

# Analiza odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja

---

**Srok, Marin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

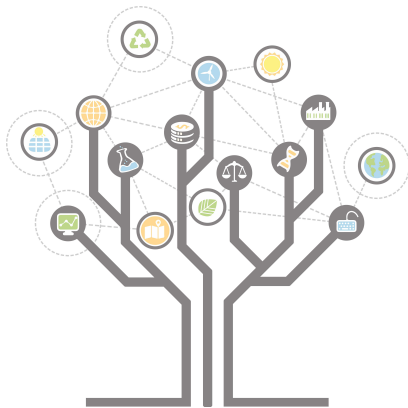
**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:079061>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARIN SROK

ANALIZA ODNOSA INDEKSA PLASTIČNOSTI I KUTA  
UNUTRAŠNJEG TRENJA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 15.07.2022. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 01.07.2022.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

120. prof. dr. sc. Saša Konec

#### Članovi povjerenstva

- 1) Prof. dr. sc. Stjepan Strelac
- 2) 120. prof. dr. sc. Boris Konec
- 3) 120. prof. dr. sc. Krešo Ljundić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARIN SROK

ANALIZA ODNOSA INDEKSA PLASTIČNOSTI I KUTA  
UNUTRAŠNJEG TRENJA

ZAVRŠNI RAD

KANDIDAT:

MARIN SROK



MENTOR:

Prof.dr.sc. STJEPAN STRELEC

VARAŽDIN, 2022.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

### **Analiza odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja**

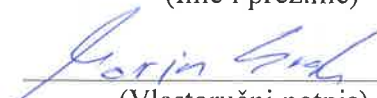
rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Prof. dr.sc Stjepana Streleca**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 29.6.2022

Marin Srok

(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

## IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

### **Analiza odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 29. 6. 2022

Prof. dr. sc. Stjepan Strelec  
(Mentor)

  
(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

Ime i prezime autora: Marin Srok

Naslov rada: Analiza odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja

Posmična čvrstoća je najveće posmično naprezanje koje tlo može podnijeti pri slomu. Jedan od bitnih parametara posmične čvrstoće je kut unutrašnjeg trenja koji se određuje u laboratoriju. Osim laboratorijskih ispitivanja kut unutrašnjeg trenja može se pretpostaviti pomoću postojećih korelacija, kao što je indeks plastičnosti. Tema završnog rada je analiza kuta vršnog unutrašnjeg trenja i odnosa indeksa plastičnosti. Za analizu su korišteni rezultati mjerenja uzoraka na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu. Sva mjerenja vršena su na uređaju za izravni posmik s konstantnom deformacijom. Ispitan je velik broj uzoraka glinovita tla različitog indeksa plastičnosti. Indeks plastičnosti izračunat je kao razlika granice tečenja i granice plastičnosti koje se dobivaju laboratorijskim testovima. Uzorkovanje i ispitivanje materijala provedeno je u periodu od zadnjih 20 godina, a materijal je pretežito sa lokacija kontinentalne Republike Hrvatske. Osim analize uzoraka, objašnjeni su osnovni pojmovi bitni za analizu i napravljen je kratki osvrt na postojeća istraživanja. Provedena ispitivanja i rezultati mjerenja potvrđuju pretpostavljenu slabu negativnu korelaciju parametara kuta unutrašnjeg trenja i indeksa plastičnosti koju su dobili i mnogi drugi istraživači, poput Ortolana i Mihalineca. Slaba korelacija ovakvog tipa nedovoljna je za provođenje daljnjih analiza ili izvođenje kvalitetnih zaključaka o tlu, ali može pomoći kao dodatan alat u preliminarnim analizama i pretpostavkama o tlu.

**KLJUČNE RIJEČI:** indeks plastičnosti, kut unutrašnjeg trenja, posmična čvrstoća, analiza

## ABSTRACT

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: MARIN SROK

TITLE: Analysis of the relationship between the plasticity index and the friction angle

The soil shear strength is the maximum shear stress that a soil can withstand during its breakdown. One of the important parameters of shear strength is a peak friction angle which is determined in a laboratory. In addition to laboratory tests, the angle of internal friction can be assumed by using existing correlations, such as a plasticity index correlation. The topic of the bachelor thesis is the analysis of the relationship between a peak friction angle and a plasticity index. The results of measuring samples at the Faculty of Geotechnical Engineering in Varaždin were used for the analysis. All measurements were performed on a direct shear device with constant deformation. A lot of clay soil samples of different plasticity indexes were examined. The plasticity index was calculated as the difference between the liquid limit and the plasticity limit obtained by laboratory tests. Sampling and testing of materials has been carried out during the last 20 years, and the material has been taken mostly from the locations in the continental Republic of Croatia. In addition to the analysis of the samples, the basic concepts important to the analysis were explained and a brief review of the existing research was made. The performed tests and measurement results confirmed the assumed weak negative correlation between the parameters of a peak friction angle and a plasticity index which were obtained by many other researchers, such as Ortolan and Mihalinec. A weak correlation of this type is insufficient to conduct further analyzes or draw certain conclusions about a soil, but it can help as an additional tool in preliminary analyzes and assumptions about it.

KEYWORDS: plasticity index, friction angle, shear strength, analysis



## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	MINERALOŠKI SASTAV TLA.....	2
3.	KLASIFIKACIJA TLA.....	4
3.1.	Granulometrijska analiza.....	6
3.2.	Sijanje i areometriranje tla.....	8
3.3.	Indeks plastičnosti.....	9
3.1.	Klasifikacijski testovi.....	12
3.1.1.	Granica tečenja.....	12
3.1.2.	Granica plastičnosti.....	14
3.2.	AC i USCS klasifikacija.....	15
4.	NAPREZANJE I ČVRSTOĆA TLA.....	19
4.1.	Kut unutrašnjeg trenja.....	23
4.2.	Određivanje posmične čvrstoće.....	24
4.2.1.	Test izravnog posmika.....	25
5.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	28
5.1.	Pregled istraživanja na području Republike Hrvatske.....	29
6.	ANALIZA I REZULTATI.....	33
6.1.	Uzorci.....	33
6.2.	Analiza svih uzoraka.....	35
6.3.	Analiza ovisno o vrsti tla.....	36
6.4.	Analiza uzoraka sa uskog područja.....	38
7.	ZAKLJUČAK.....	40
8.	LITERATURA.....	41
9.	POPIS SLIKA.....	42
10.	POPIS TABLICA.....	44

## 1. UVOD

Mogućnosti modernih mjerenja i ispitivanja daju sjajan uvid u to kako se tlo ponaša pod različitim uvjetima opterećenja. Za potrebe geotehničkih i građevinarskih zahvata potrebni su podatci o tlu i njegovim svojstvima. Kod deformacije tla jedan od problema je stvaranje klizanja, zbog čega dolazi do nepovoljne pojave - klizanja, odnosno pojave klizišta ili drugih velikih deformacija. Kako bi se preveniralo klizanje tla važno je odrediti svojstava tla vezana uz njegovu pojavu. Najbitnije svojstvo vezano za nastanak klizišta je njegova posmična čvrstoća koja određuje koliko opterećenje tlo može podnijeti. U praksi se posmična čvrstoća može odrediti empirijskim ispitivanjima i formulama. Posmična čvrstoća usko je povezana s kutom unutrašnjeg trenja, koji se može odrediti laboratorijskim ispitivanjima, primjerice triaksijalnim testom ili testom izravnog posmika.

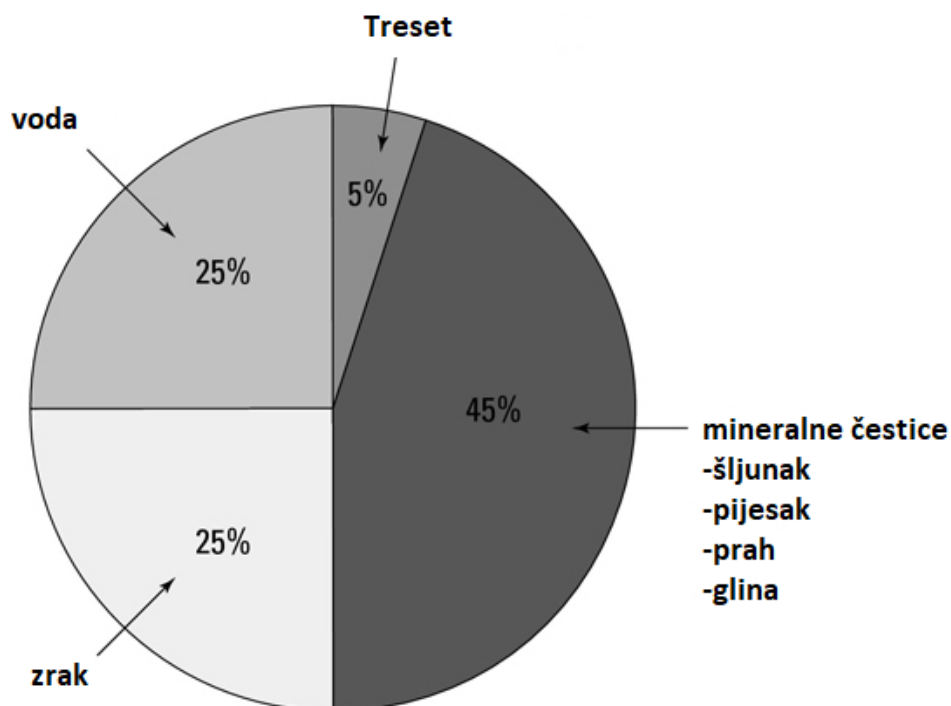
Osim kuta unutrašnjeg trenja tla bitno svojstvo koje utječe na čvrstoću tla je njegov indeks plastičnosti. Indeks plastičnosti je razlika između granice tečenja ( $w_L$ ) i granice plastičnosti ( $w_p$ ) koji određuje raspon vlažnosti tla u kojem je tlo u plastičnom stanju.

Velike deformacije i pojava klizišta naziva se slomom tla, koji je karakteriziran naglim opadanjem posmične čvrstoće, uz pojave velikih deformacija i pukotina duž kliznih ploha u tlu. Klizne plohe su plohe na kojima je prekoračena posmična čvrstoća i po kojima tlo počinje pucati i klizati. U tlu se razlikuju vršna i rezidualna čvrstoća. Vršna posmična čvrstoća tla viša je od rezidualne i to je čvrstoća tla koje je prekonsolidirano. Prekoračenjem vršne posmične čvrstoće ona se smanjuje na razinu rezidualne čvrstoće, nakon čega je tlo oslabljeno uslijed pojave pukotina.

Cilj ovog rada je objasniti osnovne pojmove korištene u izradi korelacije, napraviti kratki osvrt dosadašnjih istraživanja i literature, te prikazati korelaciju između indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja tla. Za analizu su korišteni podatci istraživanja tla sa Geotehničkog fakulteta.

## 2. MINERALOŠKI SASTAV TLA

Tlo je biološki aktivan, porozan medij na Zemljinoj površini. Tlo je trodijelni sustav sačinjen od mineralnih čestica tla, plina u porama i tekućine u porama [slika 1.]. Najčešći plin u porama je zrak, a tekućina u porama je voda koja može imati otopljene minerale. Pore tla predstavljaju prostor između čestica tla. Svojstva tla primarno ovise o njegovom granulometrijskom sastavu odnosno veličini čestica i mineraloškoj građi čestica.[1]



Slika 1 – Aproksimacija sastava tla [2]

Mineraloški sastav tla ovisi o mineraloškom sastavu stijene trošenja i procesima kojima je tlo bilo podložno, primjerice prekrystalizaciji ili ionskoj izmjeni u glinama. Osim čestica stijena u tlu se još nalaze čestice gline, istaložene soli i organska materija nastala ugibanjem živih bića.

U krupnozrnatim tlima, to jest šljunku i pjesku, fizikalno-kemijska svojstva su određena granulometrijskim sastavom, teksturom, oblikom i veličinom čestica tla, dok kod sitnozrnatih tla, odnosno u glinama i prahovima, osim spomenutih obilježja veliki utjecaj imaju Van der Waalsove sile, vrsta slabih električnih privlačnih sila.[3]

Čestice glina su sitne i nevidljive golom oku i njihova je specifična površina vrlo velika. Specifična površina je omjer površine i volumena čestice tla. Porastom specifične površine povećava se utjecaj slabih Van der Waalsove sile. Minerali glina su silikatnog porijekla, a građeni su od tetraedara negativnog naboja (anion) i oktaedara pozitivnog naboja (kation). Ovisno o građi gline, odnosno slaganju tetraedarskih i oktaedarskih jedinica razlikuju se vrste gline čija svojstva ovise najviše o oktaedarskim kationima. Gline imaju veliki kapacitet apsorpcije vode radi velike specifične površine, a neke imaju velik kapacitet izmjene iona ovisno o svojoj građi. Zbog velikog utjecaja Van der Waalsovih sila i velikog kapaciteta apsorpcije vode gline imaju svojstva koja krupnozrnati materijali nemaju, u prvoj ruci plastičnost. [3]

### 3. KLASIFIKACIJA TLA

Porastom interesa za tlo i mehanička svojstva tla bilo je potrebno razviti sustav efektivne klasifikacije - načina podjele tla na osnovi korelacije njegovih karakterističnih fizičkih i mehaničkih svojstava. Klasifikacija služi za lakšu predodžbu, usporedbu i prezentaciju podataka o tlu, isto kao i za daljnju uporabu podataka u analizama. Većina ranih klasifikacija bila je temeljena na veličini čestica tla i granulometrijskoj krivulji. Takve klasifikacije su bile neuspješne jer nisu uzimale u obzir oblik i mineralošku vrstu čestica tla koji su naročito bitan faktor u sitnozrnatim tlima, prahovima i glinama. Male količine praha ili gline mogu imati veliki utjecaj na mehanička svojstva tla, primjerice bubrenjem glina. Drugim riječima, tla istog granulometrijskog sastava mogu imati potpuno drugačija mehanička svojstva. Prema tome, uspoređivanje mehaničkih svojstava na temelju granulometrijske krivulje tla je statistički relevantno samo za tla iste geneze na relativno malim područjima. [4]

Neka od bitnijih svojstava tla poput čvrstoće, poroznosti, propusnosti i kapilarnosti su uvjetovane veličinom čestica tla. Glavna podjela tla je na:

- **Krupnozrnata tla** (nekoherentna), čije čestice su vidljive golim okom, te je na njih zanemariv utjecaj slabih elektrokemijskih sila.
- **Sitnozrnata tla** (koherentna), čije čestice su nevidljive golom oku i, te je na njih znatan utjecaj slabih elektrokemijskih sila.

Sitnozrnata tla još se zovu koherentnima ili kohezivnima jer im se čestice međusobno lijepe pod utjecajem Van der Waalsovih sila. Krupnozrnata tla se još nazivaju i nekoherentnim ili nekohezivnim tlima. Granica između sitnozrnatih i krupnozrnatih tla prema MIT-u je 0,06 mm (tablica 1.). Svojstva sitnozrnatih tla u velikoj mjeri ovise o količini vode vezanoj u njihovoj strukturi.[3]

Krupnozrnata tla se klasificiraju prema granulometrijskom sastavu, a sitnozrnata tla prema stanju plastičnosti. Prema veličini čestica tlo se dijeli na kamenje, šljunak i pijesak koji su krupnozrnati, te prah i glinu koji su sitnozrnati. Nadalje, šljunci, pijesci i prahovi imaju detaljniju podjelu u sitne, srednje i krupne oblike (tablica 1.). Tlo se u prirodi pojavljuje kao mješavina navedenih čestica pa se stoga provodi granulometrijska analiza tla u svrhu određivanja sastava tla. Granulometrijska analiza, međutim, nije dovoljna za

određivanje mehaničkih karakteristika tla, već se koristi samo kao preliminarna analiza. Kao osnovu za klasifikacije krupnozrnatog tla (sa >80% krupnih čestica) koriste se podatci o granulometrijskom sastavu koji mogu biti prikazani tablično ili grafički granulometrijskim dijagramom. Granulometrijskom razradbom empirijski se mogu odrediti neka svojstva krupnozrnatih tla. [3][4]

Pokazalo se da svojstva sitnozrnatih tla u velikoj mjeri ovise o njihovim indeksnim pokazateljima. Najznačajniji indeksni pokazatelj za klasifikaciju tla je indeks plastičnosti koji se određuje dijagramom plastičnosti i Atterbergovim granicama.

Najčešće klasifikacije tla koje se koriste su AC (Airfield Classification) klasifikacija i USCS (Unified Soil Classification System) klasifikacija. U Hrvatskoj i mnogim Europskim državama koristi se ESCS klasifikacija tla. [3][5]

Tablica 1 - Razredba tla prema nominalnom promjeru čestica [3]

OPIS			NOMINALNI PROMJER ČESTICA [mm]	TLO PREMA RAZRADBI	
ČESTICA	KRUPNA	KAMEN	>60	KRUPNOZRNATO TLO	
		ŠLJUNAK	KRUPAN		60-20
			SREDNJI		20-6
			SITAN		6-2
		PIJESAK	KRUPAN		2-0,6
			SREDNJI		0,6-0,2
	SITAN		0,2-0,06		
	SITNA	PRAH	KRUPAN	0,06-0,02	SITNOZRNATO TLO
			SREDNJI	0,02-0,006	
			SITAN	0,006-0,002	
GLINA		<0,002			

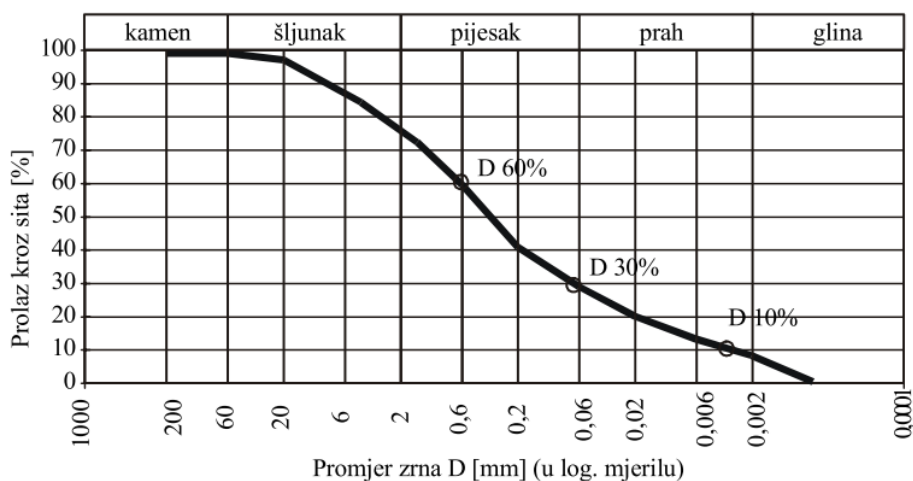
### 3.1. Granulometrijska analiza

Granulometrijski sastav je skup podataka o veličini i udjelu pojedine veličine čestica u ukupnoj masi tla. Granulometrijski sastav se za krupnozrnate frakcije određuje procesom sijanja, a za sitnozrnate frakcije procesom areometriranja. Sijanje je postupak prolaska tla kroz niz sita čiji se otvori postupno smanjuju, a rezultat su mase frakcija na otvorima sita. Areometriranje je postupak određivanja udjela masa sitnih čestica u vodenoj suspenziji na temelju brzine pada čestica u viskoznom fluidu. Brzinu pada čestica opisuje Stokesov zakon. Ukoliko tlo u sebi ima sitnozrnatih i krupnozrnatih čestica one se prvo siju mokrim postupkom, odnosno uz ispiranje sitnih čestica vodom te sušenjem krupnih frakcija, a zatim se sastav sitnih čestica određuje areometriranjem. [6][3]

Rezultati granulometrijske analize prikazuju se granulometrijskim dijagramom (slika 2.) iz kojeg se mogu iščitati karakteristični promjeri čestica  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  i  $D_{60}$  kojima se tlo klasificira.

Pritom je :

- $D_{10}$  – efektivni promjer čestica, 10% mase čestica prolazi kroz određeni promjer sita
- $D_{30}$  – promjer čestica, 30% mase čestica prolazi kroz određeni promjer sita
- $D_{60}$  – promjer dominantne čestice, 60% mase čestica prolazi kroz određeni promjer sita



Slika 2 - Granulometrijski dijagram uzorka tla i karakteristični promjeri čestica [3]

Efektivni promjeri čestica koriste se za izračun koeficijenta jednoličnosti –  $C_u$ , i koeficijenta zakrivljenosti –  $C_c$ , kojima se određuje razina graduiranosti tla. Graduiranost tla može biti dobra ili loša, a uvjeti za njeno određivanje prikazani su u tablici 2. Dobra graduiranost tla znači da su frakcije tla ravnomjerno raspoređene kroz cijeli raspon frakcija određenog uzorka tla, a loši predstavlja tlo koje nema ravnomjernu raspodjelu frakcija tla.

Koeficijent zakrivljenosti izračunava se prema formuli:

$$C_c = \frac{D_{10} * D_{60}}{(D_{30})^2} \quad \text{Jednadžba 1}$$

Koeficijent jednoličnosti izračunava se prema formuli:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Jednadžba 2}$$

Tablica 2 - uvjeti dobre graduiranosti krupnozrnatog tla [3]

<i>GRADUIRANOST</i>	<i>UVJETI</i>
<i>DOBRA (W)</i>	$C_u \geq 4$ za šljunak i $1 \leq C_c \leq 3$ ; $C_u \geq 6$ za pijesak i $1 \leq C_c \leq 3$
<i>LOŠA (P)</i>	Ako koeficijent zakrivljenosti i jednoličnost ne zadovoljava uvijete za dobru graduiranost



### 3.2. Sijanje i areometriranje tla

Sijanje tla i areometriranje su metode određivanja granulometrijskog sastava tla, ovisno o veličini čestica. Sijanje tla se provodi ručnim ili strojnim protresanjem uzorka tla čiji sastav je krupnozrnat. Uzorci se postavljaju povrh niza sita različitih veličina otvora, krenuvši od većih otvora prema manjim. Protresanjem sitne čestice propadaju dublje kroz sita. Postupak je brz a rezultat su mase čestica određenih promjera. Za postupak se koristi standardiziran set sita, a za protresanje su dostupni strojevi za protresanje. Za sitnozrnate čestice (manje od 0,06 mm) veličina čestica se ne može odrediti prosijavanjem, jer bi veličina otvora na mrežici postala nerealno mala, sitne čestice bi se lijepile elektrostatskim silama na veće komade tla ili bi čestice prilikom protresanja mogle poletjeti u zrak u obliku prašine. Količina čestica određene veličine tada se može puno bolje odrediti mjerenjem brzine taloženja u otopini vode areometriranjem. Areometriranje se temelji na Stokesovom zakonu. Stokesov zakon je opisan formulom prema kojem sila na malu kuglu (odnosno česticu tla), koja tone u viskoznoj tekućini, ovisi o viskoznosti tekućine, veličini kugle i brzini tonjenja. Budući da je sila koja djeluje na česticu određena težinom čestice pod vodom, može se izvesti brzina potonuća čestice u tekućini.[7]

Formula Stokesovog zakona je:

$$v = \frac{\gamma_p - \gamma_f}{18\mu} D^2 \quad \text{Jednadžba 3}$$

Gdje je  $v$  brzina tonjenja,  $\gamma_p$  volumetrijska težina čestice,  $\gamma_f$  volumetrijska težina fluida,  $D$  veličina čestice, a  $\mu$  dinamička viskoznost tekućine. Zbog male veličine čestica, tonjenje može potrajati dulje vrijeme.

### 3.3. Indeks plastičnosti

Radi velikog utjecaja sitnih frakcija tla, sitnozrnata tla i tla sa udjelom sitnih čestica većim od 5% klasificiraju se temeljem Atterbergovih granica i indeksa plastičnosti. Atterbergove granice ili granice konzistencije su granice vlažnosti pri kojima tlo mijenja svoje stanje konzistencije. Vlažnost tla je omjer jedinične težine vode u tlu i jedinične težine suhih čestica tla prema formuli:

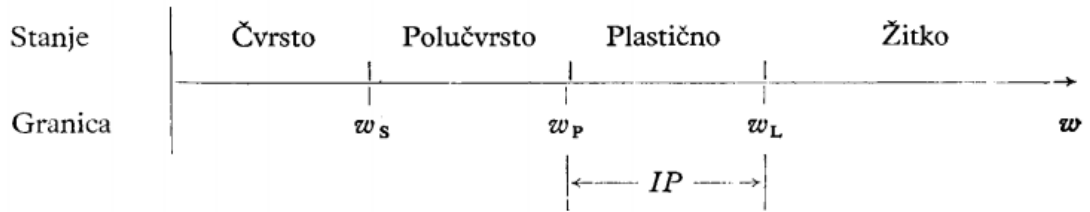
$$w = \frac{W_w}{W_s} 100 \quad \text{Jednadžba 4}$$

Gdje je  $W_w$  jedinična težina vode a  $W_s$  jedinična težina čestica tla. Raspon vlažnosti teoretski može biti u rasponu od 0-∞ %, premda je u prirodi najčešće u granicama od 0 do 100%. Granice konzistencije je odredio švedski inženjer Karl Atterberg 1911. godine za potrebe proizvodnje porculana, radivši ispitivanja na glinama. Danas se granice tečenja određuju standardiziranim empirijskim testovima. Atterbergove granice značajne su jer su povezale vlažnost gline sa njenim mehaničkim ponašanjem. Granice konzistencije su redom od manje prema većoj; granica stezanja, granica plastičnosti i granica tečenja. [3][7][8]

Granice konzistencije (Atterbergove granice) su sljedeće:

- **Granica stezanja** ( $w_s$ ) – sadržaj vlage pri kojemu se postignuti obujam tla ne smanjuje daljnjim sušenjem. Najniža granica konzistencije.
- **Granica plastičnosti** ( $w_p$ ) – granica pri kojoj se oblik tla može mijenjati bez narušavanja kontinuiteta materijala. Ispituje se valjanjem tla u valjčice.
- **Granica tečenja** ( $w_L$ ) – minimalna vlažnost pri kojoj tlo teče pod svojom težinom. Najviša granica konzistencije.

Granicama konzistencije određuje se stanje tla koje može biti čvrsto, polučvrsto, plastično ili žitko (slika 3). Prirodna vlažnost ( $w_0$ ) je vlažnost tla na terenu, a najčešće se kreće u rasponu od 0 do granice tečenja ( $w_L$ )



Slika 3 - odnos Atterbergovih granica i stanja tla [8]

Atterbergove granice se koriste za određivanje indeksnih pokazatelja. Svrha indeksnih pokazatelja je jednostavnije opisivanje stanja konzistencije i kvalitativan opis tla.[3][8]

Indeksi pokazatelji su:

- Indeks plastičnosti ( $I_p$ )

$$I_p = w_L - w_p \quad \text{Jednadžba 5}$$

Indeks plastičnosti je razlika između granice tečenja ( $w_L$ ) i granice plastičnosti ( $w_p$ ) koja određuje raspon vlažnosti tla u postotcima, u kojem je tlo u plastičnom stanju.[3]

- Indeks konzistencije ( $I_c$ )

$$I_c = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_p} = \frac{w_L - w_0}{I_p} \quad \text{Jednadžba 6}$$

Opisuje stanje uzorka tla na terenu u usporedbi sa njegovim indeksom plastičnosti.  $I_c$  jednak nuli označava tlo na granici tečenja, a ako je  $I_c$  jednak 1 tlo je na granici plastičnosti. Ukoliko je  $I_c < 0$  tlo je u žitkom stanju, a ako je  $I_c > 1$  tlo je u polučvrstom ili čvrstom stanju.[3][8]

- Indeks tečenja ( $I_L$ )

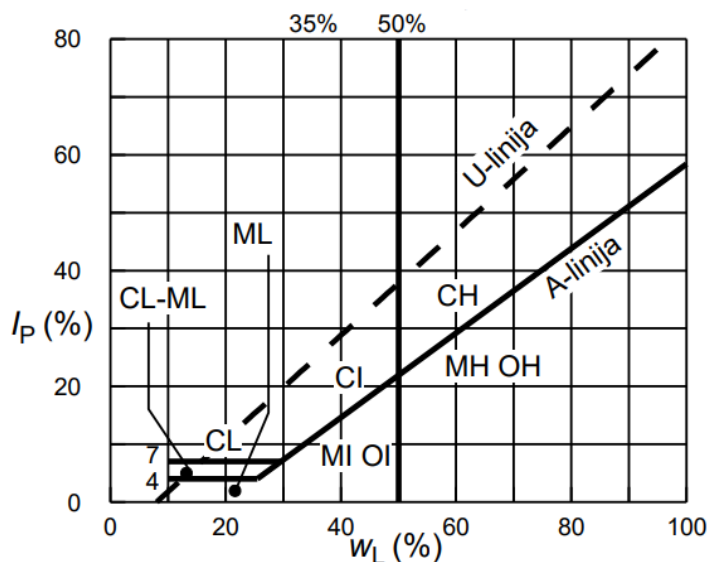
$$I_L = \frac{w_0 - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w_0 - w_p}{I_p} \quad \text{Jednadžba 7}$$

Nula označava materijal na granici plastičnosti, a jedan označava materijal na granici tečenja. Ukoliko je  $I_L < 0$ , tlo je u krutom ili polukrutom stanju.[3]

Za klasifikaciju sitnozrnatih tla potreban je indeks plastičnosti i granica tečenja tla. Prema [3], „Veći indeks plastičnosti ukazuje na veću žilavost i veću suhu čvrstoću materijala. Ovo su osobine materijala s većim kohezijama, što ukazuje na materijale sa većim specifičnim površinama odnosno na veću zastupljenost minerala glina u ukupnoj masi tla.“

Zahvaljujući brojnim mjerenjima i istraživanjima sitnozrnata tla se mogu empirijski klasificirati dijagramom plastičnosti na temelju indeksa plastičnosti i granice tečenja tla. (slika 4.)

Dijagram plastičnosti je empirijski određen prikaz zavisnosti vrste tla o indeksu plastičnosti (plasticity index ( $PI$ )) na vertikalnoj osi i granici tečenja (liquid limit ( $LL$ )) na horizontalnoj osi.



$$\text{A linija: } I_p (\%) = 0,73 (w_L(\%) - 20)$$

$$\text{U linija: } I_p (\%) = 0,90 (w_L(\%) - 8)$$

Slika 4 – Dijagram plastičnosti tla [9]

Oznake na slici 4 su sljedeće:

- *C* – glinovita tla (clay)
- *O* – organska tla (organic)
- *M* – prahovita tla (mud)

Na dijagramu plastičnosti su definirani pravci A linije i U linije.

- Funkcija A linije je :  $I_p = 0,73 * (w_p - 20)$
- Funkcija U linije je :  $I_p = 0,9 * (w_L - 8)$

Sva tla koja se na dijagramu nalaze ispod A linije su prahovita tla ili organska tla, dok se iznad A linije nalaze glinovita tla. U linija označava granicu iznad koje ne postoji niti jedna vrsta tla. Ovisno o klasifikaciji tla, koriste se različite granice tečenja za definiranje plastičnosti tla.

### **3.1. Klasifikacijski testovi**

Klasifikacijski testovi su jednostavni empirijski pokusi na uzorcima tla kojima se određuju granice konzistencije tla. Najbitnije granice konzistencije koje treba odrediti su granica plastičnosti i granica tečenja. Tijekom istraživanja tla otkrivena je povezanost čvrstoće tla i plastičnosti tla pa su stoga razvijene različite tehnike određivanja granica konzistencije tla.

#### **3.1.1. Granica tečenja**

Za određivanje granice tečenja koristi se Casagrandeov uređaj (zastario) ili metoda pomoću konusnog penetrometra (slika 5).

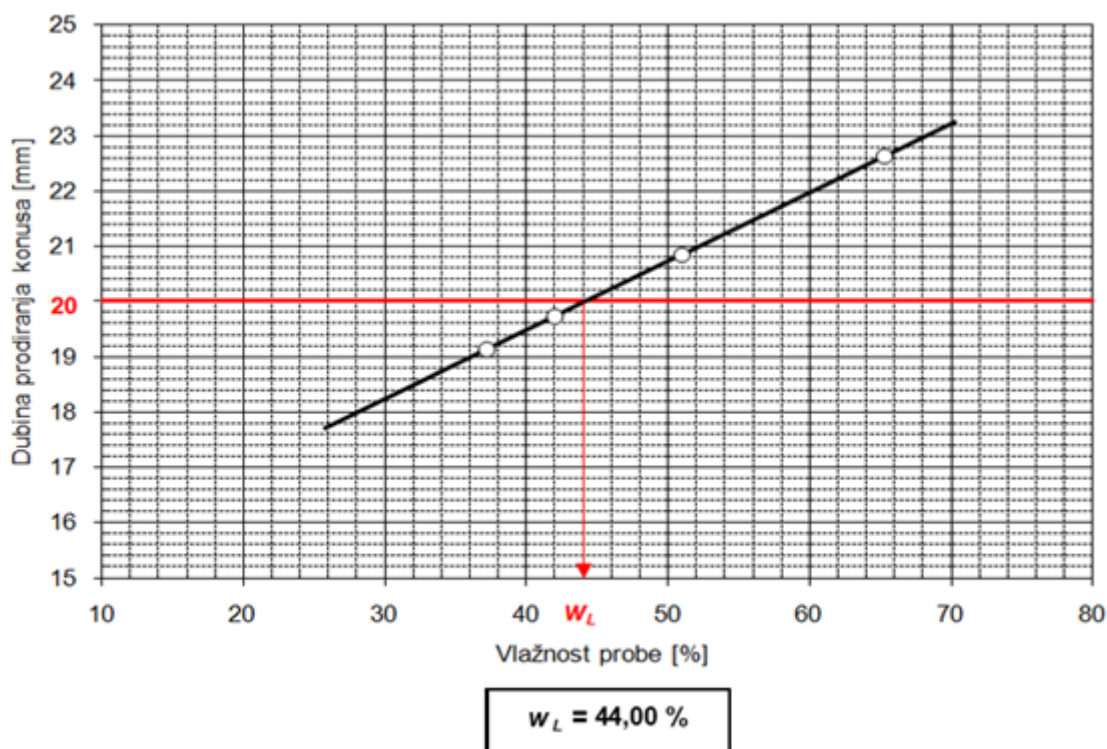


Slika 5 – Konusni penetrometar [10]

Postupak za testiranje tla pomoću konusnog penetrometra je sljedeći:

Ispitivanje se vrši na 150 grama sušenog tla pri 105°C. Osušeno tlo pomiješa se sa destiliranom vodom tako da je tlo u smjesu nalik pasti. Zatim se uzorak postavlja u kružnu kutiju osiguravajući da se ne zarobi zrak. Penetrometar se postavi na način da samo vrh penetrometra dodiruje uzorak. Vertikalna stezaljka se tada otpušta i omogućuje da konus prodre u tlo pod vlastitom težinom na 5 sekundi. Nakon 5 sekundi stezaljka se pritegne i penetracija konusa se bilježi na najbliži milimetar. Ispitivanje se ponavlja minimalno 4 puta, a dobivene vrijednosti penetracije trebaju biti u rasponu od 14 do 28 mm. Sadržaj vlage se određuje za svaki inkrement ispitivanja. Rezultati ispitivanja se prikazuju na dijagram vlažnost – penetracija (slika 6) pri čemu je vlažnost na horizontalnoj osi, a penetracija konusa na vertikalnoj osi. Postavlja se linearna funkcija regresije i određuje se vlažnost tečenja pri penetraciji konusa od 20 milimetara koja se smatra granicom vlažnosti. [11]

### DIJAGRAM GRANICE TEČENJA



Slika 6 - dijagram dobiven penetracijskim testom tla.[10]

#### 3.1.2. Granica plastičnosti

Za granicu plastičnosti nije potrebno koristiti uređaje već se unaprijed pregnječeni uzorci tla valjaju rukama u valjčice promjera tri milimetra sve dok nisu na granici pucanja (slika 7). Konstantnim valjanjem smanjuje se količina vode u tlu i posljedično vlažnost tla. Ukoliko na valjčićima dolazi do nastanka pukotina tlo je ispod granice plastičnosti.



Slika 7 – Valjčići tla na granici plastičnosti [12]

### 3.2. AC i USCS klasifikacija

AC (*Airfield Classification*) klasifikacija pogodna je za potrebe mehanike tla u građevinarstvu. Razvio ju je Arthur Casagrande za potrebe američke vojske u Drugom Svjetskom ratu. Iz AC klasifikacije je 1952. godine razvijena USCS klasifikacija ili *unified soil classification system*. Danas se AC klasifikacija više ne koristi. Na području Europe koristi se ESCS klasifikacija, [3][8]

AC i USCS klasifikacije koriste dvije razradbene oznake, pritom je primarna oznaka ista za obje klasifikacije, a razlika je samo u sekundarnim oznakama. Pošto je AC klasifikacija zastarjela neće se opisivati njene oznake. Bitno je napomenuti da USCS klasifikacija može imati dvojne oznake ovisno o svojstvima tla [tablica 3.]. Prva oznaka dijeli tla u grupe ovisno o veličini čestica na šljunak, pijesak, glinu, prah, organsku materiju ili kombinacije spomenutih čestica. Druga oznaka dodatno opisuje karakteristike tla o kojem je riječ.

Ukoliko se radi o krupnozrnatim tlima, šljunku i pijesku, sekundarna oznaka opisuje njihovu graduiranost na temelju granulometrijske analize kao što je opisano u tablici 2. Pritom sekundarna podjela za USCS klasifikaciju može biti dobra ili loša. Ukoliko



krupnozrnato tlo sadrži značajne primjese sitnih čestica gline (C) ili praha (M) tlo dobiva sekundarnu oznaku sitnih čestica sa najvećim udjelom – C ili M [slika 8].

Ako se radi o sitnozrnatim tlima, prahu i glini, njihove podjele se temelje na plastičnosti tla.

USCS klasifikacija ima dva raspona plastičnosti tla:

- *L – low plasticity* – niska plastičnost ako je granica tečenja ( $w_L$ ) manja od 50 %
- *H – high plasticity* – visoka plastičnost ako je granica tečenja ( $w_L$ ) veća od 50 %

Tablica 3 - kriteriji USCS klasifikacije tla [5]

Kriteriji za dodjeljivanje simbola i naziva pojedinim grupama tla na osnovi laboratorijskih ispitivanja				Klasifikacija tla	
				simbol	Naziv grupe
KRUPNOZRNATA TLA (više od 50% ostaje na situ br. 200 – 0, 075 mm)	Šljunak (više od 50% ostalo je na situ br. 4 – 4,75 mm)	Čisti šljunak (manje od 5 % sitnih čestica)	$c_u \geq 4$ i $1 \leq c_c \leq 3$	GW	Dobro graduiran šljunak
			$c_u < 4$ i/ili $1 > c_c > 3$	GP	Slabo graduiran šljunak
		Šljunak sa sitnim česticama (više od 12 % sitnih čestica)	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH	GM	Prašinasti šljunak
			Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	GC	Glinoviti šljunak
	Pijesak (50 % ili više prolazi kroz sito br. 4 -4,75 mm)	Čisti pijesak (manje od 5 % sitnih čestica)	$c_u \geq 6$ i $1 \leq c_c \leq 3$	SW	Dobro graduiran pijesak
			$c_u < 6$ i/ili $1 > c_c > 3$	SP	Slabo graduiran pijesak
		Pijesak sa sitnim česticama (više od 12 % sitnih čestica)	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH	SM	Prašinasti pijesak
			Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	SC	Glinoviti pijesak
SITNOZRNATA TLA (50% ili više prolazi kroz sito br. 200 – 0,075 mm)	Prahovi i gline (granica tečenja manja od 50 %)	Anorganski	$I_p > 7$ i na ili iznad A-linije	CL	Posna glina
		Organski	$I_p < 4$ ili ispod A-linije	ML	Prah
		Anorganski	(Granica tečenja - sušenje u peći) / (Granica tečenja - bez sušenja u peći) < 0,75	OL	Organska glina
					Organski prah
	Prahovi i gline (granica tečenja veća od 50 %)	Anorganski	$I_p$ na ili iznad A-linije	CH	Masna glina
			$I_p$ ispod A-linije	MH	Elastični prah
		Organski	(Granica tečenja - sušenje u peći) / (Granica tečenja - bez sušenja u peći) < 0,75	OH	Organska glina
					Organski prah
Visoko organsko tlo		Primarno organska materija, tamne boje i organskog mirisa	PT	Treset	

<sup>A</sup>Zasnovano na materijalima koji su prošli sito 3-in, 75 mm.

<sup>B</sup>Ako uzorci tla na terenu sadržavaju komade ili blokove ili oboje nazivu grupe tla treba dodati "s komadima" ili "s blokovima" ili "s komadima i blokovima".

<sup>C</sup> $c_u = D_{60}/D_{10}$ ;  $c_c = (D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$

<sup>D</sup>Ako tlo sadrži  $\geq 15\%$  pijeska, nazivu grupe tla treba dodati «s pijeskom».

<sup>E</sup>Šljunci sa 5 do 12 % sitnih čestica dobivaju dvojne simbole:

- GW-GM dobro graduirani šljunak s prahom,
- GW-GC dobro graduirani šljunak s glinom,
- GP-GM slabo graduirani šljunak s prahom,
- GP-GC slabo graduirani šljunak s glinom.

<sup>F</sup>Ako se sitne čestice klasificira kao CL-ML, treba koristiti dvojne simbole GC-GM ili SC-SM.

<sup>G</sup>Ako su sitne čestice organske, nazivu grupe tla treba dodati "s organskim sitnim česticama".

<sup>H</sup>Ako tlo sadrži  $\geq 15\%$  šljunka, nazivu grupe tla treba dodati "sa šljunkom".

<sup>I</sup>Pijesci sa 5 do 12 % sitnih čestica dobivaju dvojne simbole:

- SW-SM dobro graduirani pijesak s prahom,
- SW-SC dobro graduirani pijesak s glinom,
- SP-SM slabo graduirani pijesak s prahom,
- SP-SC slabo graduirani pijesak s glinom.

<sup>J</sup>Ako se par vrijednosti ( $w_L$ ,  $I_p$ ) u dijagramu plastičnosti nalazi unutar šrafiranog područja ( $4 < I_p < 7$ ), tlo se označava sa CL-ML, kao prašnasta glina.

<sup>K</sup>Ako tlo sadrži 15 do 30 % materijala iznad sita br. 200 – 0,075 mm, nazivu grupe tla treba dodati "s pijeskom" ili "sa šljunkom", ovisno o tome koji je od ta dva materijala zastupljeniji.

<sup>L</sup>Ako tlo sadrži  $\geq 30\%$  materijala iznad sita br. 200 – 0,075 mm i prevladava li pijesak, nazivu grupe tla treba dodati "pjeskoviti".

<sup>M</sup>Ako tlo sadrži  $\geq 30\%$  materijala iznad sita br. 200 – 0,075 mm i prevladava li šljunak, nazivu grupe tla treba dodati "šljunkoviti".

<sup>N</sup> $I_p \geq 4$  i na A-liniji ili iznad nje.

<sup>O</sup> $I_p < 4$  ili ispod A-linije.

<sup>P</sup> $I_p$  na A-liniji ili iznad nje.

<sup>Q</sup> $I_p$  ispod A-linije.

Slika 8 - Uvjeti za dvostruke USCS oznake [5]

#### 4. Naprezanje i čvrstoća tla

Naprezanje u tlu je sila koja djeluje na neku plohu tla. Naprezanja u tlu su u građevinarstvu bitna jer određuju kolike promjene stanja naprezanja se mogu vršiti bez narušavanja stabilnosti tla. To podrazumijeva zahvate u tlu i na tlu, poput izgradnje objekata, cesta, zasjeka u tlu, tunela i slično. Ukoliko dođe do poremećaja stabilnosti tla može doći do velike deformacije, primjerice pojave klizišta, potonuća i naginjanja građevina i slično.

Čvrstoća tla je usko vezana uz naprezanja u tlu. Čvrstoća tla je maksimalno posmično naprezanje koje tlo može podnijeti bez sloma. Slom tla je nerazmjerni porast deformacija u tlu u odnosu na naprezanje. Čvrstoća tla za posmično naprezanje je mnogo manja od čvrstoće za normalno naprezanje.

Naprezanje uzrokovano vlastitom težinom tla zove se primarno naprezanje, a stanje takvog naprezanja se zove primarno stanje naprezanja. Uvođenjem antropogenih promjena stanje naprezanja postaje sekundarno pod utjecajem dodatnih naprezanja. [3]

U tlu su prisutne sile koje djeluju među česticama koje održavaju te čestice u stanju ravnoteže. Te sile su rezultat interakcije među česticama tla kao posljedica djelovanja gravitacije ili Van der Waalsovih sila među česticama tla. Sile u tlu uzorkovane gravitacijom su sile trenja i otpora čestice o česticu. Osim dodira čestica o česticu, u tlu se sila može prenositi tekućinom, pri čemu je bitan porni tlak te tekućine, a tada se govori o efektivnom naprezanju u tlu. Efektivno naprezanje u tlu se računa prema formuli:

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{Jednadžba 8}$$

gdje je  $\sigma'$  efektivno naprezanje,  $\sigma$  normalno naprezanje tla, a  $u$  porni tlak tekućine. Efektivno naprezanje je mjera za koncentrirane sile koje djeluju u kontaktnim točkama granuliranog materijala. Povećanjem pornog tlaka smanjuje se efektivno naprezanje i gubi se sila među česticama pa tlo može postati oslabljeno. Ukoliko je porni tlak ( $u$ ) jednak ili veći od normalnih naprezanja u tlu ( $\sigma$ ) dolazi do likvefakcije tla, potpunog gubitka čvrstoće među česticama i posljedično sloma tla. Takve promjene mogu biti potaknute velikim vanjskim gibanjima, poput potresa.[7]

Van der Waalsove sile djeluju na sve čestice tla, međutim imaju puno veći utjecaj na sitnozrnate čestice, gline i prahove, radi njihove mnogo veće specifične površine. Specifična površina je omjer površine i volumena čestica i raste smanjenjem čestica. Van der Waalsove sile uzrokuju koheziju u glinama i prahovima.

Naprezanja u tlu su sile koje djeluju na određenu plohu tla, a izračunavaju se prema formuli:

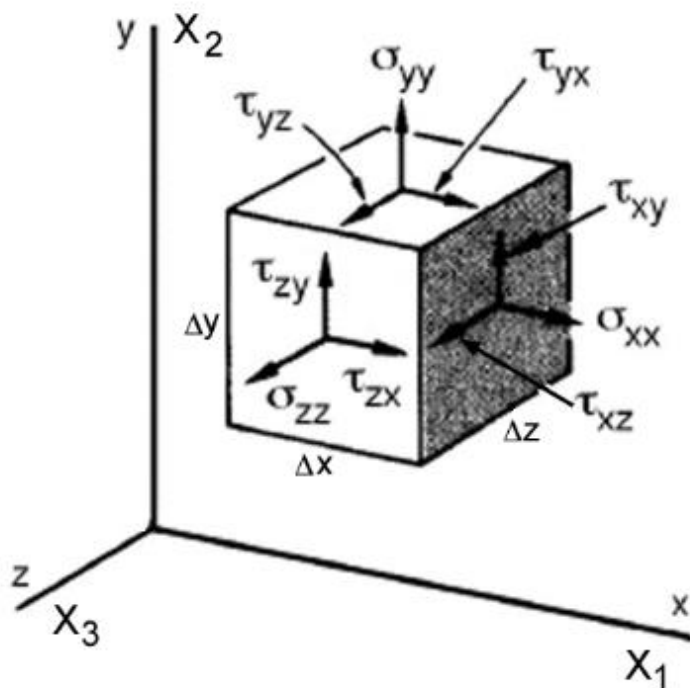
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Jednadžba 9}$$

gdje je  $F$  sila koja djeluje na plohu površine  $A$ . U homogenom tlu naprezanja djeluju u svim smjerovima među česticama tla, pa se definiraju glavne plohe djelovanja naprezanja. Glavne plohe su plohe najvećeg normalnog ( $\sigma$ ) naprezanja, na kojima mogu djelovati i posmična ( $\tau$ ) naprezanja.

Kao što je vidljivo na slici 9., postoje tri komponente normalnog naprezanja za neki volumen tla. Komponente normalnog naprezanja međusobno su okomite i prema koordinatnom sustavu djeluju u smjerovima normala na plohe, odnosno u smjerovima osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Za svaku plohu postoje dva posmična naprezanja pa ih je ukupno šest za 3D slučaj. Prema teoremu o uzajamnosti posmičnih naprezanja koji glasi

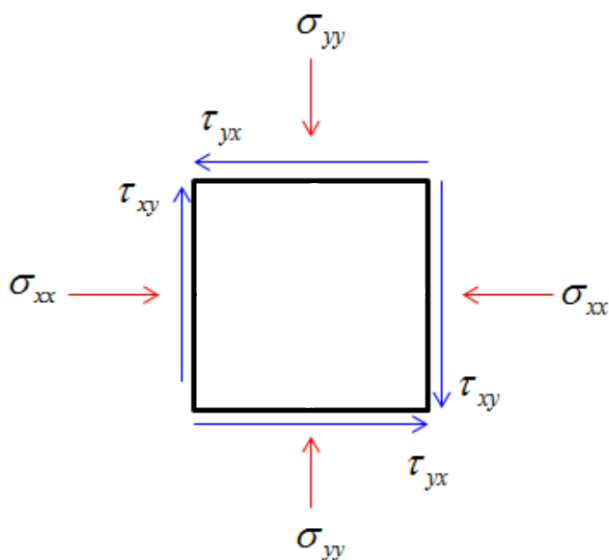
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \text{Jednadžba 10}$$

polu posmičnih naprezanja su ista samo sa različitim predznacima pa se dobiva broj od tri posmična naprezanja.



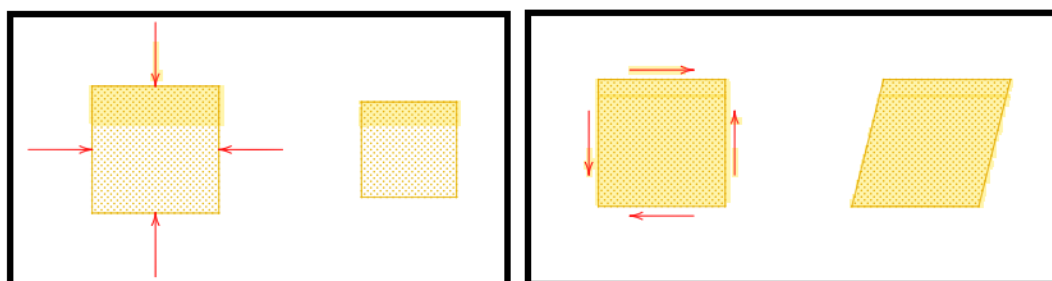
Slika 9 - Prikaz normalnih ( $\sigma$ ) i posmičnih ( $\tau$ ) naprezanja na trodimenzionalno tijelo [13]

Za određivanje jačine posmičnog naprezanja u tlu dovoljan je ravninski (2D) slučaj naprezanja kao što je prikazan na slici 10. Pritom se broj naprezanja smanjuje na dva glavna normalna naprezanja,  $\sigma_{yy}$  i  $\sigma_{xx}$  i jedno posmično naprezanje  $\tau_{xy}/\tau_{yx}$



Slika 10 - Ravninsko stanje naprezanja u tlu određeno je dvama normalnim i jednim posmičnim naprezanjem [14]

Normalno naprezanje može biti vlačno ili tlačno, ovisno radi li se o kompresiji ili razvlačenju materijala. Tlačno naprezanje je kompresija materijala (slika 11, lijevo), a vlačno naprezanje je razvlačenje materijala. Tlo je specifično jer, osim sitnozrnatih tla (gline i prahovi), ne može podnositi vlačno naprezanje. Vlačna naprezanja tla koje glina može podnijeti definirana su kohezijom ( $c$ ). Prije daljeg uvida u normalna i posmična naprezanja bitno je ustanoviti da značajne deformacije tla nisu uzrokovane deformacijom individualnih čestica tla, već njihovim preslagivanjem. Totalno normalno naprezanje djeluje na tlo u obliku kompresije, što znači da se oblik tla ne mijenja, već samo volumen tla (slika 11, lijevo). Pritom se kompresija odvija na račun smanjivanja poroznosti tla. U usporedbi sa posmičnom deformacijom kompresija tla je relativno malena. [7]

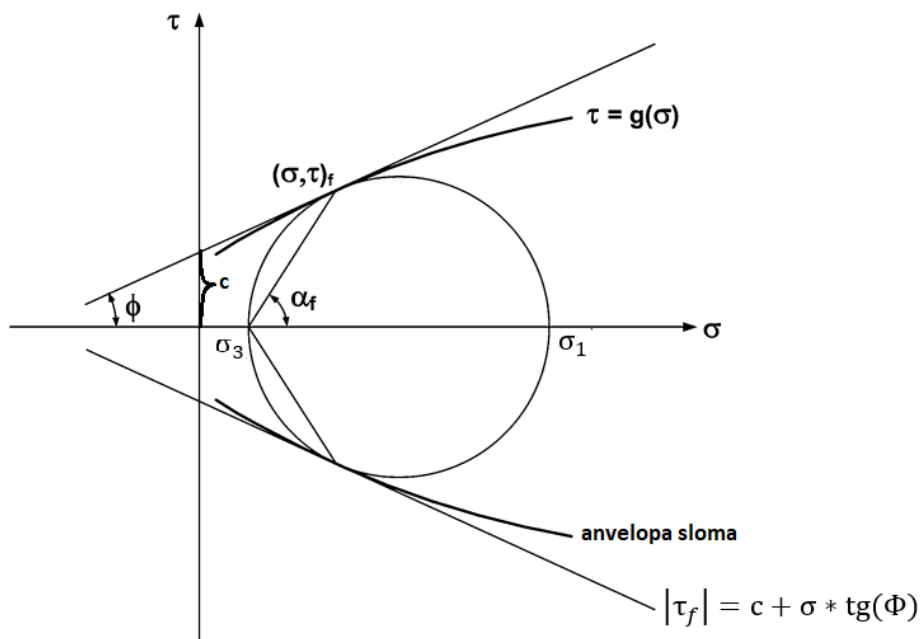


Slika 11 - kompresija (lijevo) uzrokovana normalnim naprezanjem je promjena volumena bez promjene oblika, a distorzija (desno) uzrokovana posmičnim naprezanjem je promjena oblika bez promjene volumena [7]

Totalno posmično naprezanje u tlu uzrokuje distorziju, deformaciju tla bez promjene volumena (slika 11, desno). Deformacije uslijed distorzije su mnogo veće od deformacija u kompresiji jer čestice klize jedna preko druge i mijenjaju raspored mnogo lakše. Iz gore navedenih razloga slijedi da je čvrstoća tla na posmično naprezanje mnogo manja nego čvrstoća na normalno naprezanje. Posmična čvrstoća u tlu dijeli se na rezidualnu i vršnu pri čemu je vršna posmična čvrstoća veća i nastaje kao posljedica početne zbijenosti tla. Nakon prelaska vršne posmične čvrstoće ona s vremenom opada natrag na rezidualnu čvrstoću. U praksi do sloma tla dolazi uslijed prekoračenja granične posmične čvrstoće tla što označava slom tla odnosno nerazmjerni porast deformacija u tlu u odnosu na naprezanje. [7]

#### 4.1. Kut unutrašnjeg trenja

Mohr-Coulombova kružnica (slika 12), u daljnjem tekstu Mohrova kružnica, sloma je skup linearnih jednadžbi koje opisuju uvjete za koje će u izotropnom materijalu doći do sloma. Mohrova kružnica se može napisati kao funkcija (jednadžba 11) dvaju glavnih naprezanja,  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ . Pomoću Mohrove kružnice može se odrediti aproksimacija anvelope sloma (jednadžba 12), jednadžba pravca koji određuje pri kojem normalnom unutrašnjem napreznju dolazi do sloma tla uslijed prelaska graničnog posmičnog napreznja.[15]



Slika 12 - Mohrova kružnica i anvelope sloma tla. [7]

Funkcija Mohrove kružnice određena najvećim ( $\sigma_3$ ) i najmanjim ( $\sigma_1$ ) normalnim napreznjem je:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) * \sin(\Phi) + 2c * \cos(\Phi) \quad \text{Jednadžba 11}$$

gdje je  $\Phi$  kut unutrašnjeg trenja tla i  $c$  kohezija tla. Kohezija tla je posmična čvrstoća ili sila koja vezuje čestice u strukturi tla. Ova sila postoji bez ikakvog tlačnog napreznja i prisutna je u sitnozrnatim tlima, glinama i prahovima, uslijed djelovanja slabih Van der Waalsovih sila. Kut unutrašnjeg trenja je mjera sposobnosti stijene ili tla da izdrži posmično napreznje. To je kut ( $\Phi$ ), mjeren između normalne sile ( $\sigma$ ) i rezultante sile koja djeluje na tlo, koji se postiže uslijed sloma uzrokovanog posmičnim napreznjem



( $\tau$ ). Kut unutrašnjeg trenja je kut što ga tangenta na Mohrovu kružnicu zatvara sa osi x, odnosno osi normalnog naprezanja. Njegova vrijednost se određuje eksperimentalno.

Anvelopa sloma nije linearna funkcija, međutim može se aproksimirati formulom:

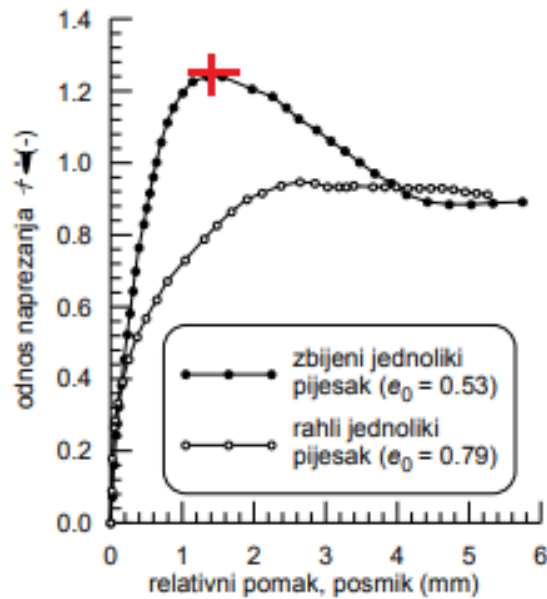
$$\tau_f = c + \sigma * tg(\Phi) \qquad \text{Jednadžba 12}$$

gdje je  $\tau_f$  posmično naprezanje u trenutku sloma tla,  $\sigma$  normalno naprezanje,  $c$  kohezija tla i  $\Phi$  kut unutrašnjeg trenja tla. Iz slike 12 je vidljivo kako se posmična čvrstoća tla povećava sa povećanjem normalnog naprezanja, što u praksi znači da se tlo može ojačati dodatnim nabijanjem i konsolidacijom čime se povećava vršna posmična čvrstoća.[7][15]

## 4.2. Određivanje posmične čvrstoće

Posmična čvrstoća se može odrediti u laboratoriju ispitivanjem u triaksijalnom uređaju ili uređaju za izravni posmik. Bitna razlika među uređajima je što uređaj za triaksijalno ispitivanje mjeri i porni tlak, pa se njime dodatno mogu određivati i efektivna naprezanja ( $c'$ ). To znači da je uređaj za triaksijalno ispitivanje dobar za određivanje nedrenirane i drenirane čvrstoće tla. Pri ispitivanju drenirane čvrstoće dopušteno je istjecanje i utjecanje tekućine iz tla, a pri ispitivanju nedrenirane čvrstoće voda ne može istjecati pa je volumen tla konstantan, jer je pretpostavka da je tekućina nestlačiva. Prednost uređaja za izravni posmik je njegova jednostavnost, međutim njime se mogu mjeriti jedino ukupna naprezanja, pa se njime obično provodi pokus drenirane čvrstoće, gdje je ne postoji porni tlak. Uređaj za izravni posmik daje niže i manje konzistentne vrijednosti čvrstoće od uređaja za triaksijalno ispitivanje, ali često je dovoljno dobar za potrebe inženjerstva.

Rezultat mjerenja posmične čvrstoće tla je dijagram naprezanje-deformacija. Oblik dijagrama (slika 13) ovisi o početnim uvjetima konsolidacije tla. Početni uvjeti obuhvaćaju prijašnju konsolidaciju tla, pukotine u tlu i slično. Pretpostavke za provođenje ispitivanja su da je tlo homogeno i anizotropno.[7]

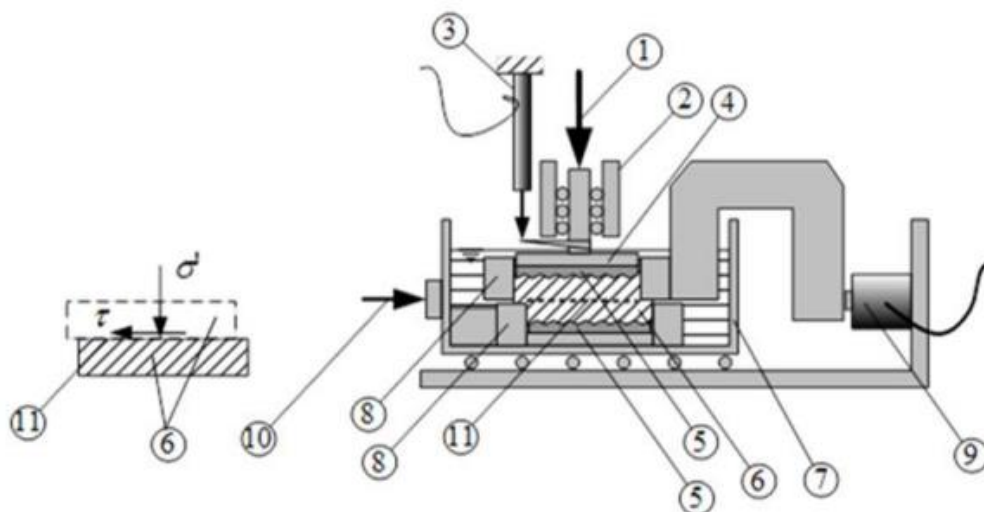


Slika 13 - Vršna i rezidualna čvrstoća tla na primjeru normalno konsolidiranog i prekonsolidiranog pijeska. Vršna čvrstoća označena je crvenom bojom, a rezidualna čvrstoća za obje vrste pijeska nalazi se s desne strane dijagrama, pri većem pomaku uzorka. [16]

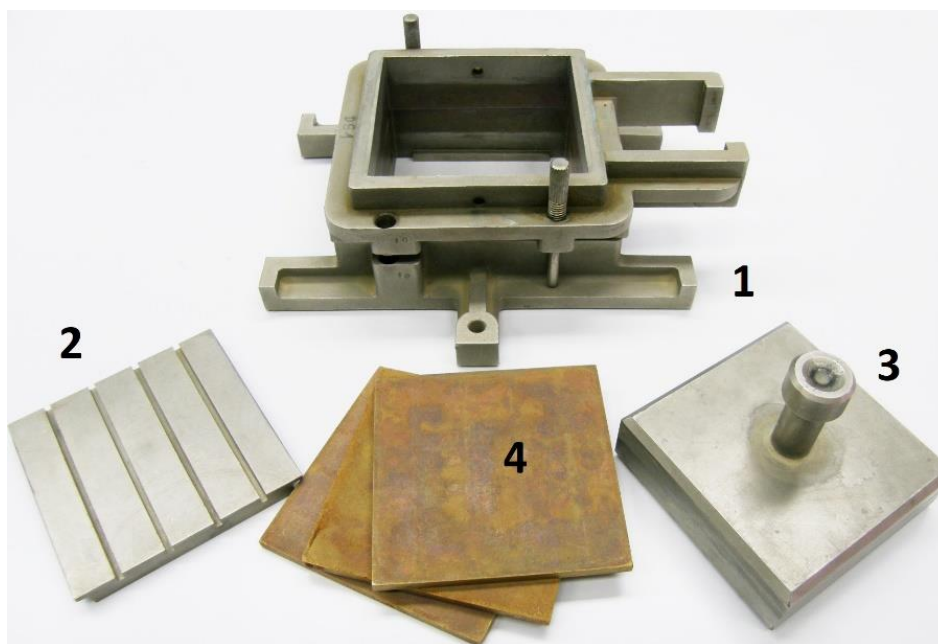
#### 4.2.1. Test izravnog posmika

Uređaj za test izravnog posmika (slika 14, slika 15) je najjednostavnija aparatura za ispitivanje posmične čvrstoće. Tip ispitivanja je konsolidirano drenirano (CU) ispitivanje. U kutiju kvadratnog ili kružnog presjeka stavlja se najčešće neporemećeni uzorak tla koji se ispituje. Postoje dvije varijacije ispitivanja; ispitivanje sa konstantnim prirastom sile (koji se više ne koristi) i ispitivanje sa konstantnom deformacijom tla. U ovom radu biti će opisano samo ispitivanje sa konstantnom deformacijom.

Ispitivanje započinje konsolidacijom uzorka normalnom silom ( $N$ ) koja ga komprimira i učvršćuje. Konsolidacija traje 24 sata i služi stvaranju geostatičkih uvjeta tla u prirodnom stanju. Porastom normalne sile  $N$  raste i posmična čvrstoća tla što je bitno za kasnije određivanje anvelope sloma. Kutija je podijeljena u dva dijela tako da se jedan dio može slobodno kretati po horizontalnoj osi. Elektromotor polako pomiče pokretni dio kutije konstantnom brzinom pa je i deformacija tla konstantna. Porni tlak vode u tlu mora biti 0 tako da se totalna naprezanja mogu usporediti efektivnim napreznjima. [3][7]

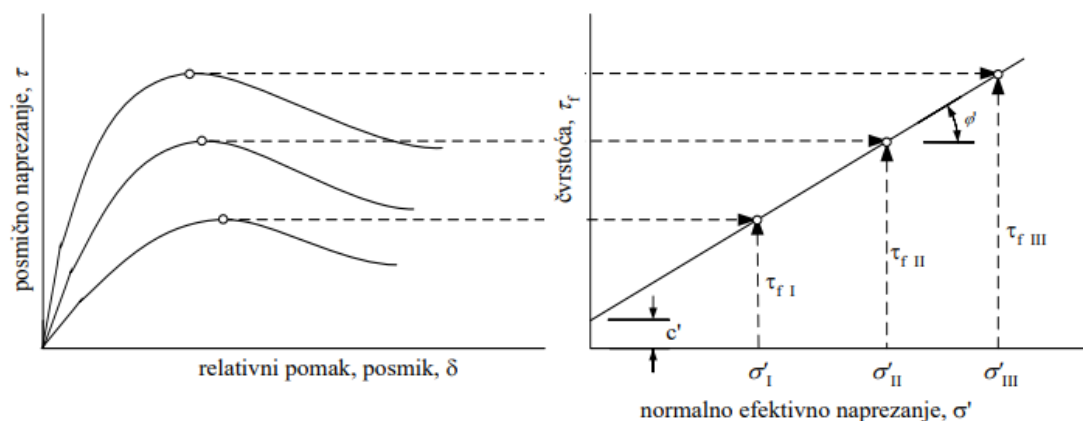


Slika 14 - Skica uređaja za test izravnog posmika (1-uređaj za nametanje vertikalne sile  $\sigma$ , 2-vodilice uređaja za vertikalno opterećenje koje sprječavaju nagnjanje gornje ploče, 3- mjerac vertikalnog pomaka gornje ploče, 4-gornja ploča, 5-nazubljeni šupljikavi kamen, 6-uzorak tla, 7-pomična posuda na ležajevima, 8-gornji (nepomični) i donji (pomični) okvir za uzorak potopljen u vodi, 9-mjerilo horizontalne sile H, 10-uređaj za nametanje jednoliko rastućeg horizontalnog pomaka, 11-ploha na kojoj se pretpostavlja da će doći do posmičnog sloma uzorka tla) [16]



Slika 15 – ćelija uređaja za test izravnog posmika (1-okviri kutije za smicanje, 2-donja ploča kutije sa zasjecima za dreniranje tekućine, 3-gornja ploča kutije, 4- nazubljeni šupljikavi kamen)[10]

Posmična sila  $T$  postupno se povećava dok ne dođe do maksimuma, nakon čega ona ostaje konstantna, pokazuje mali dodatni porast, ili se djelomično smanjuje (slika 13). Oblik dijagrama naprezanja i deformacije ovisi o početnim uvjetima konsolidacije tla. Na dijagramu se mogu razlikovati vršna i rezidualna čvrstoća kao što je opisano u poglavlju 4.2. Maksimalna sila obilježava slom tla po ravnini između dvaju dijelova kutije. Za određivanje anvelope sloma tla obično se koriste tri ispitivanja pri tri različita početna vertikalna opterećenja koja su u rasponu opterećenja tla u prirodnom stanju (slika 16). Ispitivanje se provodi na što sličnijim uzorcima. [7][16]



Slika 16 - Određivanje anvelope sloma uređajem na 3 slična uzorka pri različitim početnim normalnim napreznjima [16]

Horizontalna posmična sila određena je formulom

$$\tau_f = c + \sigma'_n * tg(\Phi)$$

Jednadžba 13

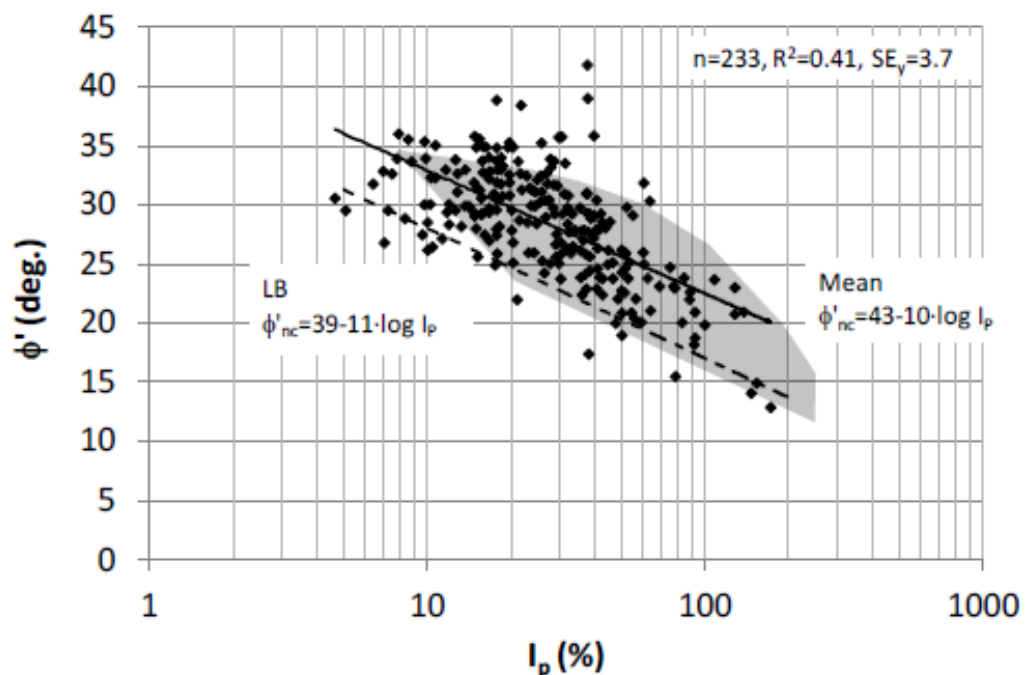
gdje je  $c$  kohezija tla,  $\sigma'_n$  normalno efektivno napreznje i  $\Phi$  kut unutrašnjeg trenja.

## 5. Pregled dosadašnjih istraživanja

U literaturi postoji mnogo istraživanja o korelaciji indeksa plastičnosti  $I_p$  i kuta vršnog unutrašnjeg trenja  $\Phi$ . Pritom je većina istraživanja rađena na normalno konsolidiranim, visokoplastičnim i niskoplastičnim glinama. [17]

Na slici 17. su prikazani rezultati mjerenja autora [18–20] i pritom je ustanovljena logaritamska korelacija. Horizontalna os dijagrama prikazuje vrijednosti indeksa plastičnosti u logaritamskoj mjeri, a vertikalna os prikazuje kut unutrašnjeg trenja u linearnoj mjeri. Iz istraživanja se može zaključiti veliko rasipanje podataka ( $R^2 = 0,41$ ), no unatoč tome vidi se generalni trend rasta kuta unutrašnjeg trenja smanjenjem indeksa plastičnosti, odnosno negativna korelacija između svojstava tla.

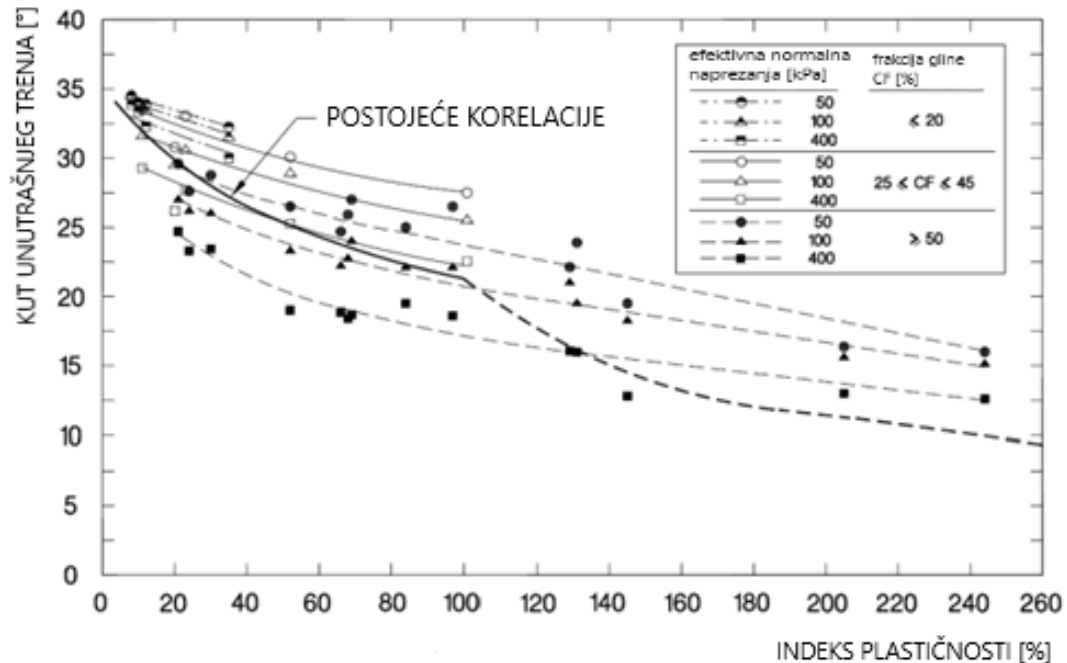
Mnogi autori su osim korelacije  $I_p - \Phi$  obuhvatili i druge korelacije između parametara poput količine čestica gline, granicu tečenja, posmičnu čvrstoću, koheziju u glinama i tako dalje.



Slika 17 - dijagram zavisnosti indeksa plastičnosti  $I_p$  i kuta unutrašnjeg trenja  $\Phi$  i za normalno konsolidirane gline [4][18][19]

Primjerice, u svom istraživanju koje je prikazano na slici 18, analiza Starka i Eida [20] pokazuje utjecaj frakcija gline ( $CF$ ) na korelaciju  $I_p - \Phi$ . Horizontalna os dijagrama

prikazuje vrijednosti indeksa plastičnosti, a vertikalna os prikazuje kut unutrašnjeg trenja. Korelacija je rađena na 24 uzoraka rekonsolidirane, normalno konsolidirane gline ( $I_p=8-244\%$ , frakcija gline  $CF=10-88\%$ , napon konsolidacije  $\sigma'_n=50-400$  kPa). Može se ustvrditi da se povećanjem frakcije gline ili povećanjem napona konsolidacije smanjuje kut unutrašnjeg trenja.



Slika 18 – korelacija  $I_p - \Phi$  za rekonstituirane normalno konsolidirane gline kao u zavisnosti frakcije gline CF i efektivnog normalnog naprezanja  $\sigma'_n$  [20]

Rađene su i korelacije indeksa plastičnosti i granice tečenja sa udjelom gline u tlu. Međutim, prema [21] te korelacije nisu naročito točne zbog nekonzistentnog načina uzorkovanja glina, što daje indiciju da je pri izradi  $I_p - \Phi$  korelacija isto vrlo važan način uzorkovanja za što precizniju korelaciju.

### 5.1. Pregled istraživanja na području Republike Hrvatske

Na području Hrvatske najznačajnija istraživanja su proveli Ž. Ortolan i Z. Mihalinec devedesetih godina 20. stoljeća na istraživanjima klizišta. Preciznije, Ortolan se bavio modeliranjem klizišta. Ortolan je u istraživanjima u periodu od 1990. do 2000. godine ustanovio da se svi geotehnički rezultati istraživanja mogu interpolirati ako su u uskim

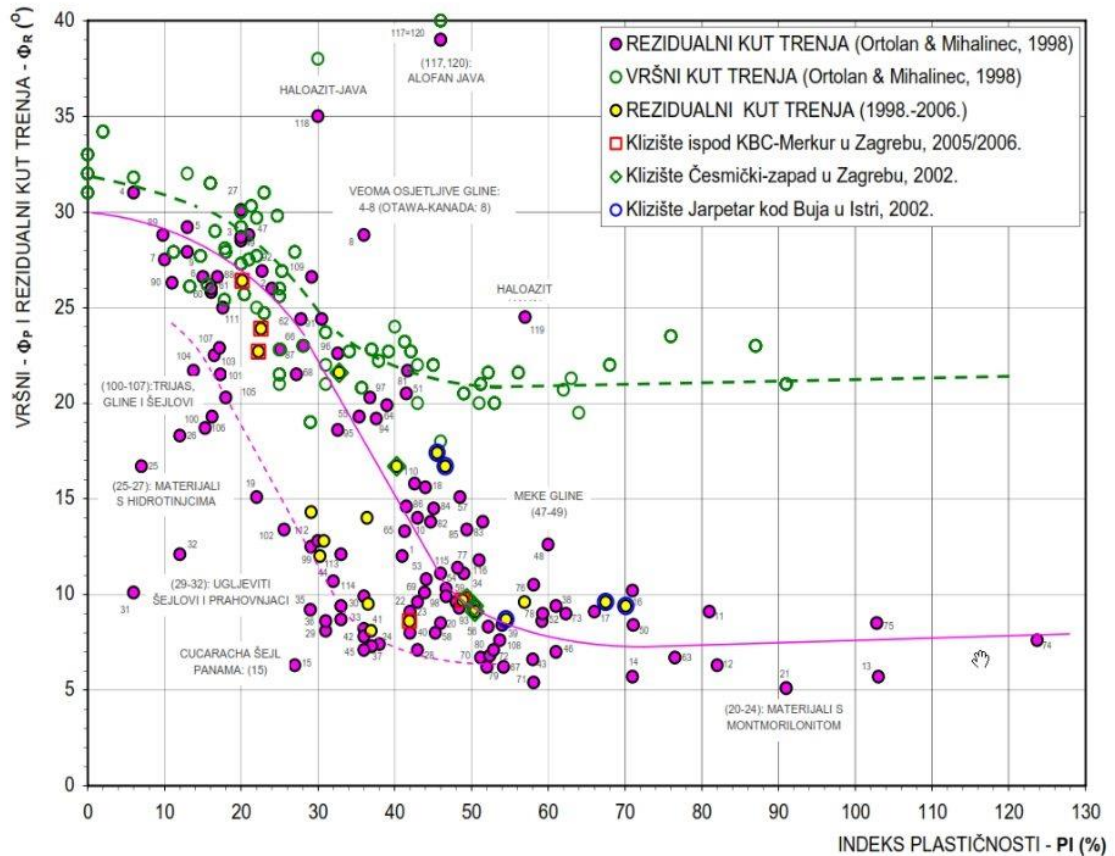
zonama relativne litološke homogenosti, odnosno u stijenama koje su slične litološke građe. Ortolanov model korišten je za određivanje svojstava slojeva stijena ili tla na vertikalnom stupcu bušotine, čime je moguće odrediti sloj sa najmanjom čvrstoćom na smicanje, odnosno sloj sa najmanjim rezidualnim kutom unutrašnjeg trenja.[22]

Ortolan i Mihalinec su za potrebe svojih modela proveli mnoge korelacije svojstava tla pa tako i analizu odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja. Pritom su uzorke podijelili s obzirom na vrstu čvrstoće kuta unutrašnjeg trenja na uzorke sa vršnom čvrstoćom kuta unutrašnjeg trenja i uzorke sa rezidualnom kuta čvrstoćom unutrašnjeg trenja.

Kao i mnogi drugi autori, rezultati Ortolana i Mihalineca, prikazani na slici 19., ukazuju na slabu negativnu korelaciju parametara. Horizontalna os dijagrama prikazuje indeks plastičnosti, a vertikalna os kut rezidualnog i vršnog unutrašnjeg trenja.

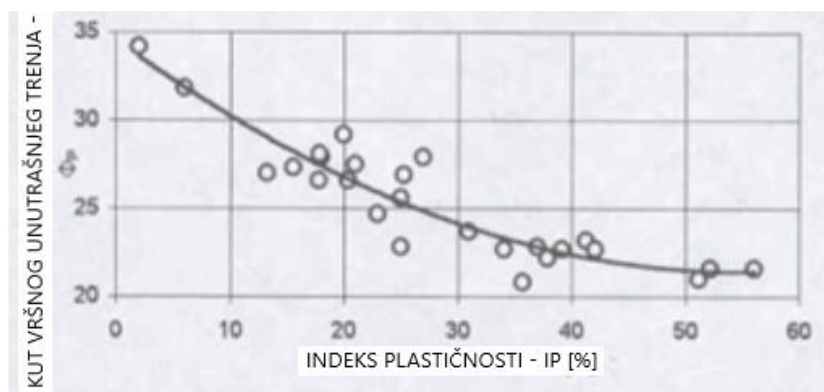
Formula regresijske krivulje za kut vršnog trenja je :

$$\phi = -0.0000000035515638 * I_p^6 + 0.00000015341246 * I_p^5 - 0.000025627925 * I_p^4 + 0.0020409162 * I_p^3 - 0.0742971446 * I_p^2 + 0.757957743 * I_p + 31.2313103616$$



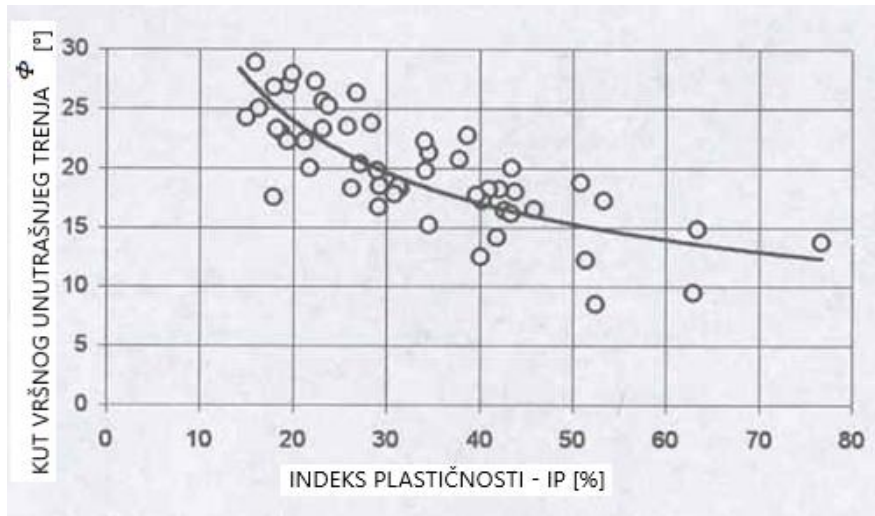
Slika 19 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja. [22]

Osim velike količine podataka iz različitih geoloških područja Ortolan i Mihalinec su napravili i analizu podataka sa užih područja sa litološki sličnijom građom. Rezultati tih analiza ukazuju da je korelacija indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja jača na užim područjima (slika 20. i 21.).



Slika 20 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja za pleistocene gline na području južnih obronaka Medvednice [22]





Slika 21 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja za most na Dunavu u Novom Sadu [22]

## 6. Analiza i rezultati

Analiza uključuje određivanje korelacije između svih uzoraka, korelacije na temelju vrste gline i korelacije uzoraka sa užeg područja. Za sve analize postavljena je regresijska krivulja sa najvećim mogućim  $R^2$ .  $R^2$  je pokazatelj koliko se podaci uklapaju u model regresije, odnosno koliko se promjena nezavisne varijable odražava na promjenu zavisne varijable.  $R^2$  se također naziva R-kvadrat ili  $R^2$  a predstavlja kvadrat koeficijenta korelacije  $r$ . U slučaju korelacija  $I_p - \Phi$ , indeks plastičnosti ( $I_p$ ) je često varijabla koja se mjeri, odnosno nezavisna varijabla, a kut unutrašnjeg trenja ( $\Phi$ ) varijabla koju se određuje, odnosno zavisna varijabla. [23]

Formula za izračun  $R^2$  je

$$R^2 = (r)^2 = \left( \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right)^2 \quad \text{Jednadžba 14}$$

Pri čemu su  $x$  i  $y$  varijable za koje se određuje linearna ili nelinearna korelacija.  $R^2$  ima raspon od 0 do 1, pri čemu 0 označava nepostojanje korelacije a 1 potpunu korelaciju. Svi  $R^2$  su izračunati pomoću programa Microsoft Excel.

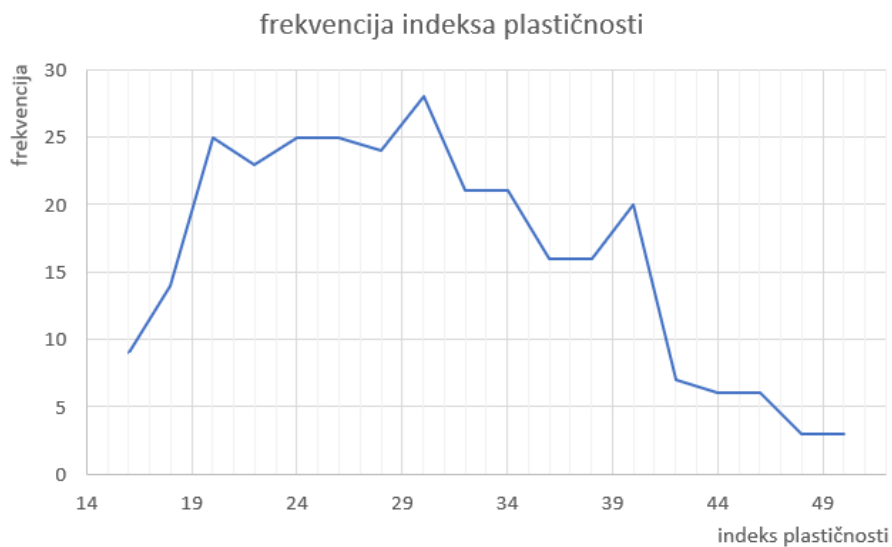
### 6.1. Uzorci

Analiza odnosa indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja je rađena na rezultatima ispitivanja uzoraka u geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta u Varaždinu. Od oko 700 uzoraka odabrano je 306 uzoraka pogodnih za analizu, primarno uzorci koji su jasno definirane niskoplastične (CL) ili visokoplastične (CH) gline prema USCS klasifikacijskom sustavu.

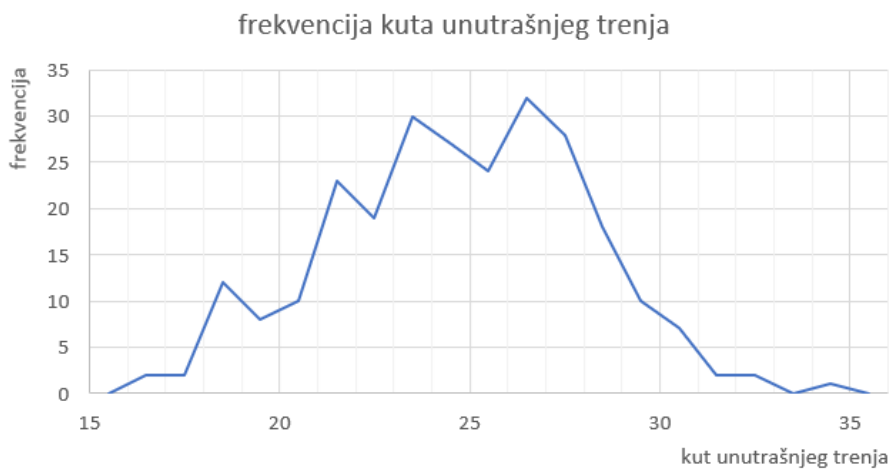
Uzorci su većinom vađeni u kontinentalnoj Hrvatskoj na području središnje Hrvatske, Slavonije, Podravine, Moslavine i Zagorja, a obuhvaćaju područja oko grada Zagreba i okolice, okolice Varaždina, Bjelovara i okolice, Kutine i okolice, Križevaca, Vinkovaca, Slavonskog Broda i okolice, Osijeka i okolice, Karlovca i drugih manjih mjesta. Najveći dio uzoraka izvađen je na prostoru grada Zagreba (105 uzoraka) i njegove okolice. Osim kontinentalne Hrvatske vrlo mali broj uzroka je izvađen u okolini Pule (Medulin), Dubrovnika i okolice i Cavtata. Uzorci su ispitivani u razdoblju od posljednjih dvadeset

godina u uređaju za izravni posmik. Kutovi unutrašnjeg trenja zabilježeni su za vršnu čvrstoću, što znači da na uzorke i rezultat analize veliku ulogu mogu imati početni uvjeti tla, odnosno uvjeti konsolidacije tla.

Raspon indeksa plastičnosti uzoraka je između 15,43 % i 49,61% , a raspon kutova unutrašnjeg vršnog trenja je između 16,3 ° i 34,3 °. Poligoni frekvencija raspona su prikazani na slikama 22. i 23. Većina uzoraka je indeksa plastičnosti između 19 i 40 %. Većina uzoraka imaju kut unutrašnjeg trenja između 22 i 28°.



Slika 22 - Frekvencije raspona indeksa plastičnosti



Slika 23 - Frekvencije raspona kuta unutrašnjeg trenja

## 6.2. Analiza svih uzoraka

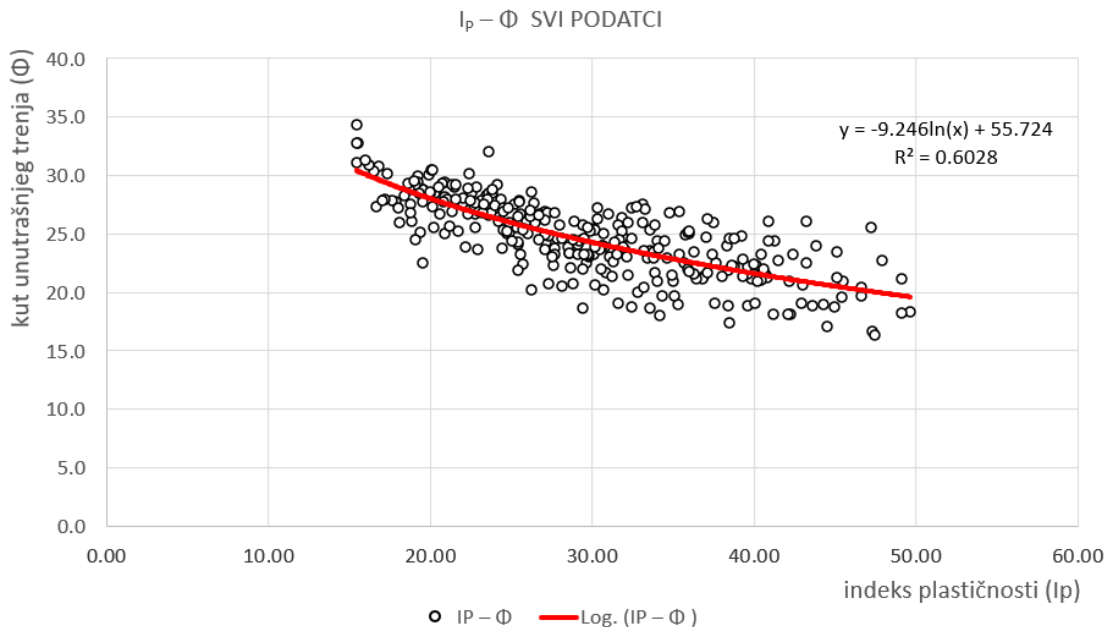
Generalna analiza je rađena na 306 uzoraka čiji je raspon indeksa plastičnosti od 15,43% do 49,61% i čiji su kutovi unutrašnjeg trenja između 16, 3° i 34,3°. Kut unutrašnjeg trenja za sve uzorke je definiran kao kut vršnog unutrašnjeg trenja.

Rezultati analize su prikazani na slikama 24. i 25., pri čemu slika 25. prikazuje istu funkciju na logaritamskoj skali horizontalne osi.

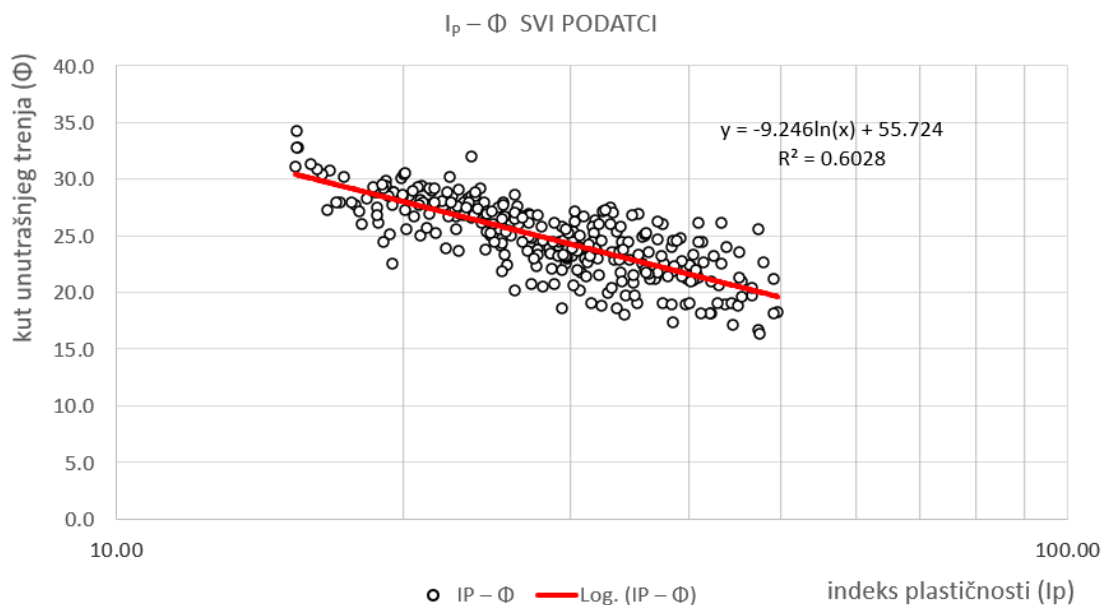
Najbolja korelacija uzoraka je dobivena za logaritamsku funkciju

$$y = -9,15 * \ln(x) + 55,395$$

čiji je  $R^2$  jednak 0,6028, što ukazuje na relativno slabu korelaciju. Iz slika je jasno vidljivo kako je korelacija negativna, odnosno povećanjem indeksa plastičnosti kut unutrašnjeg trenja se smanjuje. Do istih zaključaka su došli i autori mnogih radova prije ovog, uključujući sve napomenute u prijašnjem poglavlju. Funkcije tih autora su često bile logaritamske ili polinomske (primjerice Ortolan i Mihalinać)



Slika 24 - korelacije  $I_p - \Phi$  za sve uzorke



Slika 25 - korelacije  $I_p - \Phi$  za sve uzorke na logaritamskoj skali

Osim logaritamske funkcije valja napomenuti da linearna funkcija

$$y = -0.3082x_{,,} + 33.867$$

ima koeficijent determinacije ( $R^2$ ) od 0,5747 koji je tek neznatno manji od logaritamske korelacije.

### 6.3. Analiza ovisno o vrsti tla

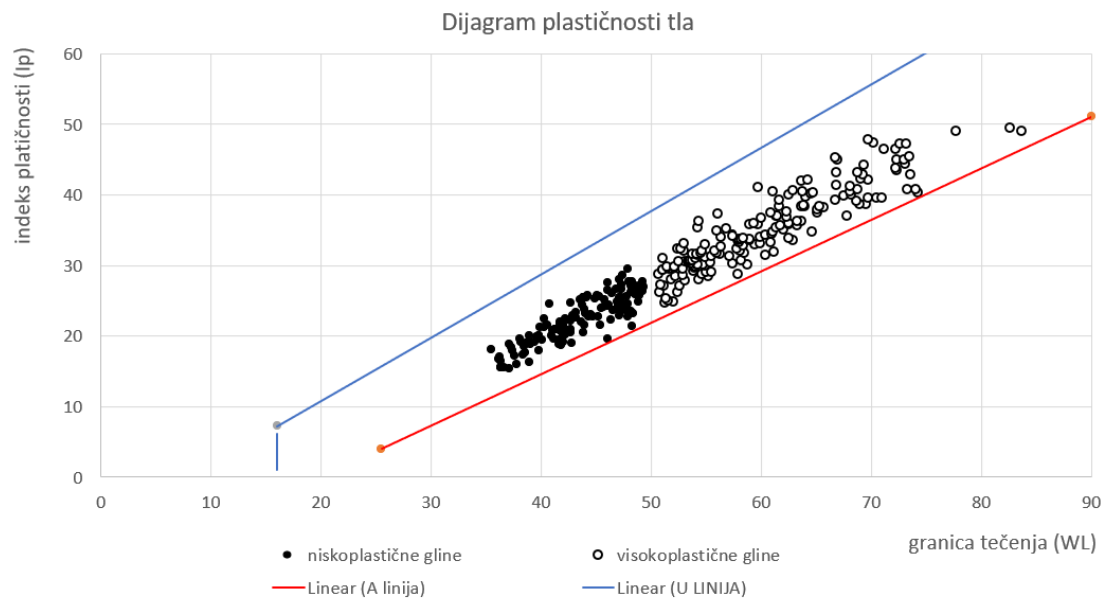
Analiza prema vrsti tla je napravljena podjelom tla na 2 grupe:

- Niskoplastične gline (CL) – 134 uzorka
- Visokoplastične gline (CH) – 172 uzorka

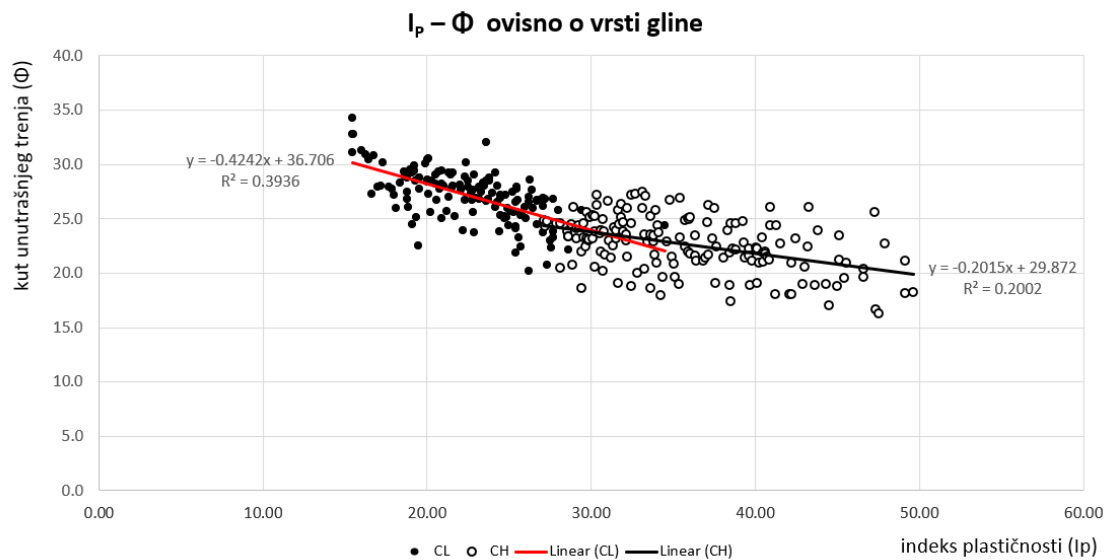
Svi ostali uzorci (mješavine tla, prahovi, pijesci i uzorci sa tragovima pijeska, gline ili praha) izbačeni su iz analize.

Na slici 26. su prikazani uzorci na dijagramu plastičnosti tla. Crveni pravac na dijagramu predstavlja A-liniju, a crni U-liniju. Dijagram plastičnosti u analizi je poslužio

kao dodatan alat za provjeru koje gline su CL ili CH, pošto takve gline mogu biti jedino iznad A-linije.



Slika 26 - dijagram plastičnosti tla za obrađivane uzorke



Slika 27 - korelacije  $I_p - \Phi$  ovisno o vrsti gline

Slika 27. prikazuje uzorke podijeljene prema plastičnosti. Najbolja korelacija uzoraka za obje vrste glina dobivena je za linearnu funkciju regresije. Korelacija za niskoplastične gline je mnogo bolja od korelacije za visokoplastične gline. Nagib pravca

visokoplastičnih glina manji od nagiba pravca za niskoplastične gline, što ide u prilog zaključku da je najbolja korelacija svih podataka logaritamska funkcija, koja objedinjuje oblike ovih dvaju pravaca.

#### 6.4. Analiza uzoraka sa uskog područja

Prema gore navedenim radovima dalo se zaključiti kako je veća korelacija uzoraka sa uskih područja, pošto su takvi uzorci litološki sličnije građe pa stoga dijele više svojstava. Analiza uzoraka sa uskih područja rađena je na uzorcima sa područja grada Zagreba, pošto drugi lokaliteti nisu davali dovoljno velik skup podataka za relevantnu statističku obradu.

Na slici 28. Prikazane su polinomska funkcija 6. stupnja (crna) i logaritamska funkcija (crvena).

Za polinomsku funkciju šestog stupnja

$$y = 3 * 10^{-8}x^6 - 4 * 10^{-6}x^5 + 7 * 10^{-5}x^4 + 0,0061x^3 - 0,319x^2 + 4,4783x + 16,492$$

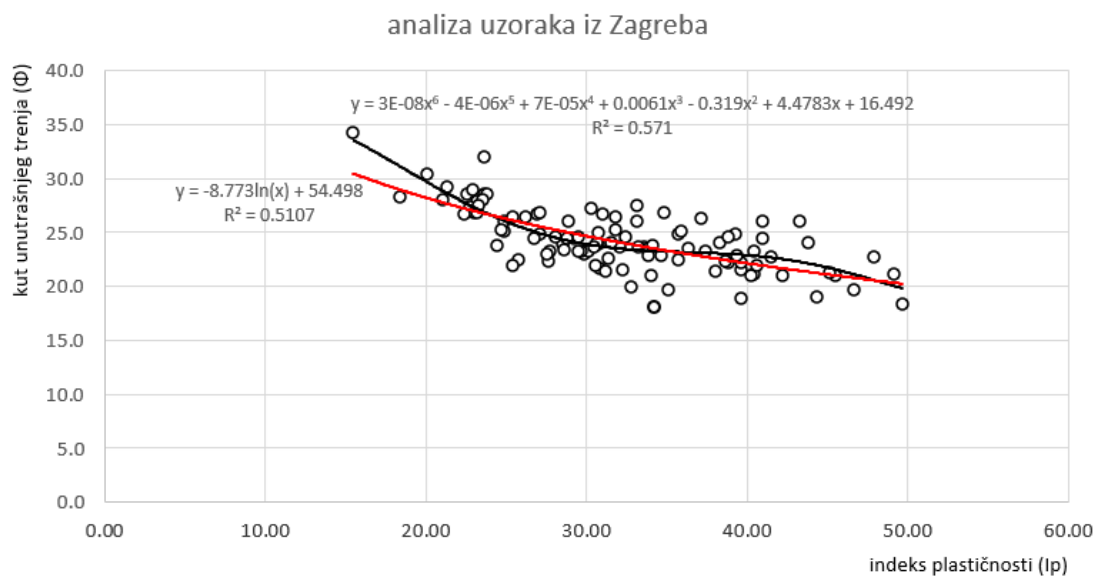
$R^2$  iznosi 0,571 što je jača korelacija od logaritamske funkcije, međutim i dalje slabija korelacija od korelacije za sve uzorke.

Za logaritamsku funkciju

$$y = -8,773 * \ln(x) + 54,498$$

$R^2$  iznosi 0,5107 što je znatno manje od  $R^2$  dobivenog za sve uzorke i ne potvrđuje ranije utvrđenu konstataciju da su uzorci sa užih prostora jače korelirani od uzoraka uzetih sa šireg područja. Postoje dvije mogućnosti zašto bi tako moglo biti:

1. Uzorci uzeti sa područja grada Zagreba su relativno blizu međutim nedovoljno za povećanje  $I_p - \Phi$  korelacije.
2. Uzorci sa područja grada Zagreba su poremećeni ili su početni uvjeti (razina konsolidacije) različiti.



Slika 28 - korelacije  $I_p - \Phi$  na području grada Zagreba. Crvena krivulja je logaritamska funkcija  $R^2 = 0,5107$ . Crna krivulja je polinomska funkcija 6. stupnja  $R^2 = 0,5710$



## 7. Zaključak

Za indeks plastičnosti i kut unutrašnjeg trenja rađena je analiza na visoko i niskoplastičnim glinama, a rezultat analize je slaba negativna korelacija. To znači da se povećanjem jednog parametra drugi smanjuje, ili obrnuto. Konkretno, povećanjem indeksa plastičnosti tla njegov kut unutrašnjeg trenja se smanjuje. Izvedena je analiza svih uzoraka, analiza uzoraka po vrsti i analiza uzoraka sa užeg područja.

Najopsežnija analiza, analiza svih uzoraka, ujedno je dala i najveći koeficijent korelacije ( $R^2$ ), unatoč drugačijim sugestijama analiza iz druge literature. Njen  $R^2$  od 0,6028 dobiven je za logaritamsku funkciju.

Analizom uzoraka po vrsti razdvoja ponašanje odnosa parametara u ovisnosti o vrsti gline. Uzorci su podijeljeni na niskoplastične i visokoplastične. Ova analiza dala je znatno slabiju korelaciju  $R^2$  od 0,3936 za niskoplastične i 0,2002 za visokoplastične gline. Iz analize je vidljivo da se povećanjem plastičnosti gline smanjuje negativnost korelacije, odnosno nagib regresijskog pravca visokoplastičnih glina je mnogo manji od nagiba pravca za niskoplastične gline.

Naposlijetku, analizom uzoraka sa užeg prostora, grada Zagreba, trebalo je ispitati pretpostavku da se smanjenjem područja sa kojega su uzorci uzimani povećava korelacija između njihovih parametara. Uzrok povećanja trebala bi biti veća sličnost početnih uvjeta uzoraka te sličniji uvjeti postanka. Najveći  $R^2$  za ovu analizu dobivene je za polinomsku funkciju šestog stupnja, a iznosi 0,5710. Korelacija na užem prostoru je slabija od korelacije za sve uzorke, moguće iz dva razloga:

1. Uzorci uzeti sa područja grada Zagreba su relativno blizu međutim nedovoljno za povećanje  $I_p - \Phi$  korelacije.
2. Uzorci sa područja grada Zagreba su poremećeni ili su početni uvjeti (razina konsolidacije) različiti.

Prema [17], dobiveni koeficijenti korelacije su previše slabi da bi se koristili u analizama tla, ali mogu biti korišteni u preliminarnim analizama.

## 8. LITERATURA

- [1] Alves ME., Omotoso O., Anderson MA., Antoni M., Rossen J., ... Karstunen M.: Correlation of the Undrained Shear Strength and Plasticity Index of Tropical Clays, *Cem. Concr. Res.*, 6 (2016) 1, pp. 1–11,
- [2] How to Assess Soil Composition, <https://www.dummies.com/article/home-auto-hobbies/garden-green-living/gardening/organic/how-to-assess-soil-composition-193569/>, Accessed: 9.6.2022.
- [3] Roje-Bonacci T.: *Mehanika tla*,
- [4] Terzaghi K., Peck RB., Mesri G.: *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons,
- [5] Saša Kovačević M., Jurić-Kačunić D.: *Europska klasifikacija tla za inženjerske potrebe*, 801 (2014), pp. 801–10, doi: 10.14256/JCE.1077.2014
- [6] Londalen MM.: *Correlation of Properties in Geotechnical Engineering* Marie Monsen Londalen, (2018) July
- [7] Verruijt A.: *SOIL MECHANICS*, (2001) [cited 2022 Apr 23]
- [8] Nonveiller E.: *Mehanika tla i temeljenje građevina*,
- [9] Szavits-Nossan V.: *Klasifikacija tla*,
- [10] *laboratorij Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin*
- [11] LIQUID LIMIT TEST OF SOIL USING CONE PENETROMETER METHOD (IS-2720-PART-5-1985) - CivilBlog.Org, <https://civilblog.org/2013/05/14/liquid-limit-test-of-soil-using-cone-penetrometer-method-is-2720-part-5-1985/>, Accessed: 4.6.2022.
- [12] Čvrste čestice, vlažnost ... struktura tla. 2-2, [cited 2022 May 6]
- [13] Envisioning n-th Order Tensors ©, [https://www.esm.rkriz.net/classes/ESM5344/ESM5344\\_NoteBook/ESM4714/methods/EEG.html](https://www.esm.rkriz.net/classes/ESM5344/ESM5344_NoteBook/ESM4714/methods/EEG.html), Accessed: 5.6.2022.
- [14] GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO, [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/GI\\_2\\_predavanje\\_Stanje\\_naprezanja\\_i\\_deformacija.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/GI_2_predavanje_Stanje_naprezanja_i_deformacija.pdf), Accessed: 17.5.2022.
- [15] Labuz JF., Zang A., Labuz JF., Zang A.: Mohr-Coulomb Failure Criterion, 45 (2012), pp. 975–9, doi: 10.1007/s00603-012-0281-7
- [16] Szavits-Nossan V.: *Mehanika tla i stijena, Posmična čvrstoća tla*, [cited 2022 May 22]

- [17] Sorensen KK.: Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays Corrélation entre la résistance au cisaillement des, (2013) December
- [18] E.W. B., H.O. I.: Earth pressure at rest related to stress history, *Can. Geotech. J.*, 2 (1965) 1, pp. 1–15,
- [19] C.C. L et al.: Stress-deformation and strength characteristics, In: 9th. Int. conf. soil mech. and found p. 421–94,
- [20] T.D. S., H.T E.: Slope stability analysis in stiff fissured clays, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, (1997), pp. 335–43,
- [21] Jurak V., Ortolan Ž., Slovenec D., Mihalinec Z.: Verification of Engineering-Geological/Geotechnical Correlation Column and Reference Level of Correlation (RNK) Method by Observations in the Slip-Plane Zone, *Geol. Croat.*, (2004) [cited 2022 Mar 30], pp. 191–203,
- [22] Mihalinec Z. OŽ.: Plasticity index - Indicator of shear strength and major axis of geotechnical modelling // *Geotechnical Hazards / Marić, B. et al. Balkema, Rotterdam; 1998. str. 743-750*, In: *GEOTECHNICAL HAZARDS* p. 743–50,
- [23] R squared in Excel - Excelchat | Excelchat, <https://www.got-it.ai/solutions/excel-chat/excel-tutorial/r-squared/r-squared-in-excel>, Accessed: 5.4.2022.

## 9. POPIS SLIKA

Slika 1 – Aproksimacija sastava tla [2] .....	2
Slika 2 - Granulometrijski dijagram uzorka tla i karakteristični promjeri čestica [3] ..	6
Slika 3 - odnos Atterbergovih granica i stanja tla [8] .....	10
Slika 4 – Dijagram plastičnosti tla [9] .....	11
Slika 5 – Konusni penetrometar [10] .....	13
Slika 6 - dijagram dobiven penetracijskim testom tla.[10] .....	14
Slika 7 – Valjčići tla na granici plastičnosti [12] .....	15
Slika 8 - Uvjeti za dvostruke USCS oznake [5] .....	18
Slika 9 - Prikaz normalnih ( $\sigma$ ) i posmičnih ( $\tau$ ) naprežanja na trodimenzionalno tijelo [13] .....	21

Slika 10 - Ravninsko stanje naprezanja u tlu određeno je dvama normalnim i jednim posmičnim naprezanjem [14].....	21
Slika 11 - kompresija (lijevo) uzrokovana normalnim naprezanjem je promjena volumena bez promjene oblika, a distorzija (desno) uzrokovana posmičnim naprezanjem je promjena oblika bez promjene volumena [7].....	22
Slika 12 - Mohrova kružnica i anvelopa sloma tla. [7].....	23
Slika 13 - Vršna i rezidualna čvrstoća tla na primjeru normalno konsolidiranog i prekonsolidiranog pijeska. Vršna čvrstoća označena je crvenom bojom, a rezidualna čvrstoća za obje vrste pijeska nalazi se s desne strane dijagrama, pri većem pomaku uzorka. [16].....	25
Slika 14 - Skica uređaja za test izravnog posmika (1-uređaj za nametanje vertikalne sile $\sigma$ , 2- vodilice uređaja za vertikalno opterećenje koje sprječavaju naginjanje gornje ploče, 3- mjerač vertikalnog pomaka gornje ploče, 4-gornja ploča, 5-nazubljeni šupljikavi kamen, 6-uzorak tla, 7-pomična posuda na ležajevima, 8-gornji (nepomični) i donji (pomični) okvir za uzorak potopljen u vodi, 9-mjerilo horizontalne sile H, 10-uređaj za nametanje jednoliko rastućeg horizontalnog pomaka, 11-ploha na kojoj se pretpostavlja da će doći do posmičnog sloma uzorka tla) [16] .....	26
Slika 15 – ćelija uređaja za test izravnog posmika (1-okviri kutije za smicanje, 2-donja ploča kutije sa zasjecima za dreniranje tekućine, 3-gornja ploča kutije, 4- nazubljeni šupljikavi kamen) .....	26
Slika 16 - Određivanje anvelope sloma uređajem na 3 slična uzorka pri različitim početnim normalnim naprezanjima [16].....	27
Slika 17 - dijagram zavisnosti indeksa plastičnosti $I_p$ i kuta unutrašnjeg trenja $\Phi$ i za normalno konsolidirane gline [4][18][19] .....	28
Slika 18 – korelacija $IP - \Phi$ za rekonstituirane normalno konsolidirane gline kao u zavisnosti frakcije gline CF i efektivnog normalnog naprezanja $\sigma'_n$ [20].....	29
Slika 19 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja. [22] ..	31
Slika 20 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja za pleistocene gline na području južnih obronaka Medvednice [22] .....	31
Slika 21 – Dijagram korelacije indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja za most na Dunavu u Novom Sadu [22].....	32
Slika 22 - Frekvencije raspona indeksa plastičnosti.....	34
Slika 23 - Frekvencije raspona kuta unutrašnjeg trenja .....	34
Slika 24 - korelacije $I_p - \Phi$ za sve uzorke.....	35

Slika 25 - korelacije $IP - \Phi$ za sve uzorke na logaritamskoj skali .....	36
Slika 26 - dijagram plastičnosti tla za obrađivane uzorke .....	37
Slika 27 - korelacije $IP - \Phi$ ovisno o vrsti gline .....	37
Slika 28 - korelacije $IP - \Phi$ na području grada Zagreba. Crvena krivulja je logaritamska funkcija $R2 = 0,5107$ . Crna krivulja je polinomska funkcija 6. stupnja $R2 = 0,5710$ .....	39

## 10. POPIS TABLICA

Tablica 1 - Razredba tla prema nominalnom promjeru čestica [3] .....	5
Tablica 2 - uvjeti dobre graduiranosti krupnozrnatog tla [3] .....	7
Tablica 3 - kriteriji USCS klasifikacije tla [5] .....	17