

Primljen / Received: 9.12.2022.

Ispravljen / Corrected: 3.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 14.6.2023.

Dostupno online / Available online: 10.9.2023.

Procjena pokazatelja zbijenosti tla pomoću granice žilavosti

Autori:



Prof.dr.sc. **Satoru Shimobe**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Nihon, Japan
Fakultet znanosti i tehnologije
shimobe.satoru@nihon-u.ac.jp
Sveučilišni profesor u mirovini



Izv.prof.dr.sc. **Eyyüb Karakan**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Kilis 7 Aralık, Kilis, Turska
Odjel za građevinarstvo
eyyubkarakan@kilis.edu.tr



Prof.dr.sc. **Alper Sezer**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Ege, Izmir, Turska
Odjel za građevinarstvo
alper.sezer@ege.edu.tr
Autor za korespondenciju

Pregledni rad

Satoru Shimobe, Eyyüb Karakan, Alper Sezer

Procjena pokazatelja zbijenosti tla pomoću granice žilavosti

Evaluacija parametara zbijenosti tla od ključne je važnosti za ocjenu kontrole kakvoće u geotehničkom inženjerstvu. Jedna od mogućnosti za to jest primjena granice žilavosti koja se definira kao udio vode pri kojem se ponašanje sitnozrnatog tla mijenja od gotovo ljepljivoplastičnog do žilavoplastičnog. Rezultati provedenih više od 1000 ispitivanja, uključujući ispitivanja svojstva zbijenosti i Atterbergovih granica prikupljeni su u bazu podataka radi utvrđivanja korelacija između granice žilavosti, Atterbergovih granica optimalnog stupnja zasićenosti i svojstava zbijenosti. Rezultati pokazuju da granica žilavosti ima potencijal za procjenu mnogih indeksa i pokazatelja zbijenosti različitih vrsta tala.

Ključne riječi:

Atterbergove granice, granica žilavosti, optimalan stupanj zasićenosti, svojstva zbijenosti, fizička svojstva

Research Paper - subject review

Satoru Shimobe, Eyyüb Karakan, Alper Sezer

Application of toughness limit in assessment of soil compaction identifiers

In geotechnical engineering, the precise evaluation of compaction parameters is essential for quality control assessment. One option is the use of the toughness limit (TL), concisely defined as the water content, at which the behaviour of fine-grained soils evolves from an almost adhesive-plastic to tough-plastic. A database consisting of more than 1000 test results, including the compaction characteristics and Atterberg limits, was compiled to establish correlations between the TL, Atterberg limits, optimum degree of saturation, and compaction properties. The results revealed that the TL has the potential to evaluate many indices and compaction identifiers for different types of soils.

Key words:

Atterberg limits, toughness limit, optimum degree of saturation, compaction characteristics, physical properties

1. Uvod

U geotehničkom inženjerstvu plastičnost se definira kao "sposobnost koherentnog materijala da mijenjanjem udjela vode promijeni svoje mehaničko ponašanje" [1]. S tim u vezi, Atterbergove granice predstavljaju vrijednosti udjela vlage koje razlikuju određene razine konzistencije. Dodatno, plastičnost se definira i kao svojstvo tla, odnosno njegova sposobnost da promijeni i trajno zadrži deformirani oblik bez pucanja [2, 3]. Glinovita tla pokazuju svojstvo plastičnosti, a čimbenici koji utječu na plastičnost su mineralogija, kohezivne sile te odnos između rada i energije koja osigurava ravnotežu sila među česticama. U tom smislu, žilavost se jednostavno definira kao količina rada potrebna po jedinici volumena, koja uzrokuje određenu razinu deformacije. Raspon udjela vode u kojem se glina može lako preoblikovati određuje njenu žilavost koja je ujedno i mjera za obradivost [4]. Britanski institut za standardizaciju opisuje žilavost u normi (BS5930) [5], i to kroz stanje tla na granici plastičnosti. Međutim, prema normi D2488-00 Američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM) [6], žilavost se definira kao pritisak potreban za formiranje valjaka tla promjera 3,2 mm, bez stvaranja pukotina. Ukratko, plastičnost je svojstvo tla da promijeni oblik, a žilavost se odnosi na energiju potrebnu da se tlo preoblikuje.

U građevinarstvu, žilavost utječe na učinkovitost i trošak izvođenja zemljanih radova. Budući da je za zbijanje žilavijih tala potrebno više energije, očekivani su i veći troškovi. Žilavost je također korisna za procjenu elastičnog ponašanja glinenih komponenti u nasutim građevinama, npr. u jezgri zemljanih brana i nasipa za obranu od poplava. Casagrande [7] je prvi definirao žilavost kao posmičnu otpornost tla kada je na granici plastičnosti. Kasnije je Casagrande [8] kategorizirao razine žilavosti određivanjem tala od vrlo slabih do vrlo žilavih. Reed [2] je žilavost opisao kao površinu ispod krivulje naprežanja i deformacije. Međutim, naglašava da u obzir treba uzeti samo dio područja plastičnosti. Slično tome, Norton [9] i Schwartz [10] pokazali su da je umnožak naprežanja pri popuštanju i najveće deformacije mjera plastičnosti koja se također izražava kao količina rada po jedinici volumena. Naprežanje pri popuštanju je prekoračeno u plastičnom području, a najveća deformacija ovisi

o duktilnosti i čvrstoći gline. Međutim, na te parametre utječu promjene u obliku zrna. Granica žilavosti (eng. *toughness limit* - TL) mogla bi se upotrijebiti za kvantificiranje gornje granice žilavosti ili obradivosti tla.

Pokazatelji zbijenosti tla, odnosno parametri najveće suhe gustoće (eng. *maximum dry density* - MDD) i optimalnog udjela vlage (eng. *optimum water content* - OWC) primjenjuju se u procjeni kontrole kakvoće zbijenosti na terenu. U tom je kontekstu potrebno dvostruko provjeriti neočekivana ponašanja koja proizlaze iz laboratorijskih ispitivanja zbijenosti, a u tu je svrhu moguće upotrijebiti granicu žilavosti. Druga bi mogućnost bile prediktivne jednadžbe za pokazatelje zbijenosti uzoraka na temelju indeksnih pokazatelja. Nekoliko je istraživača [11, 12] predložilo modele za sitnozrnata tla, odnosno za glinu i prah. Isika i Orden [13] upotrijebili su model umjetne neuronske mreže (eng. *artificial neural network* - ANN) za procjenu parametara zbijenosti tala različitog granulometrijskog sastava. U literaturi postoje istraživanja usmjerena na utvrđivanje povezanosti između optimalnog udjela vlage, najveće suhe gustoće, granice tečenja i energije zbijanja [14, 15]. Nekoliko istraživanja imalo je za cilj procijeniti parametre zbijenosti empirijskim pristupima temeljenim na granici plastičnosti [16, 17]. Međutim, upotreba samo granice tečenja (eng. *liquid limit* - LL) ili granice plastičnosti (eng. *plastic limit* - PL) možda nije dovoljna za dobivanje razumnih procjena pokazatelja zbijenosti tla. Dok granica tečenja ostaje nepromijenjena, granica plastičnosti može se drastično promijeniti, što zauzvrat rezultira naknadnim promjenama u svojstvima zbijenosti [18]. Kratki pregled literature pokazuje da optimalan udio vlage i najveća suha gustoća tala ovisе o kombiniranim učincima granice tečenja i granice plastičnosti. Prema tome, rezultati prethodnih istraživanja pokazuju da se jednadžbe koje se temelje samo na granici tečenja ili granici plastičnosti ne mogu upotrijebiti u procjeni parametara zbijenosti [13, 16, 19-24]. Stoga, analizirani su parametri zbijenosti različitih tala pri određenom učinku zbijanja s naglaskom na kombinirane učinke granice tečenja i granice plastičnosti. Vinod i Pillai [18], primjenjujući podatke koje je objavio Barnes [25], izradili su sljedeću jednadžbu za granicu žilavosti (TL) (izraženu u postocima):



Slika 1. Dijagram toka primijenjene metodologije

$$TL = PL + 0.42 \times PI \quad (1)$$

pri čemu je indeks plastičnosti (PI) razlika između granice tečenja (LL) i granice plastičnosti (PL). U daljnjem tekstu polazimo od pretpostavke da ranije navedeni izraz (1) vrijedi za koherentna tla.

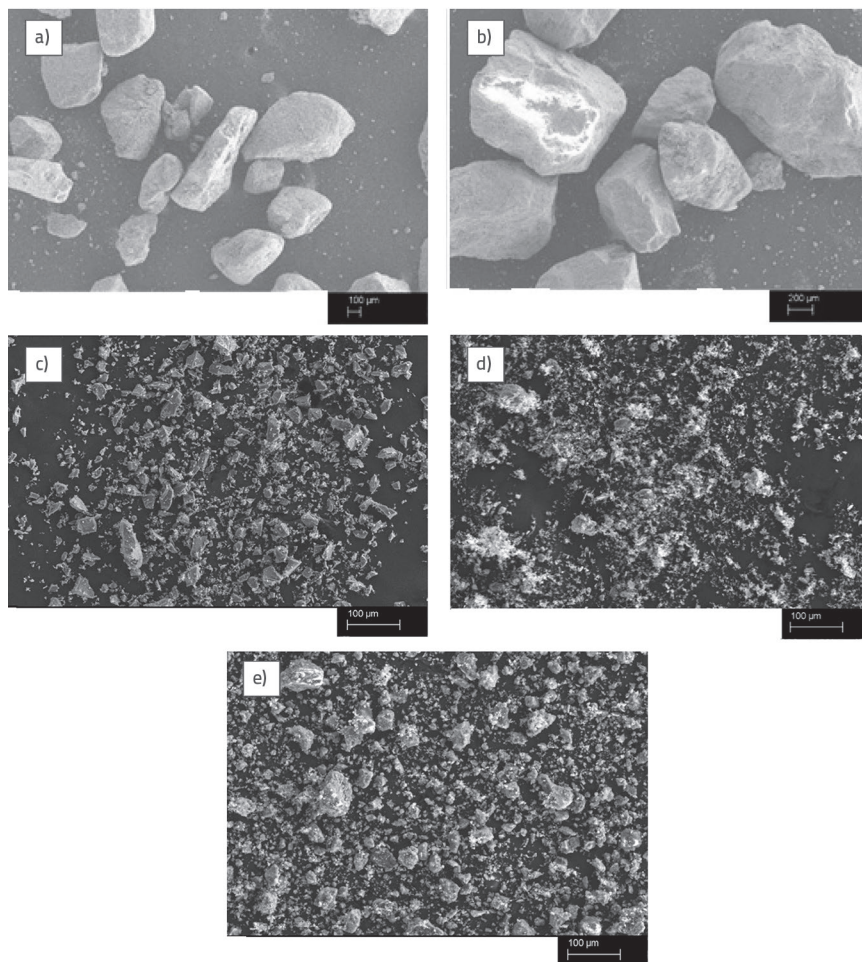
U prvoj fazi ovog istraživanja određeni su parametri koji utvrđuju svojstva plastičnosti i zbijenosti mješavina tla na temelju rezultata niza standardnih Proctorovih testova, pokusa padajućeg stošca i Casagrandeovog uređaja za određivanje granice tečenja te postupka valjanja valjičica za određivanje granice plastičnosti [26, 27]. Mješavine čine kombinacije koje sadrže dvije različite vrste gline (kaolin i bentonit), dvije različite vrste pijeska (S1, S2) i prah (M). Pri tome su korišteni rezultati 176 pokusa proveli autori ovog rada, pridodani rezultatima 928 pokusa iz literature. Ova baza podataka s više od 1000 rezultata ispitivanja primijenjena je za utvrđivanje odnosa između granice žilavosti, zbijenosti i indeksnih pokazatelja. Metodologija za određivanje međuovisnosti pokazatelja zbijenosti i indeksnih pokazatelja prikazana je na slici 1.

2. Materijali i metode

U okviru ovog istraživanja provedeno je ukupno 176 ispitivanja upotrebom Casagrandeovog pokusa i pokusa padajućeg stošca za 88 mješavina gline (bentonit/kaolin) - pijeska (S1, S2) i mješavine gline praha (M). Analizama mikrostrukture utvrđena su svojstva pijeska i gline upotrebom uređaja SEM-EDX u istraživačkom centru Ulutem Center. Uređaj primjenjuje 20 kV ubrzavajućeg napona na uzorcima obloženima zlatom.

Tablica 1. Kemijske analize glina koje osigurava proizvođač (ESAN)

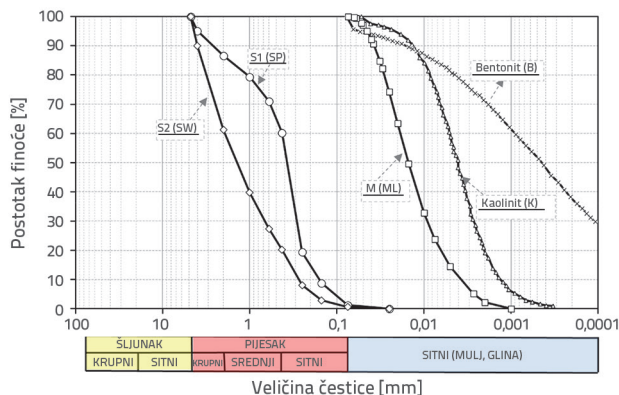
Minerali	B [%]	K [%]
SiO ₂	72,2	50,7
Al ₂ O ₃	14	34
Fe ₂ O ₃	0,7	0,6
TiO ₂	0,05	0,8
CaO	1,1	0,6
MgO	3,2	0
Na ₂ O	0,25	0
K ₂ O	1	0
SO ₃	0	0,3



Slika 2. Snimke pretražnog elektronskog mikroskopa: a) S1; b) S2; c) M; d) B; e) K

Slika 2. prikazuje snimke dobivene analizama pijeska (S1, S2), praha (M) i gline (K, B) pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM). Poznato je da su zrnca pijeska uglatog oblika, a gline pokazuju očekivanu strukturu. Nadalje, u glinama je pronađen visok udio SiO₂ (tablica 1.).

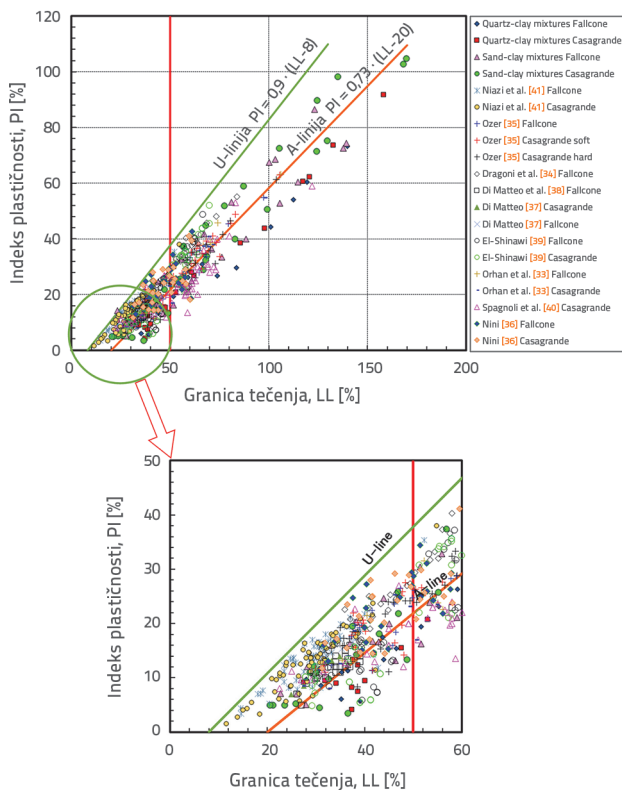
Slika 3. prikazuje granulometrijski sastav pijesaka i gline. Nadalje, prikupljeno je ukupno 928 rezultata ispitivanja iz literature (tablica 2). Slika 4 prikazuje obilježja tih podataka (LL < 50 %). Analiza dijagrama plastičnosti prikazuje da se većina podataka odnosi na glinena tla niske plastičnosti, pri čemu su prema Jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS) pretežno zastupljene klase tala CL, ML, CH i MH. Osim toga, u dijagramu plastičnosti zastupljen je i smektit (LL > 100 %) s vrlo visokim granicama tečenja (slika 4.). Nadalje, vrijednosti granice žilavosti (TL) za različite vrste tala utvrđene su neizravno primjenom spomenutog izraza (1) koji se zasniva na Atterbergovim granicama (LL i PL) iz literature i naših vlastitih podataka.



Slika 3. Krivulje granulometrijskog sastava komponenti mješavina

Tablica 2. Izvor podataka

Br.	Literatura	Broj podataka
1	Vlastiti podaci autora	176
2	Niazi i sur. [41]	130
3	Spagnoli i sur. [40]	220
4	El-Shinawi [39]	80
5	Di Matteo i sur. [38]	56
6	Nini [36]	58
7	Di Matteo [37]	12
8	Mishra i sur. [69]	26
9	Özer [35]	84
10	Dragoni i sur. [34]	60
11	Orhan i sur. [33]	26



Slika 4. Dijagram plastičnosti s bazom podataka

3. Rezultati i rasprava

Navedena baza podataka primjenjuje se za utvrđivanje mogućih i vjerojatnih odnosa između granice žilavosti, Atterbergovih granica, aktivnosti i pokazatelja zbijenosti. Namjera je da se utvrdi pouzdanost granice žilavosti za predviđanje pokazatelja plastičnosti i zbijenosti različitih vrsta tala.

3.1. Osnovna obilježja granice žilavosti (TL) u odnosu na plastičnost i aktivnost

Plastičnost se obično definira na temelju Atterbergovih granica tla, no moguće ju je definirati i pomoću drugih parametara. Granica žilavosti opisana je u izrazu (1) i prikazana u literaturi [18]. Barnes [25] je podijelio uobičajenu količinu udjela vode između granica tečenja i plastičnosti na plastična (neviskozna) i žilavo-plastična (obradiva) područja. Granica žilavosti (TL) koja definira udio vode jest parametar koji razdvaja ta dva područja [18]. Granica žilavosti definira se jednostavno kao udio vlage pri nultoj žilavosti kako je prikazano izrazom (1). S druge strane, koeficijent plastičnosti (R_p) jednostavno je određen kako slijedi [28]:

$$R_p = PL/LL \tag{2}$$

Drugi parametar koji se primjenjuje za određivanje plastičnosti jest omjer plastičnosti, P_r [28]:

$$P_r = PI/PL \tag{3}$$

Prema definicijama iz izraza (2) i (3), korelaciju između R_p i P_r moguće je odrediti kako slijedi:

$$R_p = \frac{1}{1 + P_r} \tag{4}$$

$$P_r = \frac{1}{R_p} - 1 \tag{5}$$

Iako su ti parametri međusobno fizikalno povezani, različito se definiraju. Nadalje, uzimajući u obzir odnos PI-LL, međusobni odnosi ovih parametara moguće je prikazati kako slijedi:

$$PI = (1 - R_p) \times LL = \frac{P_r}{1 + P_r} \times LL \tag{6}$$

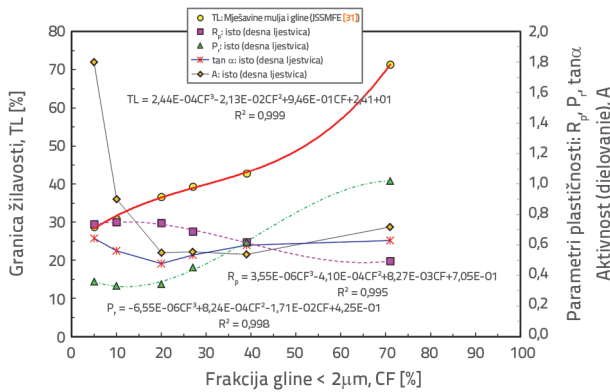
Prema tome, korelacija između ovih parametara prikazana je na slici A1 u Prilogu u odnosu na A-liniju ($PI = \tan\alpha (LL - 20)$, $\tan\alpha = 0,73$) u Casagrandeovom dijagramu plastičnosti kao "Equi- R_p (P_r) linije". Tangenta kuta plastičnosti povezanog s gradijentom A-linije u Casagrandeovom dijagramu plastičnosti $\tan\alpha$ izračunava se na sljedeći način [29]:

$$\tan\alpha = \frac{PI}{LL - 20} \tag{7}$$

Aktivnost (A) je definirana kao omjer indeksa plastičnosti i frakcije gline - postotak materijala manjeg od μm [30]:

$$A = \frac{PI}{CF} \quad (8)$$

pri čemu CF predstavlja udio frakcije gline. U vezi s navedenim definicijama, slika 5. prikazuje primjer odnosa između granice žilavosti i frakcije gline (< 2 μm) u kontekstu određenih parametara koji definiraju plastičnost i aktivnost.



Slika 5. Ovisnost granice žilavosti o pokazateljima plastičnosti

U mješavinama gline i praha, udio frakcije gline ima ograničeni utjecaj na granicu žilavosti (TL) do 40 % [31]. Ako je viši od 40 %, stopa povećanja granice žilavosti očitija je nakon povećanja udjela frakcije gline. Sličan trend može se uočiti i kod ovisnosti omjera plastičnosti (P_p) o udjelu frakcije gline, tj. CF (%). Promjena koeficijenta plastičnosti (R_p) u odnosu na frakciju gline pokazuje drugačiji trend od prije prikazanih. S druge strane, čini se da je tangenta kuta plastičnosti ($\tan\alpha$) u uskom rasponu između 0,64 i 0,48 kada se udio frakcije gline poveća s 5 % na 70 %. Uz ta povećanja, 20 % udjela frakcije gline predstavlja granicu za ekstremne vrijednosti koje mijenjaju spomenute trendove u suprotnom smjeru. Zanimljivo je da se aktivnost (A) značajno smanjuje do udjela frakcije gline od 20 %, nakon čega slijedi stabilan trend. Ovaj odnos aktivnosti i udjela frakcije gline usporediv je s dijagramom indeksa klasifikacije za potencijal bubrenja iz Seed i sur. [32]. Njihov dijagram pokazuje da što su aktivnost i udio frakcije gline veći, to je veći potencijal bubrenja tla. Većina prije opisanih odnosa prikazana je na temelju polinomskih modela trećeg stupnja s visokim koeficijentom determinacije (slika 5).

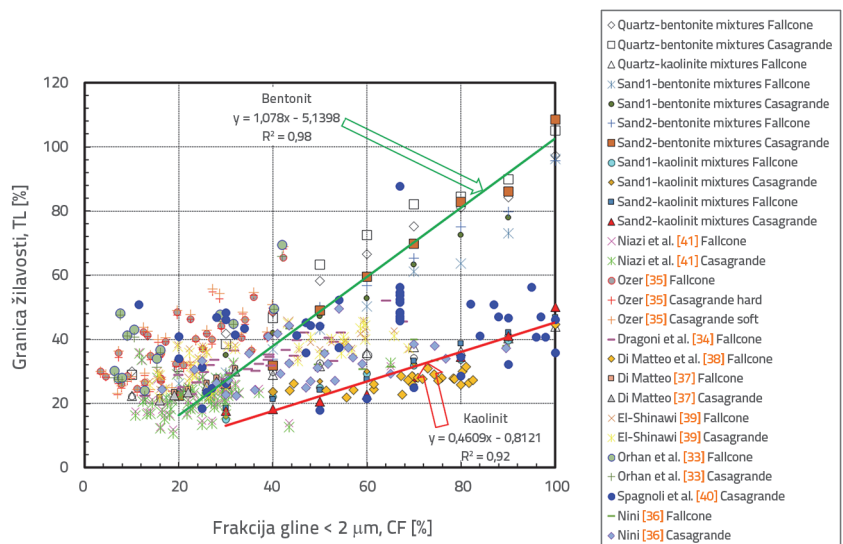
U vezi s povezanošću između udjela frakcije gline (eng. *clay fraction* - CF) i granice žilavosti (TL) prikupljeni su podaci iz više od 50 različitih publikacija, uključujući rezultate ispitivanja pomoću Casagrandeovog uređaja i padajućeg stošca. Uz ponovnu analizu rezultata ispitivanja mješavina pijeska i kaolinita (SK), pijeska i bentonita (S-B), praha

i kaolinita (M-K) te praha i bentonita (M-B) iz istraživanja koje su proveli Karakan i Demir [27], utvrđen je i odnos TL i CF na temelju rezultata ispitivanja iz literature (slika 6.). Slika prikazuje podatke o glinama različitih vrijednosti plastičnosti i mineraloških obilježja [33-41]. Prema rezultatima, ako se udio frakcije gline poveća s 4 % na 40 %, vrijednost granice žilavosti je između 18 % i 48 %. Zabilježeno je da se vrijednost granice žilavosti linearno povećava u mješavinama pijeska i kaolinita te pijeska i bentonita povećanjem udjela frakcije gline. Jednačbe za mješavine pijeska i kaolinita te pijeska i bentonita prikazane su pojedinačno izrazima (9) (puna crvena linija) i (10) (puna zelena linija). Treba imati na umu da navedene jednačbe nisu izvedene primjenom svih podataka iz slike 6., već jednostavno predstavljaju odnos mješavina S-K i S-B:

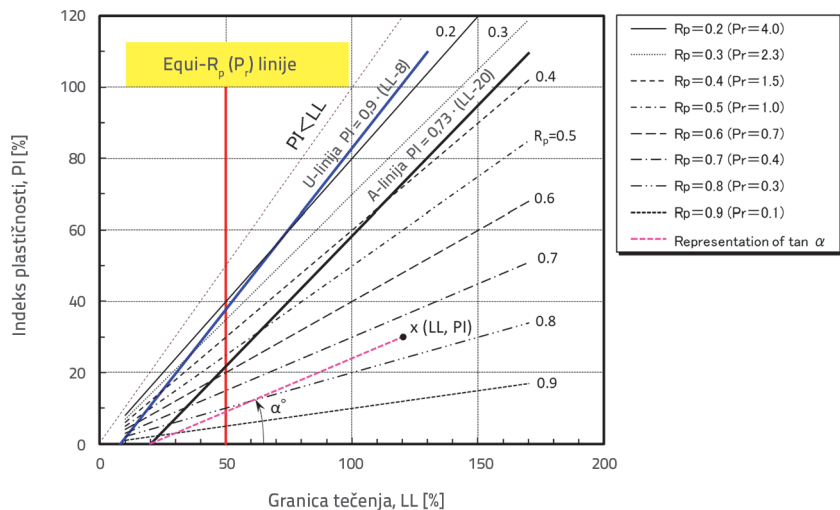
$$TL = 0,4609 \times CF - 0,8121 \quad (9)$$

$$TL = 1,078 \times CF - 5,1398 \quad (10)$$

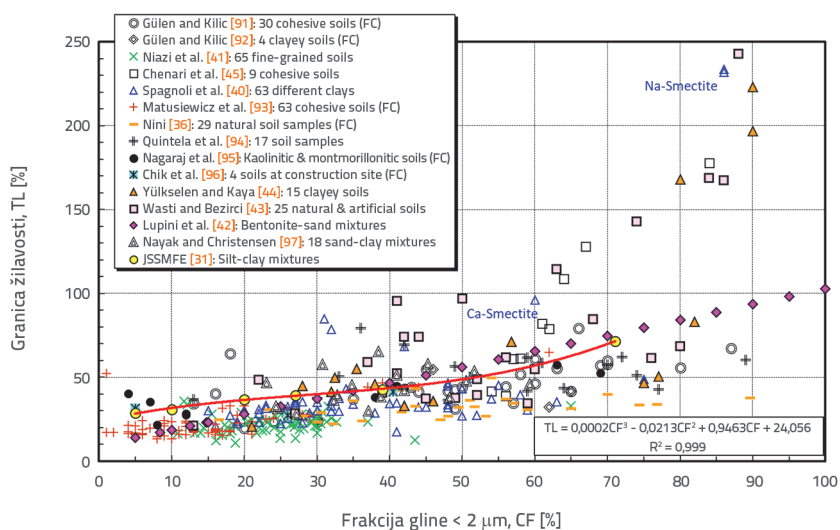
Zabilježene su dvostruko veće vrijednosti granice žilavosti u mješavinama pijeska i bentonita u usporedbi s vrijednostima granice žilavosti u mješavinama pijeska i kaolinita. Vrijednosti granice žilavosti za čisti kaolinit i bentonit iznosile su 45,5 %, odnosno 102,7 %. Također je utvrđeno da gline s visokim vrijednostima granice tečenja imaju značajno veće vrijednosti granice žilavosti. Ovo istraživanje potvrđuje rezultate ispitivanja kaolinskih glina iz Spagnoli i sur. [40]: granica žilavosti iznosila je 60 %. To pokazuje da je ponašanje kompatibilno sa sličnim glinama u literaturi. Na primjer, analizom dobivenih rezultata iz Lupini i sur. [42] vidljiv je linearan porast vrijednosti granice žilavosti povećanjem udjela frakcije gline u mješavinama bentonita i pijeska (slika 7.). Dok je vrijednost granice žilavosti za



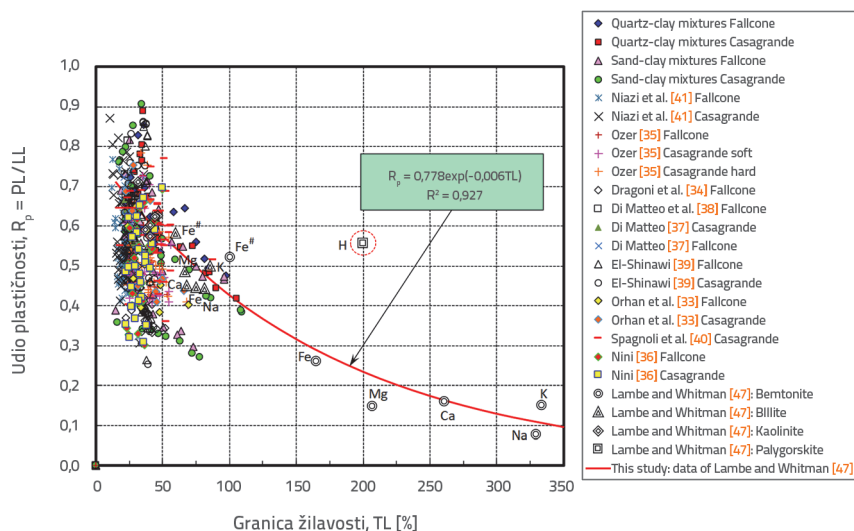
Slika 6. Dijagram raspršenosti granice žilavosti u odnosu na frakcije gline (vrijednosti granice žilavosti temelje se na rezultatima ispitivanja pokusima padajućeg stošca i Casagrandeovih pokusa)



Slika 7. Equi- R_p linije prikazane u dijagramu plastičnosti



Slika 8. Dijagram raspršenosti granice žilavosti u odnosu na udio frakcije gline s obzirom na mineralogiju gline



Slika 9. Dijagram raspršenosti koeficijenta plastičnosti u odnosu na granicu žilavosti (vrijednosti granice žilavosti temelje se na rezultatima pokusa padajućeg stošca i Casagrandeovih pokusa)

mješavinu 5 postotnog bentonita i 95 postotnog pijeska iznosila 12 %, u uzorku od 100-postotnog bentonita iznosila je 110 %. Vrijednosti granice žilavosti iz ovog ispitivanja prilično su kompatibilne s vrijednostima koje se nalaze na slici 6 za mješavinu pijeska i bentonita. Promjena CF-TL u glinama različitih mineraloških obilježja prikazana je na slici 8. U tu svrhu, slika 8. prikazuje promjenu granice žilavosti u odnosu na frakciju gline primjenom rezultata ispitivanja iz Spagnoli i sur. (2018.) za gline različitih mineraloških obilježja (Ca-smektit i Na-smektit). Za glinu na bazi Ca-smektit frakcija gline iznosi 60 %, a granica žilavosti 100 %. Međutim, za gline na bazi Na-smektita s vrlo visokim vrijednostima granica tečenja ($LL > 500$ %), granica žilavosti iznosila je 230 % za udio frakcije gline iznad 85 %. Slično rezultatima dobivenim ispitivanjem 25 vrsta prirodnih i umjetnih tala koje su proveli Wasti i Bezirci [43], 15 vrsta glina koje su proveli Yükselen i Kaya [44] i 9 vrsta glina koje su proveli Chenari i sur. [45], dobiveni rezultati ovdje prikazuju linearno povećanje granice žilavosti povećanjem udjela frakcije gline. Prethodna istraživanja prikazuju jasnu povezanost granice žilavosti i frakcije gline. Gline na bazi Na-smektita i umjetne mješavine pijeska i gline obično pokazuju strmiji porast granice žilavosti povećanjem udjela frakcije gline, pri čemu vrijednosti granice žilavosti iznose između 100 % i 250 %. Međutim, preostale vrijednosti slijede blaži trend, krećući se pod kutom od približno 30° u odnosu na horizontalu (slika 8.). Osim toga, puna crvena linija prikazana na slici predstavlja trend kretanja za mješavine praha i gline [46], a rezultati su slični onima iz Lupini i sur. [42].

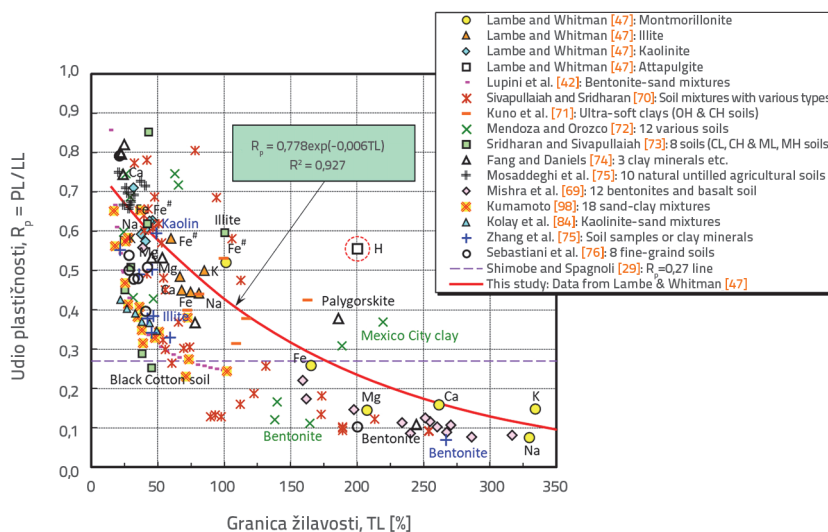
Koeficijent plastičnosti (R_p) izražava se kao omjer granice plastičnosti tla i granice tečenja. U ovom dijelu istražuje se odnos između plastičnosti tla i granice žilavosti. Odnos granice žilavosti i koeficijenta plastičnosti dobiven je uspoređivanjem rezultata ispitivanja koja su proveli Karakan i Demir [26,

27] i 100 eksperimentalnih rezultata iz literature. Slika 9. prikazuje da je u većini eksperimentalnih podataka vrijednost TL manja od 50, a odgovarajuće R_p vrijednosti grupirane su između 0,3 i 0,9. Vrijednosti granice žilavosti (TL) temelje se na rezultatima pokusa padajućeg stošca i Casagrandeovih pokusa. Slika 9. uključuje podatke iz istraživanja koje su proveli Lambe i Whitman [47], u kojemu iznose sažetak Atterbergovih granica (LL, PL, PI i SL) različitih glina. U tipične minerale gline ubrajaju se kaolinit, ilit i montmorilonit. Osim toga, Na+, K+, Ca++, Mg++ i Fe++ su izmjenjivi kationi u ovim mineralima gline. Na primjer, granica tečenja za Na-montmorilonit značajno je veća od granice tečenja za Ca-montmorilonit. Prema tim podacima vrijednosti LL za Ca-montmorilonit i Na-montmorilonit značajno su visoke te se kreću između 140 i 710 %, ovisno o ranije navedenoj vrsti kationa. S druge strane, LL vrijednosti kaolinita razmjerno su niske (38-59 %).

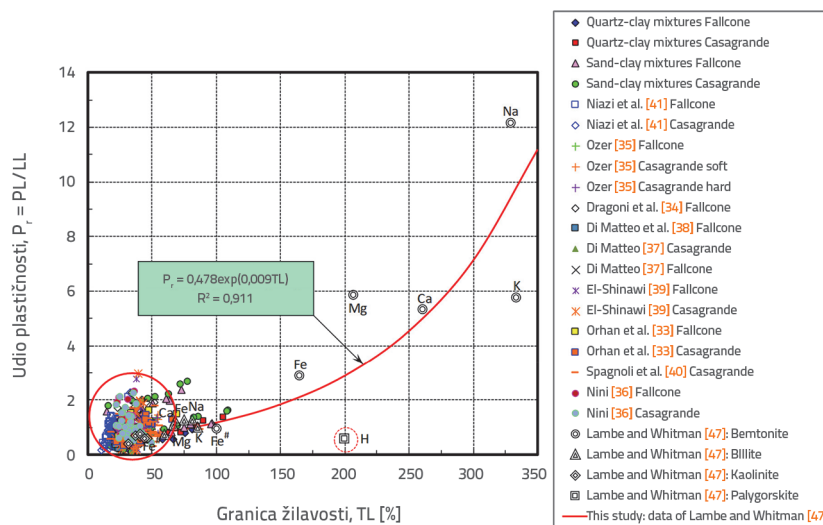
Na temelju analize velikog broja rezultata ispitivanja na prirodnim i umjetnim glinenim tlima, slika 10. otkriva da ne postoji čvrsta veza između R_p i TL. Međutim, utvrđena je približna korelacija, izraz (11) na temelju podataka Lambea i Whitmana [47], kao što prikazuje puna crvena linija (također na slici 9.).

$$R_p = 0,778 \times e^{(-0,006TL)} \quad (11)$$

Prema ovom generaliziranom odnosu, TL vrijednosti koje odgovaraju R_p vrijednostima od 0,7 i 0,1 iznose 25 %, odnosno 350 %. Budući da je parametar koeficijenta plastičnosti R_p omjer PL i LL, možemo preinačiti jednadžbu A-linije "PI = 0,73 (LL-20)" u "PL = 0,27 LL + 14,6", dijeleći dvije strane jednadžbe s LL dobivamo vrijednost koeficijenta plastičnosti R_p od 0,27, koji je samo izraz diferencijalne vrijednosti gline i praha. Ovaj parametar predlažemo kao neku vrstu granične vrijednosti za različita ponašanja povezana s koeficijentom plastičnosti. Odstupanje od ove vrijednosti (0,27) trebalo bi biti izraz visoke plastičnosti. Linija koja prikazuje koeficijent plastičnosti $R_p = 0,27$ dobiven iz istraživanja koje su proveli Shimobe i Spagnoli [29] također je prikazana na slici 10. Evidentno je da se podaci za bentonit nalaze ispod te linije. Na slici 9. može se primijetiti da kaolinit i ilit imaju nižu granicu žilavosti, no pokazuju veće omjere plastičnosti. Bentoniti pokazuju veće vrijednosti granice žilavosti koje odgovaraju manjim koeficijentima



Slika 10. Sinteza prethodnih podataka za utvrđivanje odnosa između R_p i TL s obzirom na mineralogiju gline



Slika 11. Dijagram raspšenosti omjera plastičnosti u odnosu na granicu žilavosti (vrijednosti granice žilavosti temelje se na rezultatima pokusa padajućeg stošca i Casagrandeovih pokusa)

plastičnosti, što je dobar pokazatelj plastičnosti. Potrebno je istaknuti da se tla niže aktivnosti nakupljaju u zoni ograničenoj granicom žilavosti i koeficijentom plastičnosti R_p u rasponu između 0 % do 100 %, odnosno 0,2 do 0,9. Bentonit, palygorskite i montmorilonit se nalaze na kraju tog odnosa, pokazujući visok raspon granice žilavosti i niži koeficijent plastičnosti (slika 10). Netipične vrijednosti označene su crvenom isprekidanom obavijenom linijom (u daljnjem tekstu slično).

Uz liniju trenda u skladu s podacima Lambea i Whitmana [47], slika 11. u crvenom krugu prikazuje oscilacije omjera plastičnosti R_p i granice žilavosti tala dobivenih iz eksperimentalnih podataka Karakana i Demira [26, 27] i podataka iz literature. Kao što se može vidjeti iz eksperimentalnih rezultata, granica žilavosti varira

između 10 % i 60 %, a P_r je na granici između 0 i 2. Suprotno tome, bentoniti imaju vrlo visok omjer plastičnosti P_r u rasponu od 3 do 14 (slika 12.). Također je zabilježen eksponencijalni odnos između omjera plastičnosti (P_r) i granice žilavosti, kako je prikazano u izrazu (12) (puna crvena linija na slikama 11. i 12.):

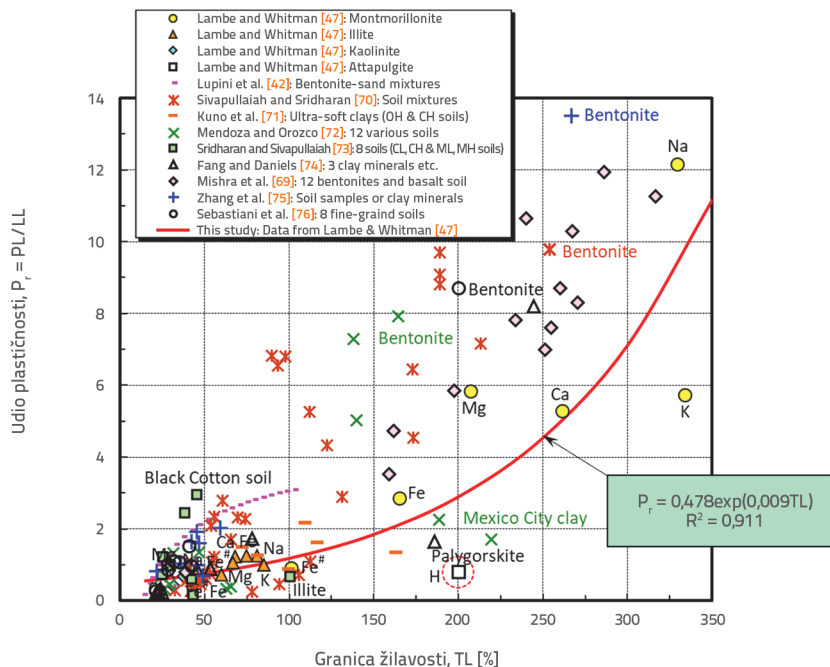
$$P_r = 0.478 \times e^{0.009TL} \quad (12)$$

Slično se može reći za ovisnost omjera plastičnosti o granici žilavosti, međutim, granica žilavosti pokazuje eksponencijalni rast povećanjem vrijednosti P_r . Podaci o ilitu, kaolinitu i paligorskitu nalaze se iznad ili ispod krivulje zbog njihovog P_r , dok se montmorilonit koji pokazuje visoki P_r nalazi iznad te krivulje.

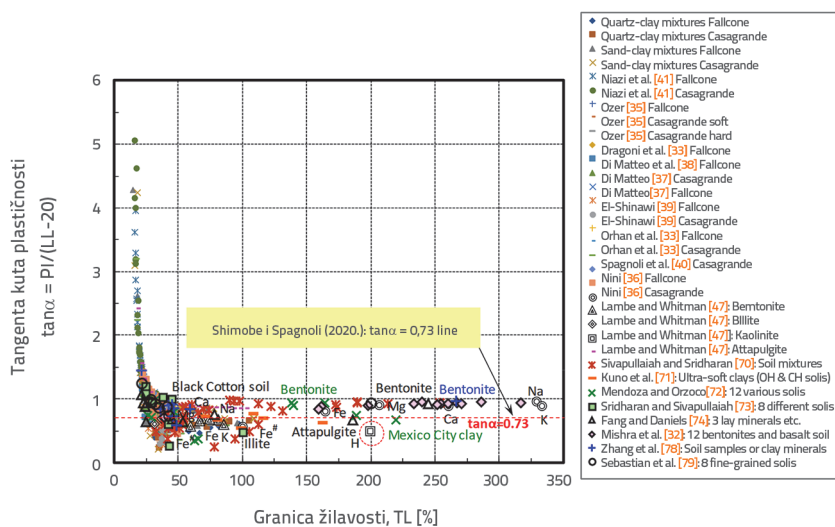
Slika 13. prikazuje oscilaciju između granice žilavosti i tangente kuta plastičnosti (tan α u izrazu (7)). Dok je granica žilavosti iznosila oko 16 %, tan α iznosio je 5. Primjećuje se brzi pad obrnut s povećanjem vrijednosti granice žilavosti. Potom se pojavljuje raspodjela oko konstante tan α = 0,73 koju su predložili Shimobe i Spagnoli [48] za povećanje TL vrijednosti (za TL između 50 % i 350 %). Nadalje, vrijednost granice žilavosti dobivene za bentonit viša je u odnosu na kaolinit ili ilit. S obzirom na veliku količinu podataka dobivenih u literaturi, tan α pokazuje jasno kretanje vrijednosti granice žilavosti do 25 %, međutim, ovaj se dio sastoji od manje količine podataka. Osim ove vrijednosti TL, vrijednosti tan α raspršene su u rasponu od 0,4 do 1, a prosječna vrijednost od 0,73 (što je jednostavno nagib A-linije u dijagramu plastičnosti) razumna je vrijednost za procjenu. Iz različitih parametara koji predstavljaju plastičnost tla može se zaključiti da su vrijednosti granice žilavosti za prirodna tla manje od 50 do 60 %.

3.2. Primjena granice žilavosti za predviđanje karakteristika zbijenosti

Mnoga istraživanja u literaturi predlažu metode za procjenu vrijednosti optimalnog udjela vlage (OWC) i najveće suhe gustoće (MDD), koje su funkcije Atterbergovih granica (tablica 3.). S tim u vezi Gurtug i Sridharan [16] objavili su učinak energije zbijanja na karakteristike zbijenosti gline. Proveli su



Slika 12. Sinteza prethodnih podataka za utvrđivanje odnosa između P_r i TL s obzirom na mineralogiju gline



Slika 13. Dijagram raspršenosti tangente plastičnosti u odnosu na granicu žilavosti

niz standardnih i modificiranih Proctorovih postupaka kako bi odredili karakteristike zbijenosti sitnozrnatog tla različite mineralogije i podrijetla (tj. kaolinit, bentonit, tuzlanska glina, akdenizska glina i glina iz Değirmenlika). Provedbom 22 pokusa dobiveni su izrazi $OWC = 0,92 \cdot PL$ i $MDD = 0,92 \cdot \rho_{d-PL}$ (pri čemu je ρ_{d-PL} suha gustoća pri granici plastičnosti $\rho_{d-PL} = G_s \rho_w / (1 + G_s PL / 100)$) za standardni učinak zbijanja. Sridharan i Nagaraj [49] proveli su različita eksperimentalna istraživanja na standardnoj Proctorovoj energetskej razini kako bi odredili koji je indeksni pokazatelj u korelaciji s karakteristikama zbijenosti gline. Autori tvrde da su povezanosti između granice plastičnosti i karakteristika zbijenosti mnogo bolje od onih

Tablica 3. Sažetak empirijskih jednadžbi koje su predložili različiti istraživači (prema standardnom Proctorovom učinku)

Istraživanje	Empirijske jednadžbe za optimalan udio vode i najveću suhu gustoću	
Gurtug i Sridharan [16]	OWC = 0,92PL	MDD = 0,92 ρ_{d-PL}
Sridharan i Nagaraj [49]	OWC = 0,92PL	MDD = 21,459 - 0,23PL
Sivrikaya [17]	OWC = 0,942PL	MDD = 21,97 - 0,2538PL
Gunaydin [22]	OWC = 0,323LL + 0,563PL	MDD = 0,7LL - 0,62PL
Đjoković i sur. [50]	OWC = 4,18 + 0,16LL + 0,323PL	MDD = 0,214 - 0,078LL - 0,05PL
Pillai i Vinod [51]	OWC = 0,172LL + 0,563PL	MDD = 3,142 ρ_{d-LL} + 7,42 ρ_{d-PL}
Vinod i Pillai [18]	OWC = 0,615TL	MDD = 1,134 ρ_{d-TL}
Pillai i Vinod [24]	OWC = 0,623TL	MDD = 1,15 ρ_{d-TL}

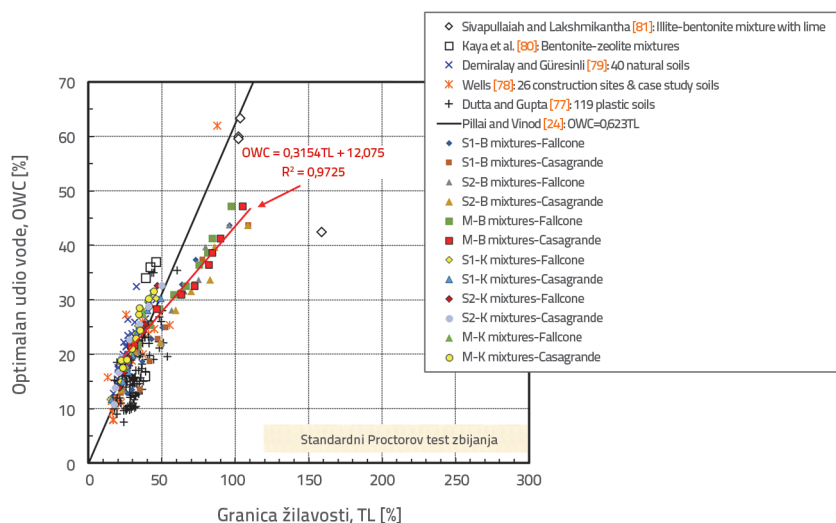
ρ_{d-PL} , ρ_{d-LL} i ρ_{d-TL} označavaju suhu gustoću na granici žilavosti, odnosno na granicama tečenja i plastičnosti

između granice tečenja i granice plastičnosti. Jednadžbe koje su predložili Sridharan i Nagaraj [49] u potpunosti su usklađene s onima koje su predložili Gurtug i Sridharan [15]. Sivrikaya [17] je odredio jednadžbe između PL, MDD i OWC kako bi procijenio standardna svojstva zbijenosti na temelju objavljenih rezultata eksperimenata na glinama iz različitih područja u Turskoj. Na temelju analize višestruke linearne regresije, Günaydin [22] je predložio jednadžbe za procjenu vrijednosti optimalnog udjela vlage i najveće suhe gustoće pri standardnoj Proctorovoj energiji, ovisno o Atterbergovim granicama (LL, PL) sitnozrnatog tla. Slično istraživanje proveli su Djoković i sur. [50] u Srbiji. Kao rezultat analize višestruke linearne regresije, autori su predložili jednadžbe ovisno o LL i PL sitnozrnih tala. Pillai i Vinod [51] utvrdili su odnose između energije zbijanja i svojstava zbijenosti na temelju vrijednosti LL i PL sitnozrnatog tla. Autori su utvrdili da je granica plastičnosti utjecala na najveću suhu gustoću tla, a ne granica tečenja, na svim razinama primijenjene energije. Prema njihovim rezultatima ispitivanja, parametri zbijenosti sitnozrnatog tla ne mogu se točno predvidjeti pomoću povezanosti koje uključuju samo jedan indeksni pokazatelj.

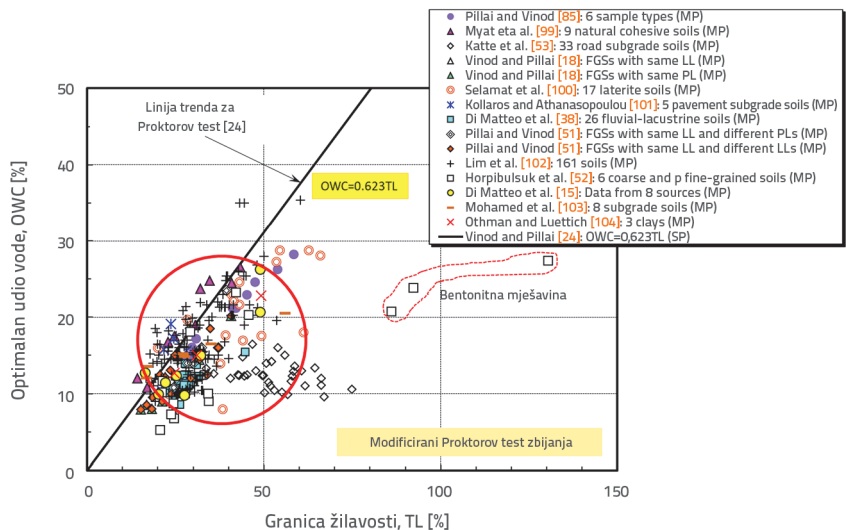
Pregledom i analizom literature objavljene o standardnim karakteristikama zbijenosti sitnozrnatog tla, Vinod i Pillai [18] dokazali su da granica žilavosti, kao funkcija granice tečenja i plastičnosti, dobro korelira s najvećom suhom gustoćom i optimalnim udjelom vlage. Na temelju podataka iz drugog istraživanja koje su proveli isti autori, empirijske jednadžbe iz tablice 3. predložene su za predviđanje karakteristika zbijenosti, pod standardnom Proctorovom energijom, primjenom granice žilavosti [24]. Autori su ispitali prirodna i komercijalno dostupna tla zajedno s lokalno raspoloživim riječnim pijeskom. Kako bi se odredili relevantni parametri, ispitana su tri prirodna tla, točnije morska glina iz indijskog lučkog grada Cochin, glina iz indijske regije Kuttanad i glina iz indijskog sela Thonakkal, kao i kaolinit i bentonit. Izvedeno je nekoliko jednadžbi na temelju analize višestruke linearne regresije za procjenu karakteristika zbijenosti sitnozrnatih tala uzimajući u obzir sva 493 rezultata objavljena u literaturi do danas. Rezultati analize regresije prikazani su u posljednjim trima jednadžbama u tablici 3. (u posljednjim trima jednadžbama primjenjuje se parametar TL i ρ_{d-TL} naročito za modele predviđanja optimalnog udjela vlage

i najveće suhe gustoće pri čemu je ρ_{d-TL} suha gustoća pri granici žilavosti TL; $\rho_{d-TL} = G_s \rho_w / (1 + G_s TL / 100)$. Tablica prikazuje sažetak empirijskih jednadžbi koje su predložili različiti istraživači.

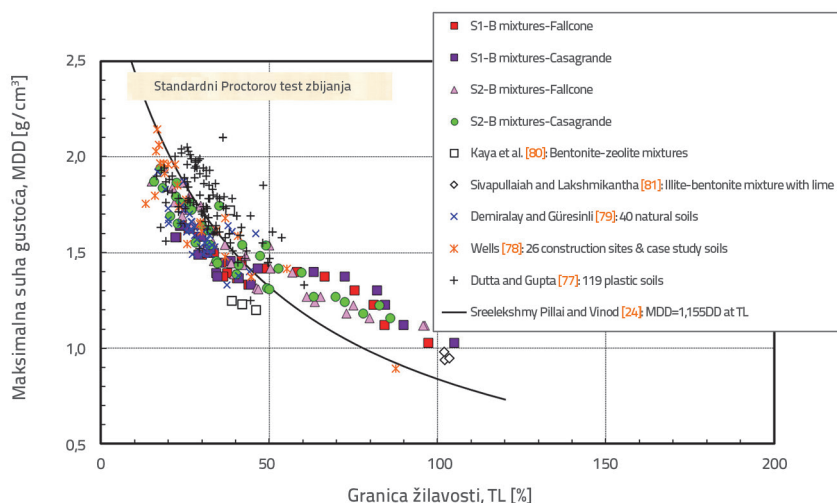
U daljnjem tekstu primjenjivat ćemo navedene izraze Pillajia i Vinoda [24] za raspravu o parametrima zbijenosti. Primjenom rezultata standardnog Proctorovog pokusa koji su do sada objavljeni u literaturi i uzimajući u obzir veliku količinu podataka (otprilike 500), promjene optimalnog udjela vlage promjenom granice žilavosti prikazane su na slici 14. Vidljivo je da su podaci povezani s odnosom optimalnog udjela vlage i granice žilavosti, na temelju podataka iz literature i rezultata ispitivanja mješavina S-K i M-K



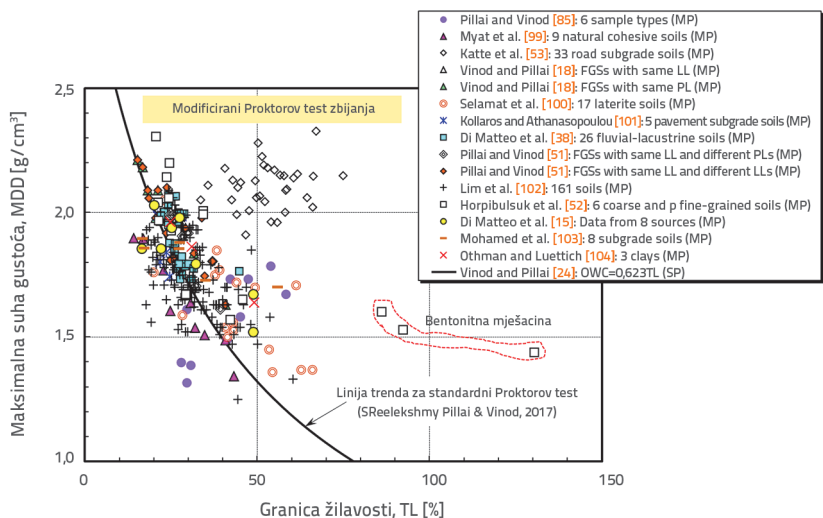
Slika 14. Odnos optimalnog udjela vlage i granice žilavosti za standardni Proctorov postupak



Slika 15. Odnos optimalne vlažnosti i granice žilavosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa zbijanja – podaci preuzeti iz literature



Slika 16. Odnos najveće suhe gustoće i granice žilavosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa zbijanja

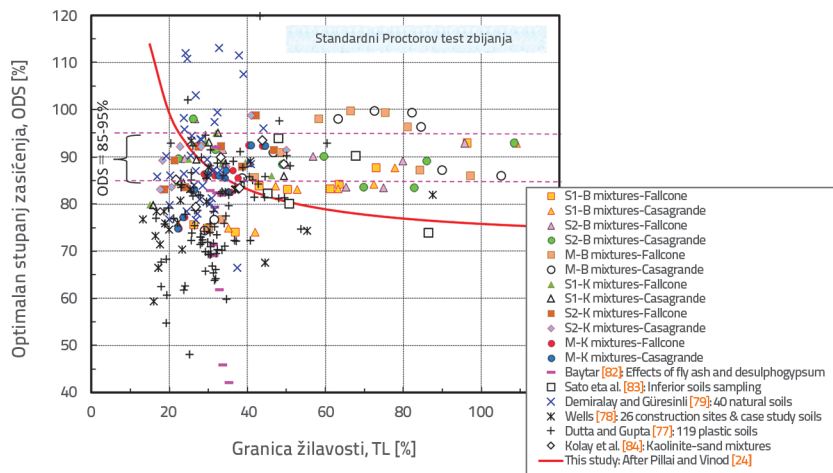


Slika 17. Odnos suhe gustoće i granice žilavosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa zbijanja – podaci preuzeti iz literature

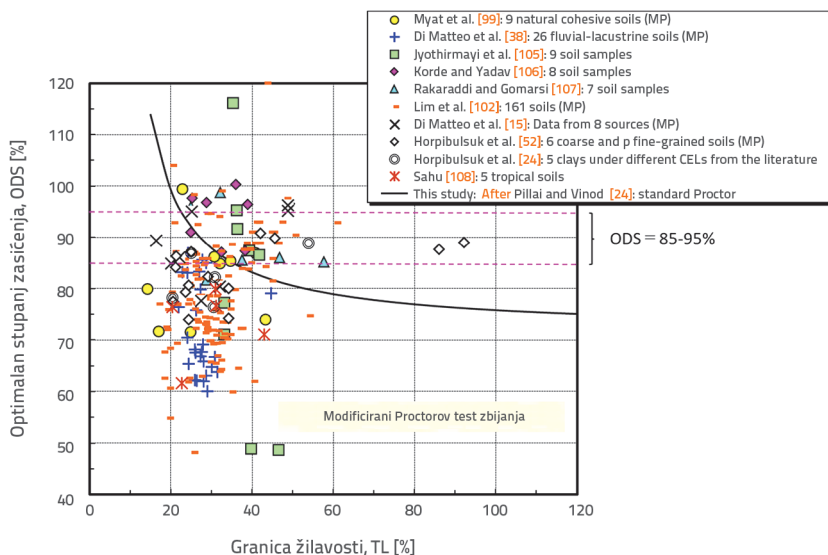
kompatibilni s podacima (puna crna linija) koje je predložio [24]. Jednadžba na slici 14. je nova (puna crvena linija) i uspostavlja odnos između optimalnog udjela vlage i granice žilavosti na temelju autorovih vlastitih rezultata ispitivanja mješavina pijeska - praha - gline.

Više od 350 rezultata dobivenih modificiranim Proctorovim postupkom primijenjeno je za prikaz promjene optimalnog udjela vlage promjenom granice žilavosti na slici 15. Za utvrđivanje ovog odnosa primijenjeni su rezultati ispitivanja sitnozrnatog (prirodnog i umjetnog), organskog, šljunčanog i pjeskovitog tla. Kao što se može vidjeti, jednadžba (crna puna linija) koju su predložili Pillai i Vinod [24] i koja se temelji na standardnoj Proctorovoj energiji ne daje značajan trend. Vrijednost granice žilavosti mijenjala se od 15 % do 60 % primjenom modificirane Proctorove energije, a vrijednosti optimalnog udjela vlage bile između 8 % i 27 %, kako je prikazano crvenim krugom. Nadalje, mješavine bentonita pokazuju izrazito netipične vrijednosti (skupina podataka okružena crvenom točkastom linijom), kao i na slici 14.

Slike 16. i 17. prikazuju odnose između optimalnog udjela vlage i granice žilavosti dobivene iz rezultata standardnog, odnosno modificiranog Proctorovog postupka. U uzorcima zbijenim pod standardnom Proctorovom energijom najveća suha gustoća općenito je kompatibilna s jednadžbom (puna crvena linija) koju su predložili Pillai i Vinod [24]. Međutim, uzimajući u obzir rezultate i standardnog i modificiranog Proctorovog postupka iz slike 16. i 17., zabilježeno je drugačije ponašanje bentonita s visokom plastičnošću. Analiza slike 17., koja se temelji na podacima iz literature, prikazuje je da odnos između granice žilavosti i suhe gustoće varira ovisno o vrsti tla. Mješavine bentonita naročito pokazuju veće vrijednosti TL i manju najveću suhu gustoću [52], no materijali cestovnih podloga i podaci dobiveni iz tala izloženih modificiranim Proctorovim postupcima (npr. [53]) daju niže vrijednost TL i više vrijednosti najveće suhe gustoće (slika 17.). Potrebno je istaknuti da su podaci iz Katte i sur. [53]



Slika 18. Odnos stupnja zasićenosti i granice žilavosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog pokusa zbijanja



Slika 19. Odnos stupnja zasićenosti i granice žilavosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa zbijanja – podaci preuzeti iz literature

dobiveni ispitivanjem cestovnih podloga u Kamerunu u Africi. Uzorke čine glinoviti lateritni šljunak, od kojih većina pripada razredu A-2-7 prema sustavu klasifikacije Američke udruge za javne ceste i transport (AASHTO). Udio šljunka, pijeska, kao i udio sitnih čestica (praha i gline) kreću se između 47,2 i 86,5 %, 2,9 i 13,7 %, odnosno 10,5 i 38,2 %. Osim toga, Atterbergove granice tala kreću se između 43,6 i 92,6 % za granice tečenja, 26,5 i 62,1 % za granice plastičnosti i 13,6 i 44,3 % za indeks plastičnosti. Karakteristike zbijenosti također su navedene u bazi podataka. Vrijednosti optimalnog udjela vlage, najveće suhe gustoće i kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) bile su između 9,6 i 16,5 %, 1,910 i 2,328 g/cm³ odnosno 14,2 i 49,5 %. Rezultati stoga pokazuju da su uzorci prikladni kao materijal za ceste. Zbog različitih svojstava materijala, vrijednosti TL izrazito su visoke (33,7-74,9 %) unatoč značajno visokim vrijednostima najveće suhe gustoće.

Slike 18. i 19. prikazuju odstupanje rezultata dobivenih standardnim i modificiranim Proctorovim postupkom između optimalnog stupnja zasićenosti (ODS) za najveću suhu gustoću - optimalan udio vlage odnosno granicu žilavosti. Nadalje, referentne crte (crvena puna crta) određene na temelju jednadžbi Pillaija i Vinoda [24] također su prikazane zajedno s rezultatima ispitivanja. Rezultati ispitivanja pokazuju da optimalni stupanj zasićenosti varira između 85 % i 95 % za visoke vrijednosti granice žilavosti u mješavinama pijeska i bentonita te praha i bentonita. Za tla niske plastičnosti u literaturi (20 % ≤ TL ≤ 40 %), vrijednosti stupnja zasićenosti pri standardnoj Proctorovoj energiji pokazale su raspršene vrijednosti između 60 % i 110 %. Slika 18. pokazuje da pri istom stupnju zasićenosti, vrijednosti granice žilavosti uvelike su pod utjecajem mineralogije gline i većina podataka nije ograničena granicama stupnja zasićenosti od 85 % do 95 % (npr. [54]). Stoga nije moguće dobiti podatke o jedinstvenoj povezanosti granica žilavosti i stupnja zasićenosti. Slika 19. analizira dijagram stupnja zasićenosti u odnosu na TL na temelju 246 podataka kada vrijednosti TL variraju između 20 % i 50 %, dok su odgovarajuće vrijednosti stupnja zasićenosti u granicama između 60 % i 100 %. Slike 18. i 19. pokazuju da je optimalna razina zasićenosti ODS > 100 % teorijski nemoguća. Razlog tome možda leži u pouzdanosti triju različitih rezultata ispitivanja koji se odnose na

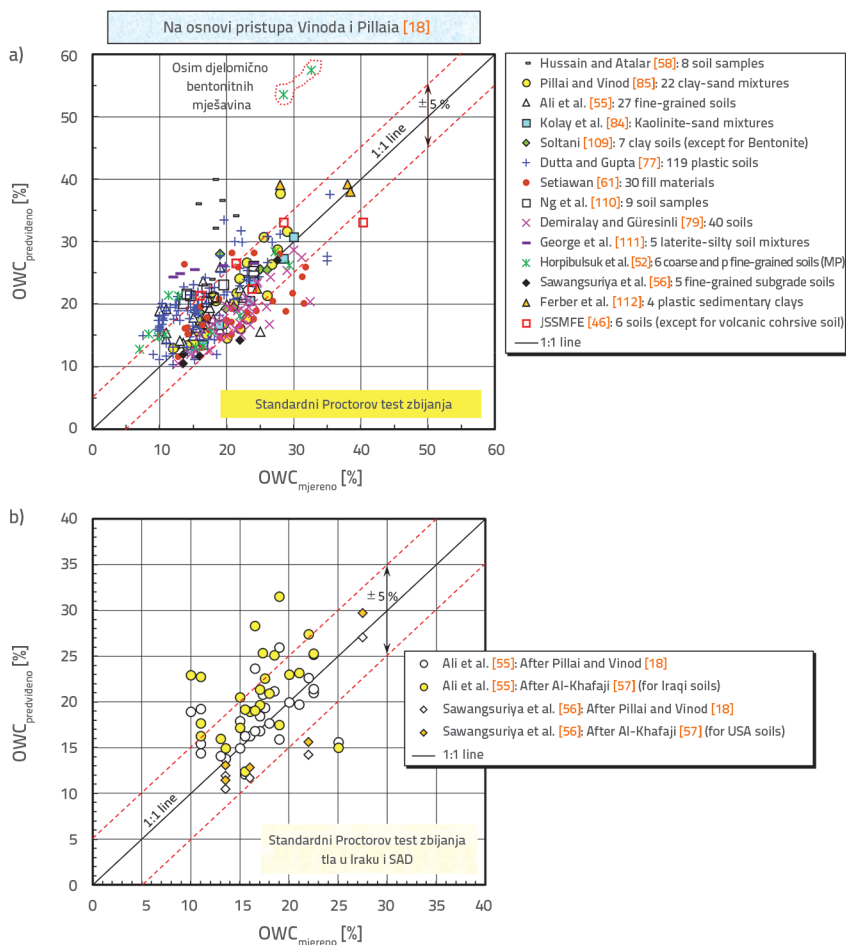
specifičnu težinu (G_s), udio vlage (w), vlažnu gustoću (ρ_t) ili suhu gustoću (ρ_d) pri izračunavanju stupnja zasićenosti S_r [%]. Kao što je već poznato, suha gustoća i stupanj zasićenosti mogu se izraziti na sljedeći način:

$$\rho_d = \rho_t \frac{1}{1 + \frac{w}{100}} \tag{13}$$

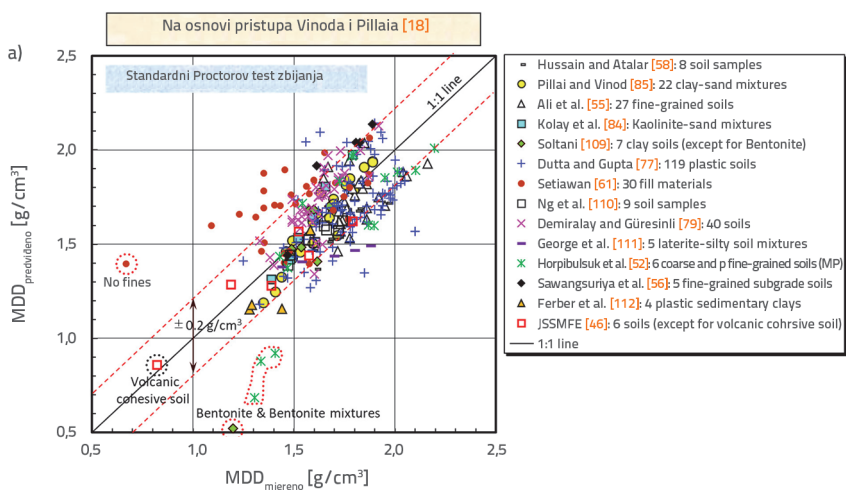
$$S_r = \frac{w \times G_s \times \rho_d}{G_s \times \rho_w - \rho_d} \tag{14}$$

Stoga je stupanj zasićenosti moguće izračunati kako slijedi:

$$ODS = \frac{OWC \times G_s \times MDD}{G_s \times \rho_w - MDD} \tag{15}$$



Slika 20. Usporedba predviđene optimalne vlažnosti i izmjerene optimalne vlažnosti na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa. a) veliki raspon tala diljem svijeta; b) usporedba s prethodno predloženim jednadžbama za tla u Iraku i SAD-u

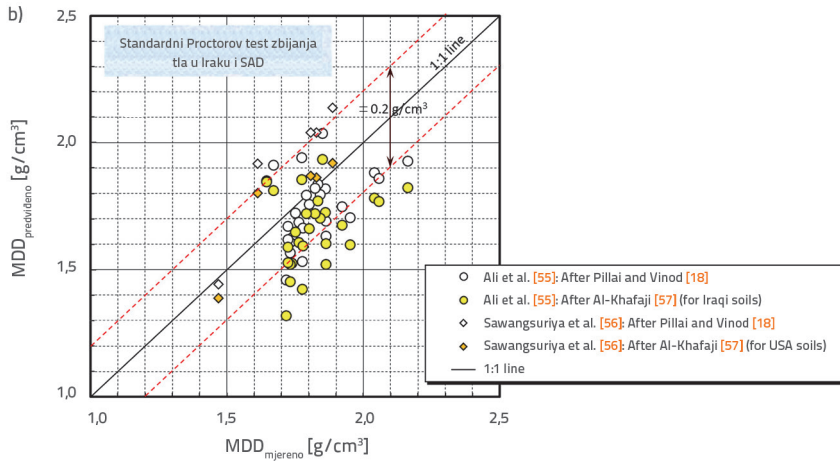


Slika 21. Usporedba predviđene i izmjerene najveće suhe gustoće na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa: a) veliki raspon tala diljem svijeta

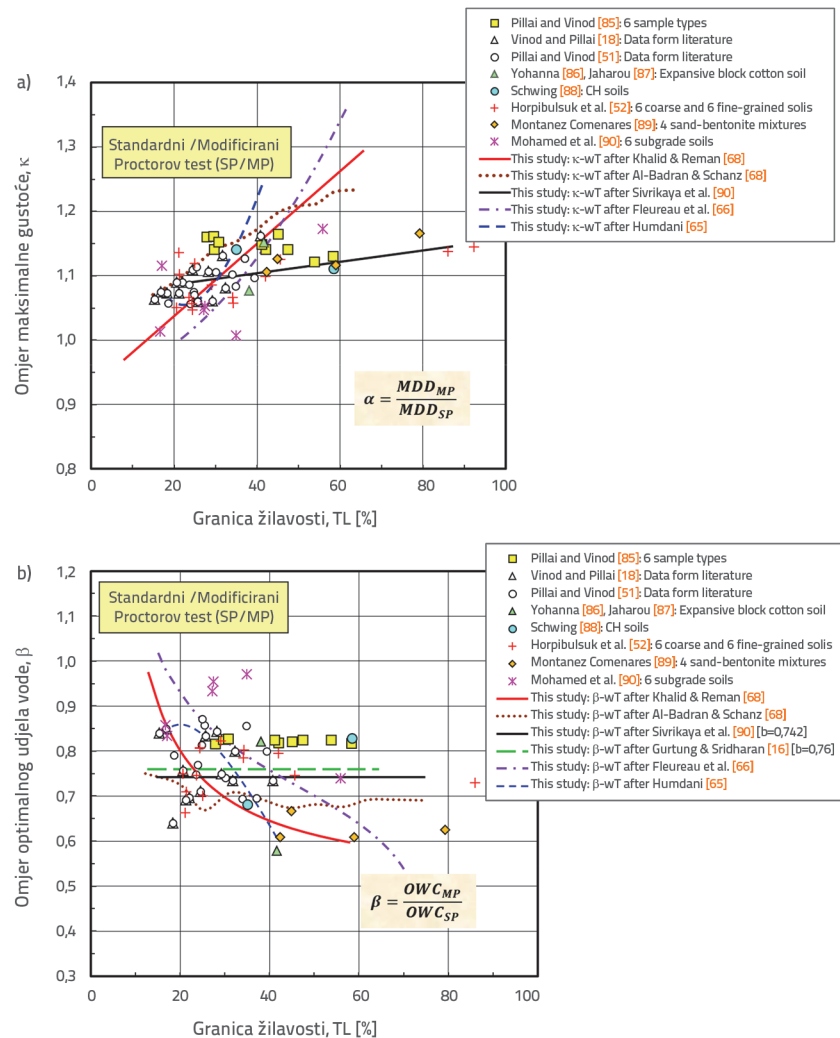
pri čemu je ρ_w gustoća vode ($= 1,0 \text{ g/cm}^3$). S druge strane, Spagnoli i Shimobe [48] predlažu da su u literaturi prisutne vrlo niske vrijednosti stupnja zasićenosti ($ODS < 40 \%$). Uzorci tla uglavnom uključuju glinasti pijesak, prah, pjeskovitu glinu, prašinstu glinu i tako dalje. Prema tome, i ovdje je vidljiva razlika između različitih vrsta tala. To može dovesti u pitanje pouzdanost primjene različitih pokusa za dobivanje specifične težine (G_s) koja se potom primjenjuje u izračunu stupnja zasićenosti (S_r).

Usporedba zabilježenih i predviđenih vrijednosti optimalne vlažnosti primjenom standardnog Proctorovog postupka prikazana za različita tla diljem svijeta, prikazana su na slici 20.a, na temelju Vinodijevog i Pillaijevog pristupa [24]. Jasno je da se izmjerena optimalna vlažnost slaže s predviđenom optimalnom vlažnošću s apsolutnom pogreškom od $\pm 5 \%$, osim za dio podataka (npr. mješavine bentonita). Osim toga, ispitali smo primjenjivost jednadžbi prethodno predloženih za specifična tla primjenjujući podatke dobivene ispitivanjem uzoraka tala na istim područjima. Tla iz Iraka i SAD-a [55, 56] kao i jednadžbe koje su predložili Pillai i Vinod [24] te Al-Khafaji [57] odabrana su u ovom slučaju kao tla za uzorkovanje i povezane predložene jednadžbe. Usporedba predviđanja temeljena na granici žilavosti uz upotrebu prethodnih empirijskih jednadžbi za posebna tla također je općenito zadovoljavajuća, kao što se također može vidjeti iz dijagrama na slici 20.b koji prikazuje izmjerene i predviđene optimalne vlažnosti. Iz ovih se slika vidi da razlika između izmjerene i predviđene optimalne vlažnosti iznosi približno $\pm 5 \%$ s apsolutnom pogreškom unutar raspona od $10 \% <$ izmjereni $OWC < 40 \%$, osim za dio podataka (npr. mješavine bentonita i podatke Hussaina i Atalara [58]).

Slike 21. a i 21.b prikazuju dijagrame predviđenih i izmjerenih vrijednosti najveće suhe gustoće. Vidi se da su predviđanja temeljena na granici žilavosti za najveću suhu gustoću dobra,



Slika 21. Usporedba predviđene i izmjerene najveće suhe gustoće na temelju rezultata standardnog Proctorovog testa: b) usporedba s prethodno predloženim jednadžbama za tla u Iraku i SAD-u



Slika 22. a) Odnos omjera najveće suhe gustoće (α) i granice žilavosti; b) Odnos omjera optimalne vlažnosti (β) i granice žilavosti

kao i za optimalnu vlažnost na slici 20. Razlika između izmjerene najveće suhe gustoće i predviđene najveće suhe gustoće iznosi samo ± 0,2 g/cm³ s apsolutnom pogreškom unutar raspona od 1,2 g/cm³ < izmjerena najveća suha gustoća < 2,2 g/cm³. Apsolutna pogreška u trenutnom istraživanju otprilike odgovara pogrešci navedenoj u literaturi koja je pronađena u prethodnim istraživanjima za predviđanja najveće suhe gustoće (empirijske formulacije, npr. [55, 59, 60]). Podaci dobiveni ispitivanjem bentonita i bentonitnih mješavina [52] pokazuju da je izmjerena najveća suha gustoća > predviđena najveća suha gustoća. Podaci iz Setiawana [61], koji djelomično obuhvaćaju materijale za nasipe koji se sastoje od lateritnog tla s krupnozrnatom udjelom ili bez sitnih čestica, također dokazuju obrnuto ponašanje (MDD_{predviden} > MDD_{izmjereno}), slika 21.a.

3.3. Učinak vrijednosti energije zasićenosti (standardni i modificirani Proctorov test zasićenosti)

Omjer MDD_{MP} i MDD_{SP} definiran je kako slijedi [62, 63]:

$$\kappa = \frac{MDD_{MP}}{MDD_{SP}} \quad (16)$$

pri čemu je κ bezdimenzijski parametar. Slika 22.a prikazuje promjenu κ u odnosu na granicu žilavosti. Kako vrijednosti granice žilavosti rastu, odgovarajuće izmjerene vrijednosti κ znatno se međusobno približavaju konstantnoj vrijednosti, a parametar κ je u rasponu od 1,00 do 1,20. Prema Farooqu i sur. [64], vrijednost za sitnozrnata tla κ bila su u rasponu se između 1,07 i 1,08. S druge strane, omjer OWCM_P i OWCS_P definiran je parametrom β [63]:

$$\beta = \frac{OWC_{MP}}{OWC_{SP}} \quad (17)$$

Ovisnost bezdimenzijskog parametra β o granici žilavosti prikazana je na slici 22.b.

Dijagram daje vrlo raspršene podatke za razliku od slike 22.a, i ne može se razaznati jasan trend. Osim toga, predviđanja optimalne vlažnosti, temeljena na Atterbergovim granicama, općenito su manje precizna od onih za najveću suhu gustoću. To se pripisuje prisutnosti i učinku sitnih čestica (prah i glina). Potrebno je istaknuti da β ima vrijednosti između 0,6 i 1,0. Farooq i sur. [64] prikazali su $\beta = 0,80$ do 0,83 za 105 uzoraka sitnozrnatih tala. Osim toga, linije trenda za bezdimenzijske parametre k i β objedinjene su i zajedno prikazane na slikama 22.a i 22.b, a zasnivaju se na granici žilavosti i nekoliko prethodnih rezultata istraživanja [16, 17, 65-68]. Kao rezultat toga, može se uočiti da su odnosi β i granice žilavosti za optimalnu vlažnost više raspršene od onih u dijagramu koji prikazuje odnos k i granice žilavosti za najveću suhu gustoću. Nadalje, iako se opći trend za vrijednosti k temeljen na kombiniranim ovisnostima povećava s povećanjem granice žilavosti, ne može se uočiti jasan trend za promjenu vrijednosti β s različitim granicom žilavosti, bez obzira na to je li ona konstantna ili opada u pokusima i predloženim jednadžbama. Međutim, korelacija k i granice žilavosti temeljena na rezultatima Sivrikaye [17] trenutačno se relativno dobro uklapa u čitav raspon rezultata ispitivanja. Konačno, prirodnim sitnozrnatim tlima s granicom žilavosti manjom od 50-60 % treba posvetiti dovoljno pažnje za praktičnu primjenu u zbijanju.

4. Zaključak

Za ovo istraživanje primijenjena je velika količina podataka za analizu ovisnosti svojstava zbijenosti i indeksnih pokazatelja o granici žilavosti (TL). Iz analize rezultata mogu se izvući sljedeći zaključci:

- U okviru ovog istraživanja primijenjena je baza s više od 1000 podataka, uključujući nedavna laboratorijska ispitivanja mješavina pijeska/praha i kaolinita/bentonita, kako bi se dobio pregled korelacije između granice žilavosti i udjela frakcije gline, koeficijenta plastičnosti, omjera plastičnosti, optimalne vlažnosti i maksimalne suhe gustoće.
- Postoji vrlo jasna korelacija između granice žilavosti, optimalne vlažnosti i najveće suhe gustoće s obzirom na različite energije zbijanja. Posebna tla (npr. mješavine bentonita) čine iznimku. Utvrđivanje Atterbergovih granica potrebno je za predviđanje TL, PL i LL kako bi se naknadno

odredile vrijednosti najveće suhe gustoće i optimalne vlažnosti. Dijagrami raspršenosti i odgovarajući empirijski odnosi također se mogu primijeniti za provjeru, s obzirom na to da je primjena Proctorovih postupaka, osobito za ispitivanje visokoplastičnih mješavina pijeska i gline te praha i gline, ponekad problematična. Ipak, plastičnost sitnozrnatog dijela tla može djelomično spriječiti prijenos potencijalne energije čekića na tlo. Prema tome, Proctorovi pokusi nisu uvijek primjenjivi jer su nam potrebni empirijski pristupi za predviđanje prije navedenih parametara, odnosno granice žilavosti ili granice plastičnosti i tečenja, najveće suhe gustoće te optimalne vlažnosti. S tim u vezi, jednadžbe dobivene u ovom istraživanju imaju potencijal, no to treba potvrditi podacima iz budućih istraživanja.

- Eksponecijalni trend opisuje ovisnost koeficijenta plastičnosti i omjera plastičnosti o granici žilavosti. Eksponecijalni trend prati mineraloška obilježja gline na temelju viših vrijednosti granice žilavosti (do 350 %) u vezi s ovisnosti koeficijenta plastičnosti i/ili omjera plastičnosti o granici žilavosti.
- Optimalni stupanj zasićenosti bio je u korelaciji s granicom žilavosti uzimajući u obzir dobro poznate referentne crte optimalnog stupnja zasićenosti. Osim toga, oblik krivulje u odnosima granice žilavosti i optimalnog stupnja zasićenosti nije se mijenjao promjenom Proctorove energije.
- Prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja iz literature, razlika između izmjerenih vrijednosti i vrijednosti predviđenih na temelju granice žilavosti je oko $\pm 5\%$ i $\pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ za optimalnu vlažnost i najveću suhu gustoću, osim za dio posebnih podataka (npr. smjese bentonita i laterita).
- S obzirom na eksperimentalne podatke, gline s višom granicom plastičnosti imaju nižu najveću suhu gustoću i višu optimalnu vlažnost od onih s nižom granicom plastičnosti, iako su granice žilavosti bentonita i kaolinita vrlo slične. Potrebno je istaknuti da su odstupanja u prirodnim sitnozrnatim tlima u većini gore navedenih parametara vrlo raspršena pri čemu vrijednosti granice žilavosti iznose manje od 50 do 60 %. Budući da minimalna CBR vrijednost na terenu iznosi 2 %, odgovarajuća vrijednost granice žilavosti za projektiranje cesta je 50 do 60 %. Stoga se tla s granicom žilavosti većom od 50 do 60 % u praksi smatraju neprikladnim za pripremu posteljice.

LITERATURA

- [1] British Standards Institution (BS): BS EN ISO 14688-1:2002 Geotechnical Investigation and Testing-Identification and Classification of Soil, Part 1: Identification and Description. B.S.I., London, 2002.
- [2] Reed, J.S.: Principles of Ceramics Processing, Second Edition, Wiley-Interscience, New York, 1995.
- [3] Onoda, G.Y.: Mechanism of Plasticity in Clay-water Systems. Science of Whitewares. The American Ceramic Society, Columbus, 1996.
- [4] Barnes, G.: An apparatus for the determination of the workability and plastic limit of clays. APPLIED CLAY SCIENCE, 80-81 (2013), pp. 281-290, doi: 10.1016/j.clay.2013.04.014.
- [5] British Standards Institution (BS): BS5930:1990 Code of Practice for Site Investigations. B.S.I., London, 1990.
- [6] ASTM D2488-00: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-manual Procedure), 2000.
- [7] Casagrande, A.: Research on the Atterberg limits of soils, PUBLIC ROADS 13 (1932), pp. 121-130.

- [8] Casagrande, A.: Classification and Identification of Soils. Proceedings of The American Society of Civil Engineers, 73 (1947), pp. 783–810.
- [9] Norton, F.H.: An instrument for measuring the workability of clays, Journal of The American Ceramic Society, 21 (1938), pp. 33–36.
- [10] Schwartz, B.: Fundamental study of clay: XII, a note on the effect of the surface tension of water on the plasticity of clay, Journal of The American Ceramic Society, 35 (1952), pp. 41–43.
- [11] Ring, G.W., Sallberg, J.R., Collins, W.H.: Correlation of compaction and classification test data, Highway Research Board Bulletin, 325 (1962), pp. 55–75.
- [12] Pandian, N.S., Nagaraj, T.S., Manoj, M.: Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils. Géotechnique, 47 (1997), pp. 363–366.
- [13] Işık, F., Ozden, G.: Estimating compaction parameters of fine- and coarse-grained soils by means of artificial neural networks, Environmental Earth Sciences, 69 (2013) 8, pp. 2287–2297, doi: 10.1007/s12665-012-2057-5.
- [14] Blotz, R.L., Benson, C.H., Boutwell, G.P.: Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (1998) 9, pp. 907–912.
- [15] Di Matteo, L., Bigotti, F. and Ricco, R.: Best-fit models to estimate modified proctor properties of compacted soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (2009) 7, pp. 992–996, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000022.
- [16] Gurtug, Y., Sridharan, A.: Compaction behaviour and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy, Soils and Foundations, 44 (2004), pp. 27–36.
- [17] Sivrikaya, O.: Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste, Environmental Geology, 53 (2008), pp. 1585–1595, doi: 10.1007/S00254-007-1142-7.
- [18] Vinod, P., Pillai, S.: Toughness Limit: a useful index property for prediction of compaction parameters of fine grained soils at any rational compactive effort, Indian Geotechnical Journal, 47 (2017), pp. 107–114, doi: 10.1007/s40098-016-0194-6.
- [19] Livneh, M., Ishai, I.: Using indicative properties to predict the density-moisture relationship of soils, Transportation Research Record, 690 (1978), pp. 22–28.
- [20] Omar, M., Shanableh, A., Basma, A., Barakat, S.: Compaction characteristics of granular soils in United Arab Emirates, Geotechnical & Geological Engineering, 21 (2003) 3, pp. 283–295, doi: 10.1023/A:1024927719730.
- [21] Horpibulsuk, S., Katkan, W., Apichatvullop, A.: An approach for assessment of compaction curves of fine grained soils at various energies using one point test, Soils and Foundations, 48 (2008) 1, pp. 115–126, doi: 10.3208/sandf.48.115.
- [22] Günaydin, O.: Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks, Environmental Geology, 57 (2009), pp. 203–215, doi: 10.1007/s00254-008-1300-6.
- [23] Di Matteo, L., Spagnoli, G.: Predicting compaction properties of soils at different compaction efforts, Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, (2021), pp. 1–11, doi: 10.1680/jgeen.21.00017.
- [24] Pillai, S., Vinod, P.: Reported correlations on compaction characteristics of fine grained soils in the standard proctor test—a critical reappraisal. Emerging Trends in Engineering, Science and Technology for Society, Energy and Environment: Proceedings of the International Conference in Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST 2018), January 18–20, Thrissur, Kerala, India. CRC Press, pp. 281–286, 2018.
- [25] Barnes, G.E.: The plastic limit and workability of soils. Ph.D. Thesis, The University of Manchester, 2013.
- [26] Karakan, E., Demir, S.: Effect of fines content and plasticity on undrained shear strength of quartz-clay mixtures, Arabian Journal of Geosciences, 11 (2018), Article number: 743, doi: 10.1007/s12517-018-4114-1.
- [27] Karakan, E., Demir, S.: Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures, Arabian Journal of Geosciences, 13 (2020), Article number: 983, doi: 10.1007/s12517-020-05762-4.
- [28] Shimobe, S., Spagnoli, G.: Some generic trends on the basic engineering properties of fine-grained soils, Environmental Earth Sciences, 78 (2019), Article No. 281, doi: https://doi.org/10.1007/s12665-019-8266-4.
- [29] Shimobe, S., Spagnoli, G.: Fall cone tests considering water content, cone penetration index, and plasticity angle of fine-grained soils, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12 (2020) 6, pp. 1347–1355, doi: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.02.005.
- [30] Skempton, A.W.: The Colloidal “Activity” of Clays. In: Selected Papers on Soil Mechanics. Thomas Telford Publishing, pp. 60–64, 1984.
- [31] JSSMFE: Standardization committee for identification and classification system. Experiments on characteristics of silt: Effect of clay content below 2 micrometers on consistency limits of soils, 1969 (in Japanese).
- [32] Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R.: Prediction of swelling potential for compacted clays, Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division, 88 (1962), pp. 53–87.
- [33] Orhan, M., Özer, M., Işık, N.S.: Comparison of Casagrande and cone penetration tests for the determination of the liquid limit of natural soils, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 21 (2006), pp. 711–720.
- [34] Dragoni, W., Prosperini, N., Vinti, G.: Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on plio-pleistocenic clayey soils from Umbria region (Italy), Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue 1 (2008), pp. 185–197.
- [35] Özer, M.: Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer, Bulletin of Engineering Geology and The Environment, 68 (2009), pp. 289–296, doi: 10.1007/s10064-009-0191-4.
- [36] Nini, R.: Effect of the silt and clay fractions on the liquid limit measurements by Atterberg cup and fall cone penetrometer, International Journal of Geotechnical Engineering, 8 (2014), pp. 239–241, doi: https://doi.org/10.1179/1939787913Y.0000000018.
- [37] 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), pp. 79–85, doi: https://doi.org/10.1007/s10064-011-0412-5.
- [38] Di Matteo, L., Dragoni, W., Cencetti, C., Ricco, R., Fucsina, A.: Effects of fall-cone test on classification of soils: some considerations from study of two engineering earthworks in Central Italy, Bulletin of Engineering Geology and The Environment, 75 (2016), pp. 1629–1637, doi: https://doi.org/10.1007/s10064-015-0808-8.
- [39] El Shinawi, A.: A comparison of liquid limit values for fine soils: A case study at the North Cairo-Suez District, Egypt, Journal of The Geological Society of India, 89 (2017), pp. 339–343, doi: https://doi.org/10.1007/s12594-017-0608-9.
- [40] Spagnoli, G., Sridharan, A., Oreste, P., Bellato, D., Di Matteo, L.: Statistical variability of the correlation plasticity index versus liquid limit for smectite and kaolinite, Applied Clay Science, 156 (2018), pp. 152–159, doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.02.001.
- [41] Niazi, F., Llamas, A., Cholewa, C., Amstutz, C.: Liquid limit determination of low to medium plasticity Indiana soils by hard base Casagrande percussion cup vs. BS fall-cone methods, Bulletin of Engineering Geology and The Environment, 79 (2020) 1–2, pp. 2141–2158, doi: https://doi.org/10.1007/s10064-019-01668-y.

- [42] Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R.: The drained residual strength of cohesive soils, *GÉOTECHNIQUE*, 31 (1981), pp. 181–213.
- [43] Wasti, Y., Bezirci, M.: Determination of consistency limits of soils by the fall cone test, *Canadian Geotechnical Journal*, 23 (1986), pp. 241–246, doi: <https://doi.org/10.1139/t86-033>.
- [44] Yükselen, Y., Kaya, A.: Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils, *Engineering Geology*, 102 (2008), pp. 38–45, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.002>.
- [45] Chenari, R., Fatahi, B., Ghoreishi, S., Taleb, S.A.: Physical and numerical modelling of the inherent variability of shear strength in soil mechanics, *Geomechanics and Engineering*, 17 (2019), pp. 31–45, doi: [10.12989/gae.2019.17.1.031](https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.1.031)
- [46] JSSMFE: Soil Laboratory Testing (the Second Revised Edition). The Japanese Society on Soil Mechanics and Foundation Engineering (JSSMFE), Tokyo, 1979 (in Japanese).
- [47] Lambe, T. W., Whitman, R.V.: Soil mechanics. John Wiley and Sons, New York, 1969.
- [48] Spagnoli, G., Shimobe, S.: An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests, *Engineering Geology*, 278 (2020), Article No. 105830, doi: [10.1016/j.enggeo.2020.105830](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105830).
- [49] Sridharan, A., Nagaraj, H.B. Plastic limit and compaction characteristics of fine grained soils, *Proceedings of The Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 9 (2005), pp. 17–22.
- [50] Djoković, K., Rakic, D., Ljubojev, M.: Estimation of soil compaction parameters based on the Atterberg limits, *Mining and Metallurgy Engineering BOR*, 4 (2013), pp. 1–16.
- [51] Pillai, S., Vinod, P.: Re-examination of compaction parameters of fine-grained soils: *Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 169 (2016), pp. 157–166, doi: <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00005>.
- [52] Horpibulsuk, S., Katkan, W., Naramitkornburee, A.: Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse-and fine-grained soils, *Geotechnical Testing Journal*, 32 (2009) 1, pp. 64–75, doi: <https://doi.org/10.1520/GTJ101659>.
- [53] Katte, V., Mfoyet, S., Bertille Ilalie, M., Wouatong, A., Bezeng, L.: Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil, *Geotechnical and Geological Engineering* 37 (2019) 4, pp. 217–234, doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0604-x>.
- [54] Shimobe, S., Karakan, E., Sezer, A.: Improved dataset for establishing novel relationships between compaction characteristics and physical properties of soils, *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 80 (2021) 11, pp. 8633–8663, doi: [10.1007/s10064-021-02456-3](https://doi.org/10.1007/s10064-021-02456-3).
- [55] Ali, H.F.H., Rash, A.J.H., Kareem, M.I.H., Muhedin, D.A.: A correlation between compaction characteristics and soil index properties for fine-grained soils, *Polytechnic Journal*, 9 (2019) 2, pp. 93–99, doi: <https://doi.org/10.25156/ptj.v9n2y2019.pp93-99>.
- [56] Sawangsuriya, A., Edil, T., Bosscher, P.: Modulus-Suction-Moisture Relationship for Compacted Soils in Postcompaction State, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2009) 10, doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000108](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000108).
- [57] Al-Khafaji, A.N.: Estimation of soil compaction parameters by Means of Atterberg Limits, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 26 (1993) 4, pp. 359–368, doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1993.026.004.10>.
- [58] Hussain, A., Atalar, C.: Estimation of compaction characteristics of soils using Atterberg limits. In: 5th International Conference on New Advances in Civil Engineering (ICNAACE 2019), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 800 012024, 6p, 2020.
- [59] Kamarudin, F.: Estimation of soil compaction parameters based on Atterberg limits. Master Thesis. Universiti Teknologi Malaysia, 2005.
- [60] Saikia, A., Baruah, D., Das, K., Rabha, H.J., Dutta, A., Saharia, A.: Predicting compaction characteristics of fine-grained soils in terms of Atterberg limits, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3 (2017) 2, pp. 1–9, doi: [10.1007/s40891-017-0096-4](https://doi.org/10.1007/s40891-017-0096-4).
- [61] Setiawan, B.: The preliminary study on the effect of coarse particles content on OMC and maximum dry unit weight: a case of Aceh's fill materials, *ACEH International Journal of Science and Technology*, 5 (2016) 2, pp. 75–81, doi: [10.13170/aijst.5.2.4877](https://doi.org/10.13170/aijst.5.2.4877).
- [62] Rabiotti, C., Carpez, M., Puzrin, A., Yang, F.L.: Correlation between the values of compaction AASHTO-Standard and AASHTO-Modified, Research Report, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2004.
- [63] Mujtaba, H., Farooq, K.: Experimental investigation on compaction properties of sandy soils, *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14 (2014), pp. 115–125.
- [64] Farooq, K., Khalid, U., Mujtaba, H.: Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils using consistency limits, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016), pp. 1319–1328, doi: [10.1007/s13369-015-1918-0](https://doi.org/10.1007/s13369-015-1918-0).
- [65] Humdani, I.H.: Use of one-point proctor standard compaction method for computing modified AASHTO compaction parameters. In: The 62nd Annual Proceeding of Pakistan Engineering Congress, Paper No. 502, 1987.
- [66] Fleureau, J.-M., Verbrugge, J.-C., Huergo, P., Correia, A., Kheirbek-Saoud, S.: Aspects of the behavior of compacted clayey soils on drying and wetting paths, *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (2002), pp. 1341–1357, doi: [10.1139/t02-100](https://doi.org/10.1139/t02-100).
- [67] Al-Badran, Y., Schanz, T.: Modelling the compaction curve of fine-grained soils, *Soils and Foundations*, 54 (2014) 3, pp. 426–438, doi: [10.1016/j.sandf.2014.04.011](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.011).
- [68] Khalid, U., ur Rehman, Z.: Evaluation of compaction parameters of fine-grained soils using standard and modified efforts, *International Journal of Geo-Engineering*, 9 (2018), Article No. 15, doi: [10.1186/s40703-018-0083-1](https://doi.org/10.1186/s40703-018-0083-1).
- [69] Mishra, A., Ohtsubo, M., Li, L., Higashi, T.: Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method, *Environmental Earth Sciences*, 65 (2012) 1, pp. 21–27, doi: [10.1007/s12665-011-1061-5](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1061-5).
- [70] Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A.: Liquid limit of soil mixtures, *Geotechnical Testing Journal*, 8 (1985) 3, pp. 111–116, doi: [10.1520/GTJ10521J](https://doi.org/10.1520/GTJ10521J).
- [71] Kuno, G., Kutara, K., Miki, H., Okada, Y.: Simplified decision method for soil improvement effect by fall cone test, *Technical Materials in Civil Engineering*, 27 (1985), pp. 33–39 (in Japanese).
- [72] Mendoza, M.J., Orozco, M.: Fast and accurate techniques for determination of water content in soils, *Geotechnical Testing Journal*, 22 (1999), pp. 301–307.
- [73] Sridharan, A., Sivapullaiah, P.V.: Mini compaction test apparatus for fine grained soils, *Geotechnical Testing Journal*, 28 (2005), pp. 240–246, doi: [10.1520/GTJ12542](https://doi.org/10.1520/GTJ12542).
- [74] Fang, H.-Y., Daniels, J.: *Introductory geotechnical engineering: An environmental perspective*, *Introductory Geotechnical Engineering: An Environmental Perspective*. Taylor and Francis, U.K, 2006.
- [75] Zhang, X., Kong, L.-W., Yang, A.W., Sayem, H.: Thixotropic mechanism of clay: A microstructural investigation, *Soils and Foundations*, 57 (2017) 1, pp. 23–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.002>.
- [76] Sebastiani, D., Miliziano, S., Vilardi, G., Bavasso, I., Di Palma, L., Di Giulio, A.: Chemical interaction between fine-grained soil and foaming agents in tunnelling with TBM-EPB, *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation of the future*, B.3. Ground reinforcement and ground improvement, 6p, 2019.

- [77] Dutta, R.K., Gupta, R.: Prediction of unsoaked and soaked California bearing ratio from index properties of soil using artificial neural networks, *International Journal of Civil Engineering and Applications*, 6 (2016) 1, pp. 1-46.
- [78] Wells, J.E.: Calibration of non-nuclear devices for construction quality control of compacted soils. Master thesis, University of Kentucky, U.S.A, 2014.
- [79] Demiralay, İ., Güresinli, Y.Z.: A study on the consistency limits and compactibility of the soils of Erzurum plain, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10 (2010) 1-2, pp. 77-93 (in Turkish).
- [80] Kaya, A., Durukan, S., Oren, A., Yukselen-Aksoy, Y.: Determining the Engineering Properties of Bentonite - Zeolite Mixtures, *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 17 (2006) 3, pp. 3879-3892.
- [81] Sivapullaiah, P.V., Lakshmikantha, H.: Lime-stabilised illite as a liner. *GROUND IMPROVEMENT*, 9 (2005) 1, pp. 39-45.
- [82] Baytar, A.Ö.: Effects of fly ash and desulphogypsum on the geotechnical properties of Çayırhan soil. Master thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.
- [83] Sato, A., Nishimoto, S., Suzuki, T.: Examination of filling materials using stabilized peat. *Proceedings of the 8th Symposium on Environmental Geotechnical Engineering*, JGS, 55-60, 2009 (in Japanese).
- [84] Kolay, P., Burra, S.G., Kumar, S.: Effect of salt and NAPL on electrical resistivity of fine-grained soil-sand mixtures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12 (2018) 1, pp. 13-19, doi: 10.1080/19386362.2016.1239378.
- [85] Pillai, S., Vinod, P.: A framework for prediction of compaction parameters in standard proctor tests, *Recent Advances in Materials, Mechanics and Management*, CRC Press, 2019.
- [86] Yohanna, P.: The use of iron-ore tailing as admixture in cement modification of black cotton soil. M. Sc. thesis, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 2015.
- [87] Jaharou, S.: Stabilization of black cotton soil using iron ore tailing. M.Sc. Thesis, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 2015.
- [88] Schwing, M.: Mechanical, hydraulic, and dielectric characterisation of fine-grained soils during densification. Ph. D thesis, The University of Queensland, Australia, 2016.
- [89] Montañez Colmenares, J.E.: Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures. Ph. D thesis, Imperial College London (University of London), U.K. 2002.
- [90] Sivrikaya, O., Togrol, E., Kayadelen, C.: Estimating compaction behavior of fine-grained soils based on compaction energy, *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (2008) 6, pp. 877-887, doi: <https://doi.org/10.1139/T08-022>.
- [91] Gülen, M., Kiliç, H.: Determination of cohesive soils' plastic limit by using fall cone test. 8th International Geotechnics Symposium, Nov 13 - 15, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, Istanbul, 1-11 (in Turkish), 2019.
- [92] Gülen, M., Kiliç, H.: Yoğrulmuş Killerde Dayanım ve Deformasyon Parametrelerinin Düşen Koni ve Veyn Deneyle İle Belirlenmesi, *Teknik Dergi*, 31 (2020), pp. 9987-10012 (in Turkish).
- [93] Matusiewicz, W., Lechowicz, Z., Wrzesiński, G.: Wyznaczenie granicy płynności metodą Casagrandego i penetrometrem stożkowym, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 25 (2016), pp. 290-300.
- [94] Quintela, A., Costa, C., Terroso, D., Rocha, F.: Liquid limit determination of clayey material by Casagrande method, fall cone test and EBS parameter, *Materials Technology*, 29 (2014), B82-B87, doi: <https://doi.org/10.1179/1753555714Y.0000000153>.
- [95] Nagaraj, H.B., Sridharan, A., Madhu, B.V.: Comparative study of determination of liquid limit by percussion cup, cone and K0-stress methods, 8th International Symposium on Lowland Technology, Bali, pp. 66-74, 2012.
- [96] Chik, Z., Islam, S.M.T., Sanusi, H., Mustafa, M.M.: Expert Idea on Liquid Limit and Plastic Limit Estimation with Soil Resistivity Profile, *TOJSAT 2* (2016), pp. 19-23.
- [97] Nayak, N.V., Christensen, R.W.: Swelling Characteristics of Compacted, Expansive Soils. *CLAYS AND CLAY MINERALS*, 19 (1971), pp. 251-261.
- [98] Kumamoto, N.: The consistency of sand-clay mixed soils. *Bulletin of Hiroshima Institute of Technology*, 49, 35-42 (in Japanese), 2015.
- [99] Myat, A.A., Kyaw, N.M., Win, H.: Prediction models for estimation of California bearing ratio for cohesive soil, *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2 (2018), pp. 2594-2601.
- [100] Selamat, M.R., Rosli, R.N., Ramli, M.H.: Properties of laterite soils from sources near Nibong Tebal, Malaysia, *Computational Research Progress in Applied Science and Engineering*, 5 (2019), pp. 44-51.
- [101] Kollaros, G., Athanasopoulou, A.: Characterization of pavement subgrade soil using gyratory compaction, 3rd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 19-21 May, 2016.
- [102] Lim, S.-M., Wijeyesekera, D., Hj. Bakar, I.: Correlations of soil classification and compaction parameters with soaked and unsoaked CBR of soils, In: Southeast Asia Conference on Soft Soils Engineering and Ground Improvement. *Advancement of Research and Practice for Geotechnical Solutions*, Bandung, Indonesia, 20-23, 2014.
- [103] Mohammad, L., Huang, B., Puppala, A., Allen, A.: Regression Model for Resilient Modulus of Subgrade Soils, *Transportation Research Record*, 1687 (1999), pp. 47-54.
- [104] Othman, M.A., Luettich, S.M.: Compaction control criteria for clay hydraulic barriers, *Transportation Research Record*, 1462 (1994), pp. 28-35.
- [105] Jyothirmayi, K., Kommu, S., Gnananandarao, T.: Prediction of compaction characteristics of soil using plastic limit, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4 (2015), pp. 2321-7308.
- [106] Korde, M., Yadav, R.K.: A study of correlation between CBR value and physical properties of some soils, *International Journal of Emerging Technologies and Advanced Engineering*, 4 (2015), pp. 237-239.
- [107] Rakaraddi, P.G., Gomarsi, V.: Establishing relationship between CBR with different soil properties, *International Journal of Research In Engineering and Technology*, 4 (2015), pp. 182-188.
- [108] Sahu, B.K.: Improvement in California bearing ratio of various soils in Botswana by fly ash. *International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 7p, 2001.
- [109] Soltani, A.: Mechanical behavior of tire rubber-reinforced expansive soils, Ph.D. thesis, University of Adelaide, Australia, 2018.
- [110] Ng, K.S., Chew, Y.M., Osman, M.H., Mohamad Ghazali, S.K.: Estimating maximum dry density and optimum moisture content of compacted soils, *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering*, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi MARA Pulau Pinang, 1-8, 2015.
- [111] George, V., Rao, N., Shivashankar, R.: Investigations on unsoaked blended laterite using PFWD, PBT, DCP and CBR tests, *Journal of Indian Roads Congress*, 70 (2009), pp. 235-257.
- [112] Ferber, V., Auriol, J.-C., Cui, Y.-J., Magnan, J.-P.: On the swelling potential of compacted high plasticity clays, *Engineering Geology*, 104 (2009), pp. 200-210, doi: <https://doi.org/>