., Vardanega P.J., Haigh, S.K.: Use of fall cones to determine Atterberg limits: a review, *Géotechnique*, 68 (2018) 10, pp. 843–856, Corrigendum, 935. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.D.001>
- [47] Shimobe, S., Spagnoli, G.: Some relations among fall cone penetration, liquidity index and undrained shear strength of clays considering the sensitivity ratio, *B Eng Geol Environ*. 78 (2019) 7, pp. 5029–5038. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01478-2>
- [48] Feng, T-W.: A linear log d – log w model for the determination of consistency limits of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (2001) 6, pp. 1335–1342. <https://doi.org/10.1139/t01-06>
- [49] So, E.: Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil, *Soils Found.*, 38 (1998) 4, pp. 85–93. https://doi.org/10.3208/sandf.38.4_85
- [50] Spagnoli, G., Oreste, P.: Relation water content ratio-to-liquidity index versus the Atterberg limits ratio evaluated with the Kaniadakis exponential law, *Geomech Geoeng* 14 (2019) 2, pp. 148–153. <https://doi.org/10.1080/17486025.2018.1532117>
- [51] Shimobe, S., Spagnoli, G.: Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays, *Bull Eng Geol Environ*, 79 (2020), pp. 4817–4828. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01844-5>.
- [52] Moroto, N.: Basic properties of loam soils in Aomori prefecture, Japan, *Soils Found.*, 33 (1993) 2, pp. 35–46. https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.2_35
- [53] Li, K.: A study of determining properties of fine-grained soil by fall cone test. Master thesis, Chung Yuan Christian University, 2004.
- [54] Zentar, R., Abriak, N.E., Dubois, V.: Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments, *J Geotech Geoenviron*, 135 (2009) 1, pp. 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))
- [55] Atkinson, J.: The mechanics of soils and foundations, CRC Press, London, 2007.