

# Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti

---

**Pokrajac, Dejan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:130:818393>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



# Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti

---

**Pokrajac, Dejan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:130:818393>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DEJAN POKRAJAC

KORELACIJSKA ANALIZA ZAVISNOSTI  
DRENIRANOG KUTA UNUTRAŠNJEG TRENJA  
O INDEKSU PLASTIČNOSTI

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

KORELACIJSKA ANALIZA ZAVISNOSTI  
DRENIRANOG KUTA UNUTRAŠNJEG TRENJA  
O INDEKSU PLASTIČNOSTI

KANDIDAT:

Dejan Pokrajac

MENTOR:

Doc.dr.sc. Ivan Kovač

NEPOSREDNI VODITELJ:

Damir Štuhec, dipl.ing.geotehnike

VARAŽDIN, 2018.

# ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Kandidat: Dejan Pokrajac

Broj indeksa: 2347 – 2013./2014.

Mentor: doc.dr.sc. Ivan Kovač

Neposredni voditelj: Damir Štuhec, dipl.ing. geotehnike

Zadatak zadan: 17.4.2018.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

## **Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti**

Rad treba sadržavati:

### **1. Uvod**

### **2. Klasifikacija tla**

USCS klasifikacija, granice konzistencije koherentnog tla, metode određivanja granica plastičnosti. Indeksni pokazatelji koherentnog tla; indeks plastičnosti.

### **3. Posmična čvrstoća**

Mohr-Coulombov zakon čvrstoće, anvelopa sloma. Definicija i dobivanje kuta unutarnjeg trenja. Vršni kut unutarnjeg trenja. Kohezija. Izravni posmik. CD pokus.

### **4. Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti**

Rezultati. Tabela i grafički prikaz rezultata. Analiza dijagrama disperzije. Uklapanje pravca (ili krivulje) regresije.

### **5. Zaključak**

**Prilozi**

**Literatura**

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

### **Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti**

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Ivana Kovača i neposrednog voditelja Damira Štuheca, dipl.ing.geotehnike.

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, 20.6.2018.

Dejan Pokrajac

---

(Ime i prezime)

Pokrajac D.

---

(Vlastoručni potpis)

## **Sažetak**

Autor: Dejan Pokrajac

Naslov rada: Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti

Posmična čvrstoća tla je vrijednost posmičnog naprezanja pri slomu duž klizne plohe u tlu. Sva mjerenja izvršena su u Geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta u Varaždinu, na uređaju za izravni posmik s kontroliranom deformacijom. U svrhu dokazivanja čvrste korelacije između vršnog kuta unutrašnjeg trenja i indeksa plastičnosti, ispitan je veći broj uzoraka glinovitog tla različitog indeksa plastičnosti, izračunatog na temelju granice tečenja i granice plastičnosti, dobivenih laboratorijskim klasifikacijskim testovima. Uzorkovanje i ispitivanje materijala provedeno je u periodu od siječnja 2007. do lipnja 2010. godine, a materijal je uzet na više lokacija u Republici Hrvatskoj. Provedena ispitivanja i rezultati mjerenja u ovom završnom radu potvrđuju ona poznatih domaćih stručnjaka poput Ortolana i Mihalineca. Interpretacija rezultata jasno dokazuje izraženu zavisnost između indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja koherentnog tla.

### **Ključne riječi:**

Posmična čvrstoća, kut unutrašnjeg trenja, indeks plastičnosti, korelacija, koeficijent determinacije.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. KLASIFIKACIJA TLA .....	2
2.1. Areometriranje .....	6
2.2. Indeksni pokazatelji koherentnog tla .....	8
2.3. Klasifikacijski testovi – određivanje Atterbergovih granica.....	10
2.3.1. Granica tečenja .....	11
2.3.2. Granica plastičnosti .....	13
3. POSMIČNA ČVRSTOĆA .....	15
3.1. Određivanje posmične čvrstoće tla .....	17
3.1.1. Drenirani ili CD pokus izravnog posmika.....	21
4. KORELACIJSKA ANALIZA ZAVISNOSTI DRENIRANOG KUTA UNUTRAŠNJEG TRENJA O INDEKSU PLASTIČNOSTI .....	22
5. ZAKLJUČAK.....	38
6. LITERATURA .....	39
7. POPIS SLIKA.....	40
8. POPIS TABLICA .....	42



# 1. UVOD

Današnje mogućnosti ispitivanja i mjerenja daju nam dobar uvid u ponašanje tla pod raznim uvjetima opterećenja. Tlo kao materijal sastavljen od tri faze (čvrste čestice, voda, pore), kao i sva njegova svojstva, su najbitniji faktori u geotehnici te inženjerskoj građevinskoj praksi.

Dobar pokazatelj aktualnog stanja koherentnog tla je vlažnost u usporedbi s granicama plastičnosti tj. konzistentno stanje. Jedan od tih sadržaja vlage naziva se indeksom plastičnosti koji opisuje plastičnost i najčešće se koristi za klasifikaciju tla.

Kod deformiranja tla jedan od problema je formiranje klizne plohe zbog koje dolazi do nepovoljne pojave - klizanja, odnosno nastanka klizišta na dijelovima terena pogođenima tim procesom. Stoga proizlazi da je jedno od najvažnijih inženjerskih svojstava posmična čvrstoća tla.

Posmična čvrstoća je vrijednost posmičnog naprezanja u trenutku sloma, duž klizne plohe unutar mase tla. Vrlo je važno razlikovati vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću tla. Za potrebe projektiranja vršna čvrstoća je značajna samo u slučajevima malih deformacija, kada je naprezanje znatno manje od onog koje bi izazvalo slom u tlu. U slučajevima kada se očekuje da bi posmično naprezanje moglo doseći vršnu posmičnu čvrstoću mjerodavna je vrijednost rezidualne posmične čvrstoće kako bi se spriječila pojava progresivnog sloma u tlu.

Kut unutarnjeg trenja jedan je od sastavnih parametara posmične čvrstoće, odnosno otpora tla prema klizanju. Posmična čvrstoća tla u laboratoriju najčešće se određuje u uređaju za izravni posmik.

U ovom radu bit će dokazana jaka zavisnost indeksa plastičnosti i kuta unutarnjeg trenja za uzorke koherentnih glinovitih materijala ispitivanih u Geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta u Varaždinu, čime se dodatno potvrđuju ispitivanja koja su ranije izvršili stručnjaci poput Ortolana i Mihalineca.

## 2. KLASIFIKACIJA TLA

Tlo je prirodna mješavina mineralnih zrna i kao takvo jedan od najvažnijih inženjerskih materijala. Postoji niz različitih klasifikacija tla. U geotehnici postoji nekoliko načina klasificiranja tla od kojih su neki opće prihvaćeni, a neki se koriste ograničeno ili su napušteni. Oni koji se koriste, koriste se u izvornom obliku ili su naknadno doručeni. Klasifikacija služi da bi se tla mogla međusobno razlikovati po nazivu iza kojeg se krije skupina tla sličnih fizičko-mehaničkih svojstava. Također, klasifikacija olakšava sporazumijevanje među korisnicima geotehničkih podataka, jer je međunarodno prihvaćena i koristi se s manjim modifikacijama u cijelom svijetu. Klasifikacije tla mogu biti prema veličini zrna (nekoherentna tla) i prema stanju plastičnosti (koherentna tla). Za njih je potrebno provesti relativno jednostavna laboratorijska ispitivanja kao što su sijanje, areometriranje i određivanje granica konzistentnih stanja. Prema veličini odnosno promjeru zrna najviše se koristi podjela prema AC (Airfield Classification) odnosno USC (Unified Soil Classification) sustavu i podjela prema MIT-u (Massachusetts Institute of Technology) koja je uobičajena u domaćoj praksi (Tablica 1). [1]

Opće karakteristike tla kao što su stišljivost, čvrstoća, propusnost, poroznost, bitno su uvjetovane veličinom i oblikom čvrstih čestica. Prema USCS-u, odnosno jedinstvenom sustavu klasifikacije tla, tlo dijelimo na dvije glavne skupine:

- 1) KRUPNOZRNATO (nekoherentno, nevezano)
- 2) SITNOZRNATO (koherentno, vezano)

Krupnozrnata tla su šljunak (oznaka G) i pijesak (oznaka S), a sitnozrnata su glina (oznaka C), prah (oznaka M), te organsko tlo (oznaka O) i treset (oznaka P).

Granica između koherentnih i nekoherentnih tla je vidljiva granica (0,06 mm) te je prikazana u Tablici 1.

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna [1]

VRSTA TLA		PROMJER ZRNA (mm)		SIMBOL
		prema AC i USC sustavu	prema MIT-u	
Krupnozrnato tlo	Šljunak	> 4,75	60 - 2	G
	Pijesak	4,75 - 0,075	2 - 0,06	S
Sitnozrnato tlo	Prah	< 0,075	0,06 - 0,002	M
	Glina		< 0,002	C

Krupnozrnata tla sadrže preko 50% zrna većih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm.

Sitnozrnata tla sadrže preko 50% zrna manjih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm.

Graduiranost krupnozrnatog tla izračunava se iz karakteristika granulometrijske krivulje koje se određuju pomoću vrijednosti koeficijenta jednoličnosti  $C_u$  i koeficijenta zakrivljenosti  $C_c$  (Tablica 2). [2]

Tablica 2. Graduiranost krupnozrnatog tla [1]

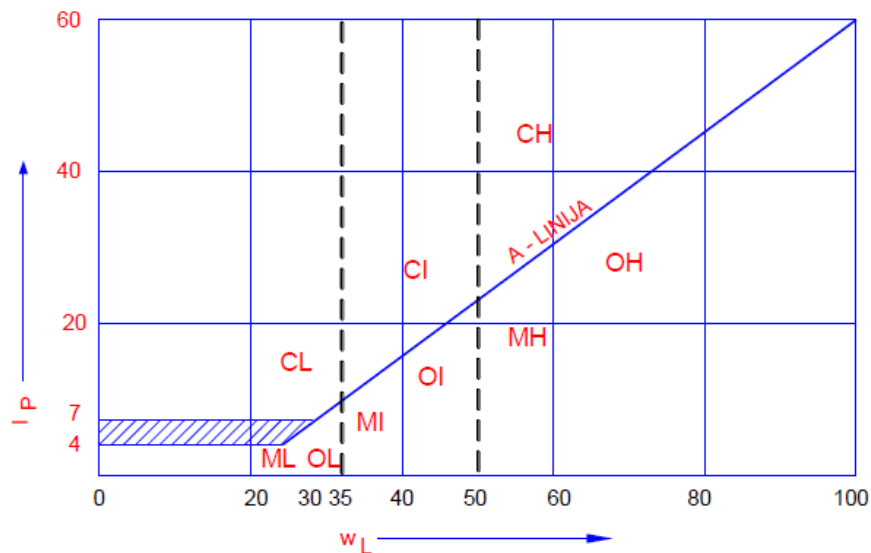
GRADUIRANOST	UVJET GRADUIRANOSTI	OZNAKA
dobra	$C_u > 4$ za šljunak; $1 < C_c < 3$ $C_u > 6$ za pijesak; $1 < C_c < 3$	W
slaba	ako vrijednost $C_u$ i/ili $C_c$ <b>ne</b> zadovoljavaju uvjete	P

Sitnozrnato tlo klasificira se prema granici tečenja  $w_L$  i indeksu plastičnosti  $I_p$  odnosno položaju točke u dijagramu plastičnosti s koordinatama granice tečenja po osi  $x$  i indeksa plastičnosti po osi  $y$ . Prema granici tečenja, sitnozrnato tlo može biti: niskoplastično, srednje plastično i visokoplastično (Tablica 3).

Tablica 3. Stupanj plastičnosti sitnozrnatog tla [2]

Stupanj plastičnosti	Granica tečenja $w_L$ (%)		Oznaka
	prema AC	prema USC	
nisko plastično	< 35%	< 50%	L
srednje plastično	35% do 50%	nema	I
visoko plastično	> 50%	> 50%	H

Indeks plastičnosti dijeli sitnozrnato tlo na anorganske gline, anorganski prah i organske materijale. Arthur Casagrande 1947. godine utvrdio je da povezujući indeks plastičnosti i granicu tečenja za pojedine koherentne vrste materijala, nastaje grupiranje materijala u pojedinim zonama. Na taj način je dobio dijagram koji je nazvao *dijagram plastičnosti* (Slika 1). Uočio je da se anorganske gline grupiraju iznad organskih glina i prašinih materijala za iste vrijednosti granice tečenja. To znači da organske gline i prašinski materijali imaju manji raspon vlažnosti između granice plastičnosti i granice tečenja. Proučavajući velik broj prikaza Casagrande je ustanovio kosi pravac, koji je nazvao A-linija. Prema vrijednosti indeksa plastičnosti, ovaj pravac dijeli područje dijagrama na dvije zone: iznad A-linije je zona glinovitih materijala, a ispod A-linije je zona prahovitih i organskih materijala.



Slika 1. Dijagram plastičnosti [3]

Tablica 4. USCS klasifikacija tla [4]

Glavna podjela		Grupa simbola	Uobičajeni nazivi	Klasifikacijski kriterij za krupnozrnata tla				
Krupnozrnata tla (više od polovice materijala s zrnima većim od 0,06 mm)	Šljunak (više od polovice krupnih frakcija s zrnima većim od 2 mm)	Čisti šljunak (malo ili ništa sitnih čestica)	GW	dobro granulirani šljunci, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$			
			GP	slabo granulirani šljunci, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica	Sve gradacije koje ne zadovoljavaju kriterije za GW			
		Šljunak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)	GM	prašnasti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i praha	Attebergove granice ispod A-linije ili $I_p < 4$	Poviše A-linije sa $4 < I_p < 7$ su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola		
			GC	glinoviti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i mulja	Attebergove granice iznad A-linije ili $I_p > 7$			
	Pijesak (više od polovice krupnih frakcija s zrnima manjim od 2 mm)	Čisti pijesak (malo ili ništa sitnih čestica)	SW	dobro granulirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$			
			SP	slabo granulirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica	Sve gradacije koje ne zadovoljavaju kriterije za SW			
		Pijesak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)	SM	prašnasti pijesci, mješavina pijeska i praha	Attebergove granice ispod A-linije ili $I_p < 4$	Isctane granice u zoni vrijednosti s $4 < I_p < 7$ su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola		
			SC	glinoviti pijesci, mješavina pijeska i praha	Attebergove granice iznad A-linije ili $I_p > 7$			
			ML	Neorganske prašine, prašinast ili glinoviti sitni pijesci, niske plastičnosti	- odrediti postotke pijeska i šljunka iz granulometrijske krivulje - u ovisnosti o postotcima sitnih čestica (frakcije <0.06 mm), krupnozrnata tla su klasificirana: - Manje od 5% : GW, GP, SW, SP - Od 5% do 12% : granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola			
			CL	Neorganske gline, prašnaste gline, pjeskovite gline, niske plastičnosti	<p>plastičnost prema A-dijagramu<sup>3</sup>:</p>			
OL	Organske prašine, organske prašnaste gline, niske plastičnosti							
Prašine i gline visoke plastičnosti ( $w_L > 50$ )	MH	Neorganske prašine visoke plastičnosti						
	CH	Neorganske gline visoke plastičnosti						
	OH	Organske gline visoke plastičnosti						

## 2.1. Areometriranje

Areometriranje (Slika 3) je metoda određivanja granulometrijskog sastava tla za materijal koji sadrži zrna manja od 0,06 mm (prah, glina). Budući da tako sitne čestice nije moguće sijati (nisu vidljive golim okom), veličina i postotak pojedinih frakcija određuju se indirektno, mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima, primjenjujući tzv. Stockesov zakon. Stockesovim zakonom se definira brzina padanja zrnaca u mirnoj tekućini koja je veća što su čestice krupnije. Drugim riječima, ako u vodu uspemo malu količinu materijala koji se sastoji od čestica različite veličine, krupnije čestice padat će brže, a sitnije sporije.

Stockes-ov zakon glasi:

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{18 \times \eta} D^2$$

Brzina se može pisati i kao:

$$v = \frac{H}{t}$$

Izjednačavanjem tih dvaju izraza dobiva se:

$$D_t = \sqrt{\frac{18 \times \eta \times H}{(\rho_s - \rho_w) \times t}} = const. \times \sqrt{\frac{H}{t}}$$

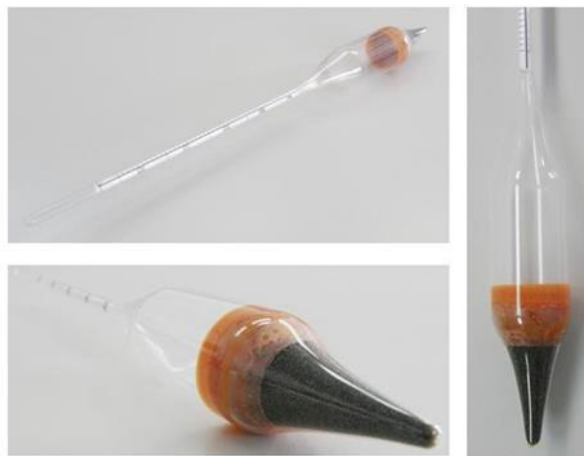
gdje je:

v - brzina padanja čestice,  $D_t$  - promjer istaloženog zrna nakon vremena t,

$\eta$  - viskoznost vode na određenoj temperaturi, H - visina padanja zrna,

t – vrijeme,  $\rho_s$  – gustoća čestica,  $\rho_w$  – gustoća vode.

Pokus teče tako da se u menzuru ulije destilirana voda i naspe materijal tla, koji se dobro natopi i dispergira u vodi pomoću miješalice. Vodi je dodan antikoagulans (natrij heksametafosfat) da spriječi koagulaciju, tj. nakupljanje manjih čestica u veće. Količina materijala tla ovisi o veličini čestica. Čestice tla padaju u suspenziji i talože se na dnu. Prije nego što padnu na dno prođu pored težišta areometra koje predstavlja «vrata» pored kojih se pri prolasku registrira promjena gustoće suspenzije, što se očita na vratu areometra (Slika 2) u određenim vremenskim razmacima. [3]



Slika 2. Areometar [2]



Slika 3. Postupak areometriranja [2]

## 2.2. Indeksni pokazatelji koherentnog tla

Za klasifikaciju sitnozrnatog tla služe **Atterbergove granice**; niz empirijskih, laboratorijskih pokusa oblikovanih za potrebe određivanja ponašanja glina pri određenoj vlažnosti. Atterberg je svojevremeno odredio čitav niz takvih granica od kojih su se za upotrebu zadržale samo neke. Njih je kasnije doradio i standardizirao za upotrebu Arthur Casagrande. Ovi pokusi u postojećim standardima nazivaju se klasifikacijski pokusi, a rezultati pokusa su granica tečenja, granica plastičnosti, granica stezanja i indeksni pokazatelji. Služe da se na indirektan način pobliže definiraju svojstva glinovitih komponenti tla.

Granice plastičnih stanja (Atterbergove granice) su:

1) *Granica stezanja* (shrinkage limit) - oznaka  $w_s$  – definira ju vlažnost na prijelazu iz polučvrstog u čvrsto konzistentno stanje, tj. određena je sadržajem vlažnosti pri kojemu se postignuti volumen uzorka ne smanjuje daljnjim sušenjem.

2) *Granica plastičnosti* (plasticity limit) - oznaka  $w_p$  - definirana je sadržajem vode na prijelazu iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje tla. To je ona minimalna vlažnost kod koje se valjčić promjera 3 mm još može plastično deformirati.

3) *Granica tečenja* (liquid limit) - oznaka  $w_L$  - mjera potencijalne kohezivnosti tla, a definirana je sadržajem vode (vlažnosti) na prijelazu koherentnog tla iz tekućeg u plastično konzistentno stanje. To je ona vlažnost kod koje se pri malom poremećaju materijal tla počinje ponašati kao žitka masa. Što su čestice tla sitnije, potrebno je više vode da se postigne njihova određena međusobna pokretljivost, a time i vlažnost kojom se definira granica tečenja. Visoka vrijednost granice tečenja je prema tome pokazatelj sitnozrnatosti tla.

Poznavanjem gore spomenutih granica koherentan materijal možemo klasificirati u određene skupine prema plastičnosti. Za klasificiranje materijala prema plastičnosti, potrebno je odrediti indeksne pokazatelje, kao što su indeks plastičnosti, indeks konzistencije, te indeks tečenja.



*Indeks plastičnosti* predstavlja razliku sadržaja vlage između granice tečenja i granice plastičnosti:

$$I_p = w_L - w_p$$

Što je indeks plastičnosti veći, to je veća stabilnost koherentnog materijala kod promjene sadržaja vode. Veći indeks plastičnosti ukazuje na veću žilavost i čvrstoću materijala u suhom stanju.

*Indeksom konzistencije* se određuje stanje konzistencije za koherentne vrste tla. Što je veći  $I_c$  tlo je povoljnije.

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

gdje je:  $w_L$  - granica tečenja,  $w$  - prirodna vlažnost,  $I_p$  - indeks plastičnosti

Kada je indeks konzistencije jednak nuli ( $I_c = 0$ ), tada je materijal u konzistentnom stanju na granici tečenja, a kad je jednak jedan ( $I_c = 1$ ), tada je materijal u konzistentnom stanju na granici plastičnosti.

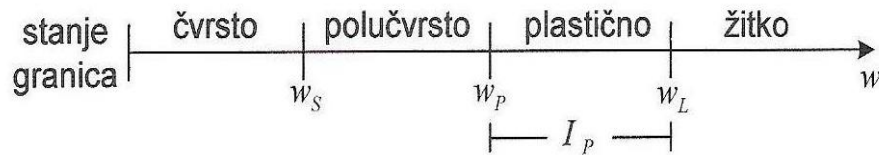
*Indeks tečenja* u praksi se samo ponekad koristi:

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

gdje je:  $w$  - prirodna vlažnost,  $w_p$  - granica plastičnosti,  $I_p$  - indeks plastičnosti

Indeks tečenja je alternativni pokazatelj konzistentnog stanja koji se ponekad koristi umjesto indeksa konzistencije. Ukoliko je indeks tečenja negativan, vlažnost tla je manja od granice plastičnosti i zato je tlo u polučvrstom ili čvrstom stanju.

Fizikalne karakteristike glinovitih tla mijenjaju se sadržajem vode. Suho glinovito tlo može biti potpuno čvrsto. S porastom vode u njemu ono postaje najprije polučvrsto, zatim plastično te naposljetku prelazi u žitko stanje (Slika 4). Količina vode pri kojoj se održavaju te promjene u glini ovisi o granulometrijskom sastavu, o sadržaju koloidnih čestica i o vrstama minerala gline što ih sadrži. [3]



Slika 4. Stanja konzistencije glinovitih materijala [5]

### 2.3. Klasifikacijski testovi – određivanje Atterbergovih granica

Ovo laboratorijsko ispitivanje provodi se u svrhu određivanja konzistentnih granica koherentnog tla, odnosno granica tečenja i plastičnosti. Granica tečenja ( $w_L$ ) definirana je kao minimalna vlažnost pri kojoj tlo teče (pod svojom vlastitom težinom). Tlo je potrebno prethodno dobro homogenizirati, njime napuniti posudicu i posebnim nožem urezati brazdu široku 2 mm. Vlažnost na granici tečenja dobije se kada se brazda u posudici spoji na duljini 13 mm kod dvadeset i petog udara, a posudica udara na postolje određene tvrdoće s visine od 1 cm, dva puta u sekundi.

Atterberg je definirao sedam granica konzistencije za klasifikaciju sitnozrnatog tla. Međutim, danas se u inženjerstvu najčešće koriste samo dvije: granica tečenja i granica plastičnosti. Treća granica, granica stezanja, koristi se samo povremeno. Sadržaj vlage kod granice tečenja definiran je na granici gdje tlo prelazi iz plastičnog u tekuće stanje, a kod granice plastičnosti gdje tlo prelazi iz polučvrstog u plastično stanje. Granica stezanja određena je sadržajem vlage pri kojem se postignuti volumen uzorka ne smanjuje daljnjim sušenjem.

Oprema za utvrđivanje Atterbergovih granica je aparat za ispitivanje granice tečenja, sito otvora 0,5 mm, nožić za urezivanje brazde, posudice za tlo, nožić za punjenje, boca štrcalica sa destiliranom vodom, vaga i sušionik (Slika 5). [6]



Slika 5. Oprema za utvrđivanje Atterbergovih granica [6]

### 2.3.1. Granica tečenja

Određena je sadržajem vlažnosti pri kojem će uzorak tla početi teći ako ga se potrese. Odnosno, granica tečenja predstavlja onaj sadržaj vode pri kome koherentni materijal tla prelazi iz tekućeg u plastično konzistentno stanje. Pomoću ovog pokazatelja sitnozrnata tla se mogu podijeliti na sljedeće osnovne grupe prema AC klasifikaciji (Tablica 3): visokoplastično tlo, niskoplastično tlo, neplastično tlo.

Granica tečenja se određuje pomoću uređaja s pokretnom mjedenom zdjelicom standardiziranog oblika, tzv. Casagrande-ovog aparata.

Tijek određivanja:

- 1) Tlo se protisne kroz sito od 0,5 mm da se uklone mogući kamenčići i pomiješa sa određenom količinom destilirane vode sve dok se ne dobije glatka masa. Prekrije se celofanom da se spriječi gubitak vlage.
- 2) Izvažuju se prazne posudice te se njihova masa i broj zapišu u odgovarajuću tablicu (Tablica 5).

Tablica 5. Prikaz načina upisa podataka za granicu tečenja [2]

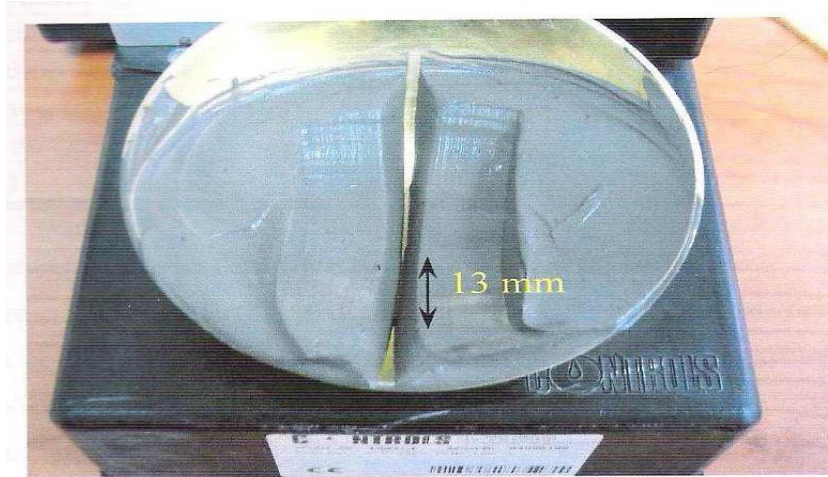
Broj uzorka	1	2	3	4
Broj posudice	x	x	x	x
$M_p$ = masa posudice (grami)	x	x	x	x
$M_{p1}$ = masa vlažnog uzorka i posudice (grami)	x	x	x	x
$M_{p2}$ = masa suhog uzorka i posudice (grami)	x	x	x	x
$M_d$ = masa suhog uzorka (grami)	x	x	x	x
$M_w$ = masa vode (grami)	x	x	x	x
$w_0$ = vlaga (%)	x	x	x	x
Broj udaraca (N)	x	x	x	x

3) Provjeri se visina pada posude na postolje, koja mora odgovarati visini pada od 10 mm. Visina noža za urezivanje je također 10 mm, a širina dijela za urezivanje je 2 mm. Potrebno je odrediti pravilnu brzinu okretanja ručice tako da posuda pada točno dva puta u sekundi.

4) Određena količina prethodno homogeniziranog tla stavi se u posudu, dobro se pritisne da se eliminiraju svi mjehurići zraka i raširi se po posudi. Pripremljen uzorak mora biti horizontalan, a njegova dubina 10 mm na najdubljem dijelu posude.

5) Nožem za udubljenje pažljivo se usječe brazda duž sredine uzorka. Nož je uvijek potrebno držati okomito u odnosu na dno posude dok se urezuje brazda. Treba se posvetiti posebna pažnja da bi se spriječilo klizanje tla iz posude. Tako je tlo podijeljeno u dvije polovice.

6) Provjeri se da je postolje Casagrandeovog aparata ispod posude očišćeno od tla kao i sami vanjski dio posude aparata. Uključi se ručica aparature tako da udara točno dva udarca u sekundi i istodobno se broji broj udaraca posude u postolje aparata, dok se dvije polovice uzorka ne spoje po dužini od 13 mm (Slika 6). Ukoliko broj udaraca prođe 50, tada se ide na korak broj 8 i ne zapisuje broj udaraca, u suprotnom se broj udaraca zapisuje u tablicu.



Slika 6. Spojeni uzorak na dužini od 13 mm pri određenom broju udaraca [2]

7) Uzme se uzorak, koristeći laboratorijsku žicu, od jednog kraja posude do drugog. Uzeti uzorak mora sadržavati tlo s obje strane brazde gdje je tlo došlo u kontakt. Stavi se u posudicu, važe, masa upisuje u tablicu i stavlja u sušionik na sušenje najmanje 16h.

8) Cijeli uzorak tla ponovo se promiješa i doda mala količina destilirane vode da bi se povećala vlažnost.

9) Postupak se ponavlja više puta tako da se kod svakog ispitivanja dobije manji broj udaraca. Jedno ispitivanje mora biti u razmaku od 25-30 udaraca, drugu 20-30, treće 15-20 udaraca. [2]

### 2.3.2. Granica plastičnosti

Granica plastičnosti predstavlja onaj sadržaj vode kod kojeg sitnozrnata tla prelaze iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje. Za određivanje granice plastičnosti nije potrebna aparatura. Kod određivanja granice plastičnosti od uzorka tla se oblikuje valjčić i rola sve dok se ne dobije valjčić promjera 3 mm. Kada se dosegne promjer od 3 mm, na valjčiću moraju biti vidljive dijagonalne pukotine. U slučaju da pukotina na valjčiću nema, postupak rolanja se ponavlja.

Tijek određivanja:

- 1) Izvažu se prazne posudice sa poklopcima i unese njihova masa i broj u tablicu.
- 2) Uzorak tla se pomiješa sa destiliranom vodom tako da se tlo može rotati u valjčice.
- 3) Tlo se oblikuje u valjčić i rola se dlanovima. Koristi se određeni pritisak sa 90 poteza u minuti da se dobije valjčić ujednačenog promjera. Valjčić mora biti promjera 3 mm za što su potrebne oko dvije minute (slika 7).
- 4) Kada se dosegne odgovarajući promjer na valjčiću moraju biti vidljive dijagonalne pukotine. U slučaju da pojave pukotina na valjčiću nema, postupak rolanja se ponavlja.
- 5) Valjčići se stave u posudu i stavljaju se u sušionik.
- 6) Postupak se ponavlja barem još jednom ili više puta. [2]



Slika 7. Valjčići za utvrđivanje granice plastičnosti [2]

### 3. POSMIČNA ČVRSTOĆA

Posmična čvrstoća je kombinacija kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Kohezija ( $c$ ) je posljedica veze između čestica; značajna je u glinama, dok je nema u čistim pijescima i šljuncima. *Kut unutarnjeg trenja* ( $\varphi$ ) je posljedica trenja među česticama; viši je u šljuncima i pijescima nego u glinama i prahu. [7]

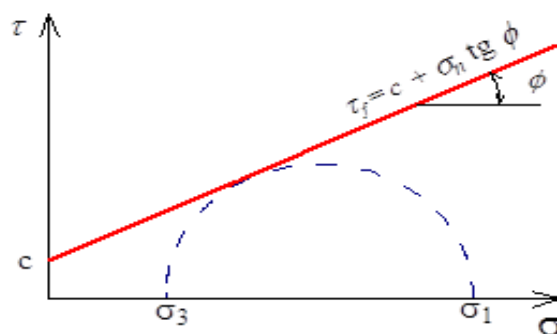
Pod pojmom čvrstoća u području geotehnike općenito se podrazumijeva posmična čvrstoća zbog toga što do slučaja sloma tla kod građevina izgrađenih od zemljanih materijala, te ostalih objekata temeljenih na tlu, dolazi prekoračenjem posmične čvrstoće tla. Posmična čvrstoća je vrijednost posmičnog naprezanja, pri lomu, duž klizne površine unutar mase tla.

Dovoljno dobar opis ponašanja tla pruža *Coulomb-ov zakon čvrstoće* koji u totalnim naprezanjima ima sljedeći oblik:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

gdje je:

- $\tau_f$  posmična čvrstoća u trenutku sloma
- $\sigma_n$  totalno normalno naprezanje na plohi sloma
- $c$  kohezija određena za totalna naprezanja
- $\varphi$  kut unutarnjeg trenja određen za totalna naprezanja



Slika 8. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće [8]

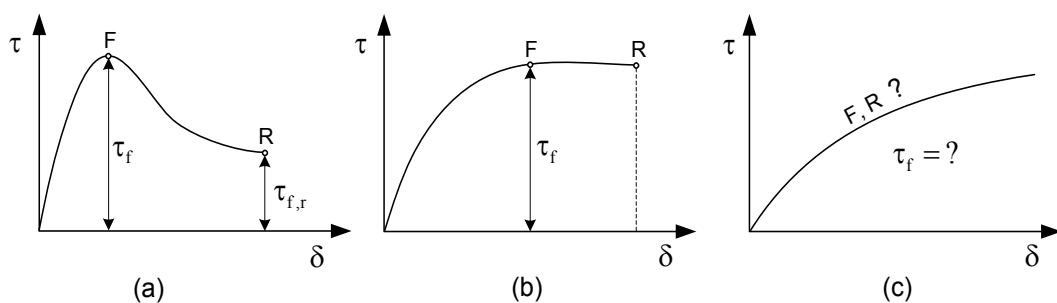
Do sloma u tlu dolazi kada Mohr-ova kružnica naprezanja dodirne anvelopu sloma opisanu gore prikazanom jednadžbom kao što je grafički prikazano na Slici 8. Uobičajeno se Coulomb-ov zakon čvrstoće naziva još i Mohr – Coulombov zakon posmične čvrstoće.

Anvelopa sloma određena je s dva spomenuta parametra čvrstoće koje nazivamo *kohezija* ( $c$ ) i *kut unutarnjeg trenja* ( $\varphi$ ). Oni nisu konstante materijala, već ovise o nizu čimbenika: vrsti materijala, stanju materijala, stupnju konsolidacije, vlažnosti i relativnom porozitetu, veličini naprezanja te o načinu i brzini nanošenja opterećenja.

*Tangens kuta unutarnjeg trenja* je gradijent anvelope sloma. Kut unutarnjeg trenja je parametar koji je karakterističan za sve materijale tla, manji za sitnozrnate, a veći za krupnozrnate.

*Kohezija* je otpor tla na smicanje kada su normalna naprezanja jednaka nuli, karakteristična je za sitnozrnata tla, dok je za krupnozrnata tla jednaka nuli. Svojstvo je sitnozrnatih tla koja zbog toga nazivamo koherentnim. Kako se smanjuje veličina čestica tla, tako se povećava njihov broj u jedinici volumena pri jednakom koeficijentu pora. Dakle što su čestice manje, bit će dominantnije i djelovanje Van der Waalsovih i električnih privlačnih sila s obzirom na gravitacijske sile među česticama. Zbog ukupnog učinka opisanih utjecaja nastaju u aglomeracijama jako sitnih čestica s malim međusobnim razmakom sile, koje izazivaju otpore trenja na kontaktima čestica. Uvjetuje čvrstoću tla i kao takva nije konstantna, već ovisi o vlažnosti.

Oblici zavisnosti relativne posmične deformacije  $\delta$  u funkciji posmičnih naprezanja  $\tau$  prikazani su na Slici 9, gdje se vide tri različita mehanizma sloma:



Slika 9. Ponašanje tla pri smicanju [9]



Maksimalna vrijednost naprezanja je *vršna čvrstoća* (točka F), a rezidualna čvrstoća (točka R) ili čvrstoća pri velikim deformacijama, dostiže se uz opadanje čvrstoće od točke F do točke R i ostaje konstantna nakon dostizanja određene veličine deformacija i pri daljnjim deformacijama. Ovakav mehanizam sloma karakterističan je za dobro zbijena tla (Slika 9.a.).

Ukoliko porastom deformacija posmično naprezanje dosegne maksimalnu vrijednost  $\tau_f$ , a zatim sa daljnjim deformacijama ovo naprezanje ostaje konstantno  $\tau_f = \tau_{f,r}$ , radi se o plastičnom slomu (Slika 9.b). Ovakav mehanizam sloma karakterističan je za rastresita tla.

U nekim okolnostima tlo može pokazivati i žilavo ponašanje (Slika 9.c.) gdje se porastom posmične deformacije povećava posmično naprezanje, te se ne dostiže karakteristična maksimalna vrijednost u ispitanom intervalu deformacija.

### 3.1. Određivanje posmične čvrstoće tla

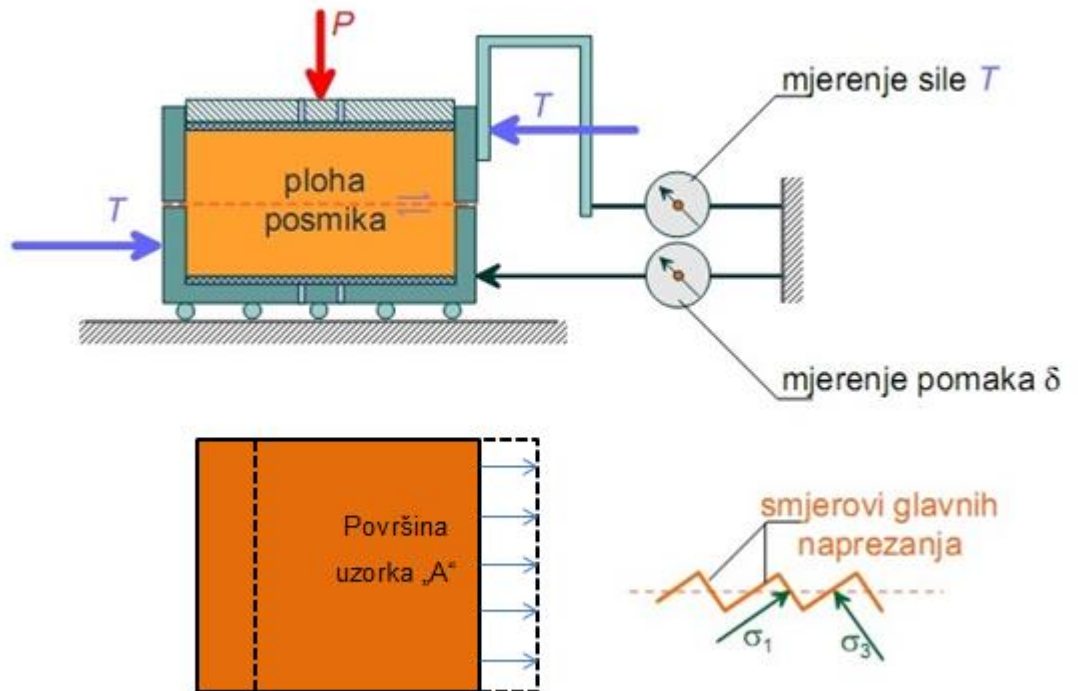
Posmična čvrstoća može se odrediti u laboratoriju i na terenu. Najčešće korišteni uređaj za ispitivanje posmične čvrstoće u laboratoriju je uređaj za *izravni posmik*. Osim tog uređaja koristi se i triaksijalni uređaj koji je složeniji za rukovanje, ali ima znatno bolje mogućnosti od uređaja za izravni posmik. Tako na primjer, u uređaju za izravni posmik nije moguće mjeriti porni tlak pa nije moguće razlikovati totalna i efektivna naprezanja; geometrija uređaja nameće plohu smicanja tj. zonu smicanja; kutija u kojoj se smiče uzorak ima trenje između okvira koje utječe na konačne parametre tla. Unatoč tim nedostacima, uređaj za izravan posmik daje zadovoljavajuće rezultate za potrebe projektiranja.

Osnovni princip pokusa izravnog posmika je sljedeći:

- Uzorak se optereti normalnim naprezanjem nanošenjem vertikalne sile.
- Horizontalnom silom izazivaju se posmična naprezanja po sredini uzorka.

Uređaj za izravni posmik (*direct shear apparatus*) shematski je prikazan na Slici 10. Jednostavan je i često korišten laboratorijski uređaj koji se sastoji se od dvodijelne ćelije kvadratnog presjeka razdijeljene horizontalno u koju se ugrađuje uzorak između poroznih pločica. Poklopac tijesno klizi u gornji dio kutije i preko njega se nanosi vertikalno opterećenje. Uređaj je prikazan na slici 10. Jednostavan je i često korišten laboratorijski uređaj koji se sastoji se od dvodijelne ćelije kvadratnog presjeka razdijeljene horizontalno u koju se ugrađuje uzorak između poroznih pločica. Poklopac tijesno klizi u gornji dio kutije i preko njega se nanosi vertikalno opterećenje.

presjek uređaja za izravni posmik



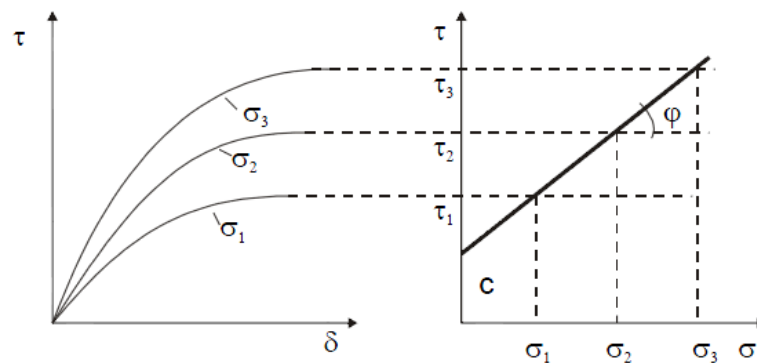
Slika 10. Presjek uređaja za izravni posmik [3]

Pokus se odvija u dvije faze:

- konsolidacija (traje sve dok se ne završi primarna konsolidacija uzorka)
- smicanje (počinje nakon završetka faze konsolidacije, a vrši se tako da se gornji i donji dio ćelije pomiču horizontalno jedan u odnosu na drugi, unaprijed definiranom brzinom smicanja)

Prije početka pokusa uzorci se konsolidiraju 24 sata, a veličine vertikalnog opterećenja biraju se tako da se dobiju rezultati u području napona koji su bitni za konkretan slučaj.

S promjenom normalnog napreznja mijenja se i razvoj posmičnih napreznja pri smicanju. Uobičajeno je da se iz jednog materijala izvedu tri ispitivanja pod tri različita vertikalna opterećenja (svako sljedeće je dvostruko veće od prethodnog) kako bismo mogli pouzdano odrediti parametre posmične čvrstoće tla (Slika 11). Tipično vertikalno opterećenje je 50, 100, 200 i 400 kPa.



Slika 11. Prikaz rezultata pokusa izravnog posmika [9]

Postoji dvije osnovne vrste uređaja za izravni posmik. To su uređaj sa stalnim prirastom deformacije tj. sa konstantnom brzinom smicanja i uređaj sa stalnim prirastom sile (koji se više ne koristi). Obzirom na to postoje i različiti kriteriji sloma, tj. kriteriji za određivanje posmične čvrstoće. Kod oba uređaja uzorak se prethodno konsolidira pod određenim vertikalnim napreznjem, a koje ovisi o potrebi konkretnog zadatka.

Rezultati mjerenja prikazuju se kao relacija između ostvarenog posmičnog napreznja i odgovarajućeg pomaka između dva dijela ćelije. Posmično i normalno napreznje u plohi na spoju dijelova ćelije su  $\tau = T/A$  i  $\sigma = N/A$ , gdje je  $A$  površina uzorka u ravnini dodira dviju dijelova ćelije,  $T$  horizontalna sila, a  $N$  vertikalna sila.

Rezultati pokusa izravnog posmika iskazuju se u totalnim napreznjima koja su jednaka efektivnim kod pokusa s dovoljno sporom deformacijom, te prethodnom konsolidacijom i obostranim dreniranjem uzoraka.

Najzanimljivije su granične vrijednosti posmičnog naprezanja:

- *vršna čvrstoća tla* kao najveća vrijednost posmičnog naprezanja kada nas zanimaju relativno male deformacije
- *rezidualna čvrstoća tla* kao naprezanje koje odgovara velikim deformacijama



Slika 12. Uzorak nakon ispitivanja [2]

Razlikujemo pokuse po načinu dreniranja:

- 1) DRENIRANI ili SPORI - postupak sa dreniranjem u obje faze pokusa za određivanje vršne čvrstoće tla za efektivne napone.
- 2) NEDRENIRANI ili BRZI - postupak bez dreniranja u obje faze pokusa. Služi za mjerenje nedrenirane čvrstoće koja se izražava preko totalnih naprezanja.
- 3) POVRATNI ili REVERSNI - pokus smicanja za određivanje rezidualne posmične čvrstoće za efektivne napone.

### 3.1.1. Drenirani ili CD pokus izravnog posmika

Prva faza pokusa sastoji se od konsolidacije uzorka normalnim opterećenjem. U drugoj fazi se postepeno i relativno polako povećava posmični napon do loma. Da bi se sa dovoljnom tačnošću za praktične potrebe ostvarilo da totalni naponi budu jednaki efektivnim naponima, brzina pomaka određuje se tako da se lom uzorka dostiže nakon nekog vremena. Potrebno vrijeme do loma određuje se na osnovi rezultata mjerenja slijeganja uzorka u procesu konsolidacije. Brzina posmika je tako mala da ne dolazi do povećanja pornog tlaka u uzorku tijekom ispitivanja.

Brzina posmika određuje se prema izrazu:

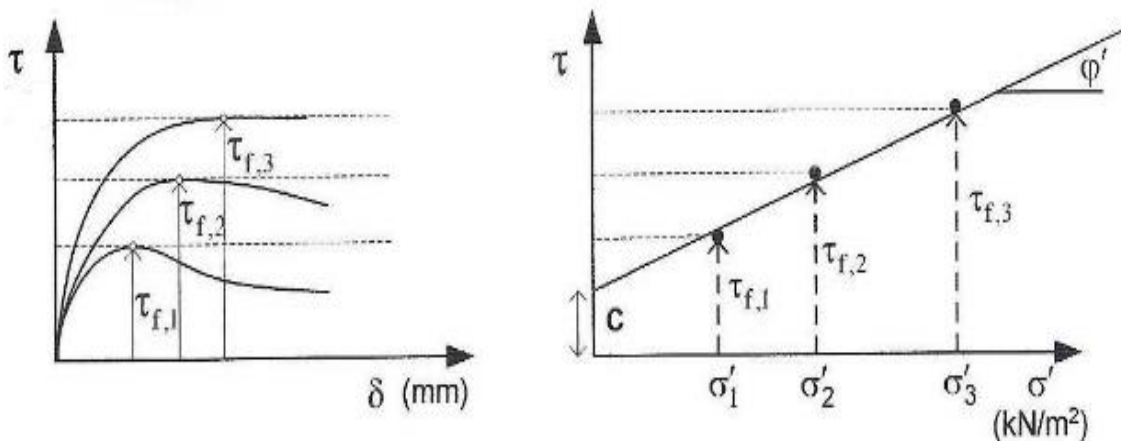
$$v = \frac{\delta_f}{t_f}$$

gdje je:

$\delta_f$  = horizontalna deformacija do sloma

$t_f$  = vrijeme do sloma

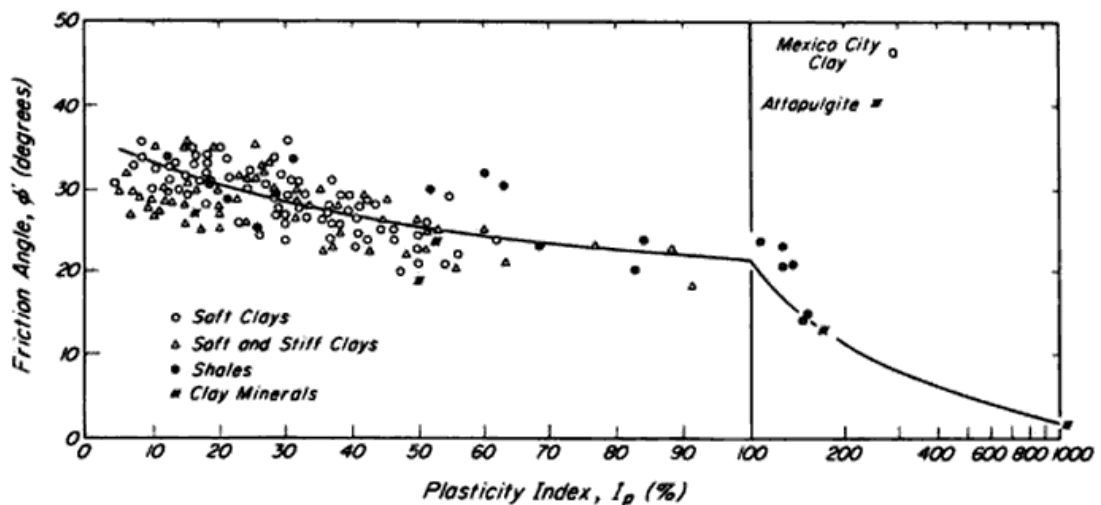
Vršna drenirana posmična čvrstoća ( $\text{kN/m}^2$ ) pri smicanju može se opisati linearnom anvelopom napona loma u funkciji normalnog napona koji je od praktičnog interesa (Slika 13).



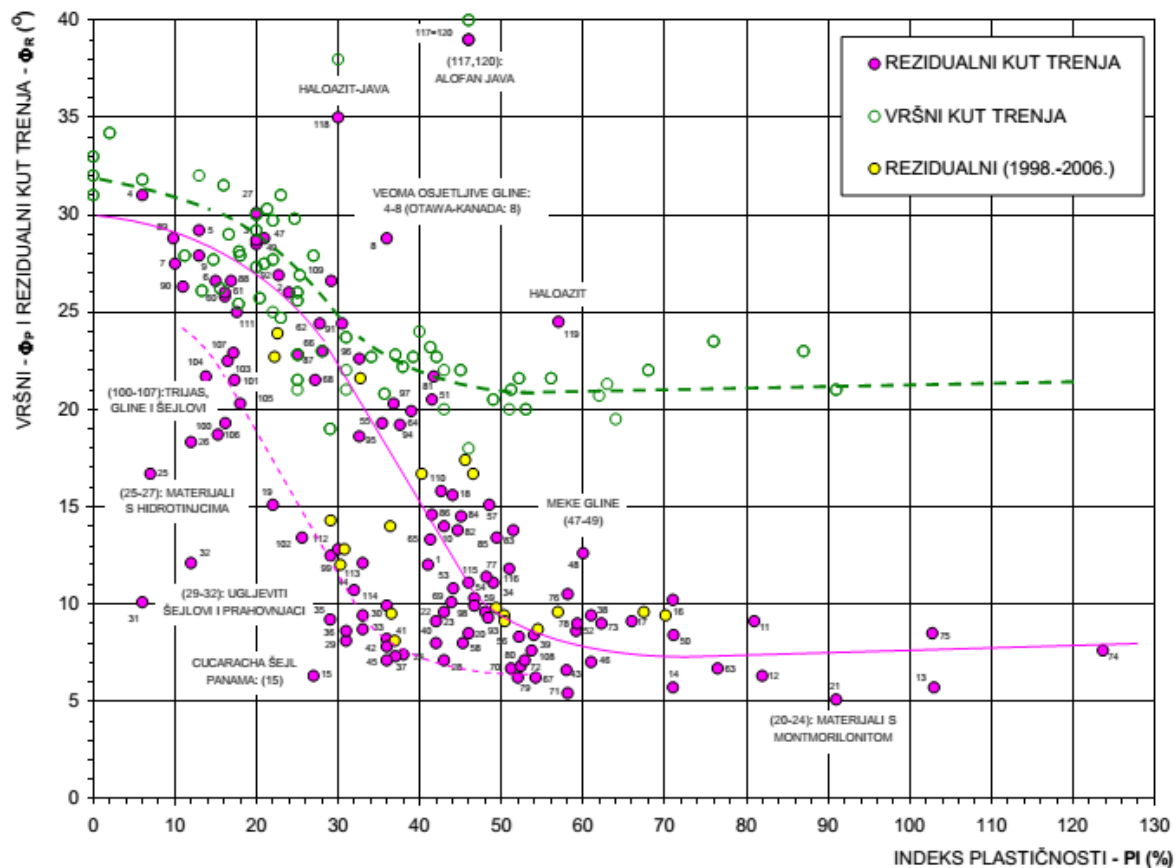
Slika 13. Pomaci i naponi kod pokusa direktnog smicanja [5]

## 4. KORELACIJSKA ANALIZA ZAVISNOSTI DRENIRANOG KUTA UNUTRAŠNJEG TRENJA O INDEKSU PLASTIČNOSTI

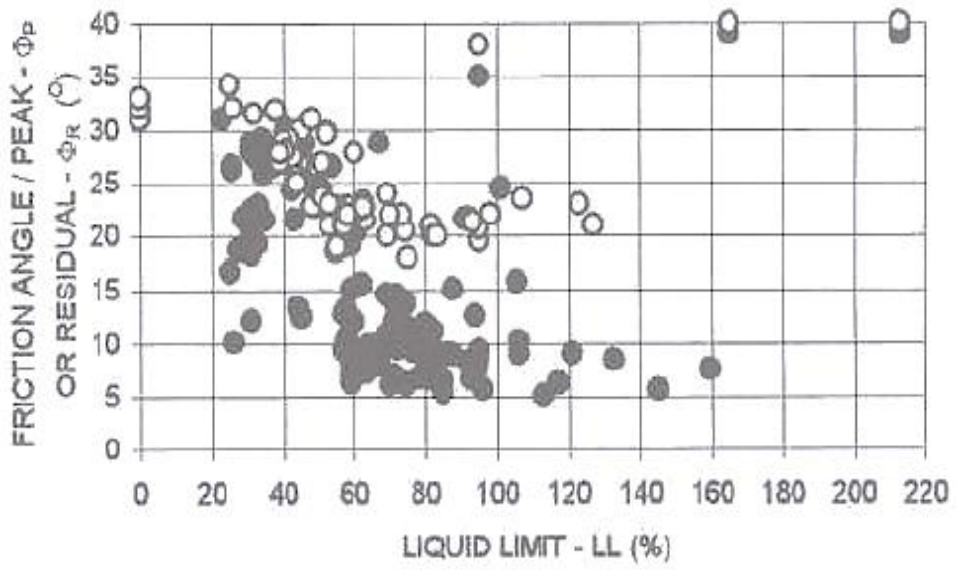
Do sada je u svijetu objavljeno nekoliko radova raznih autora koji su se bavili proučavanjem odnosa između indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja koherentnog materijala. Prvi je povezanost prikazao Karl von Terzaghi u svom radu *Soil Mechanics in Engineering Practice* iz 1948. godine (Slika 14). Kao drugi primjer, navodi se istraživanje koje su proveli Ortolan i Mihalinec objavljeno 1998. godine. Najveće vrijednosti indeksa plastičnosti, ali i granice tečenja, odgovarale su najmanjim očekivanim, i praktično potvrđenim, vrijednostima kuta unutrašnjeg trenja. Njihov rad rezultirao je dijagramom zavisnosti vršnog i rezidualnog kuta unutrašnjeg trenja o vrijednosti indeksa plastičnosti (Slika 15), odnosno granici tečenja (Slika 16), kao i dijagramom zavisnosti indeksa plastičnosti i granice tečenja (Slika 17).



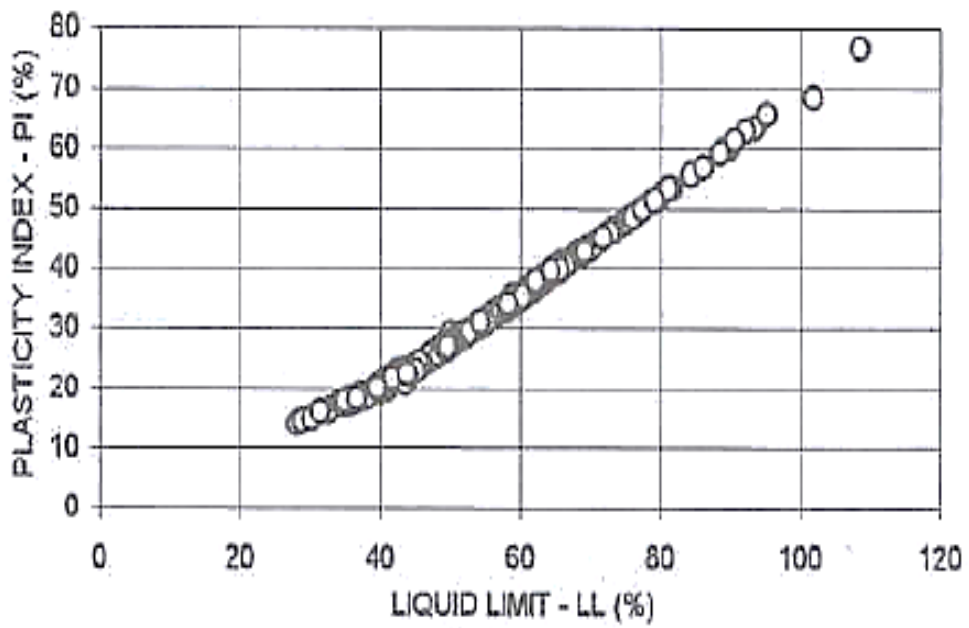
Slika 14. Terzaghijev dijagram zavisnosti  $I_p$  i  $\phi$  [10]



Slika 15. Dijagram zavisnosti  $I_p$  i  $\phi$  (Ortolan i Mihalinec) [11]



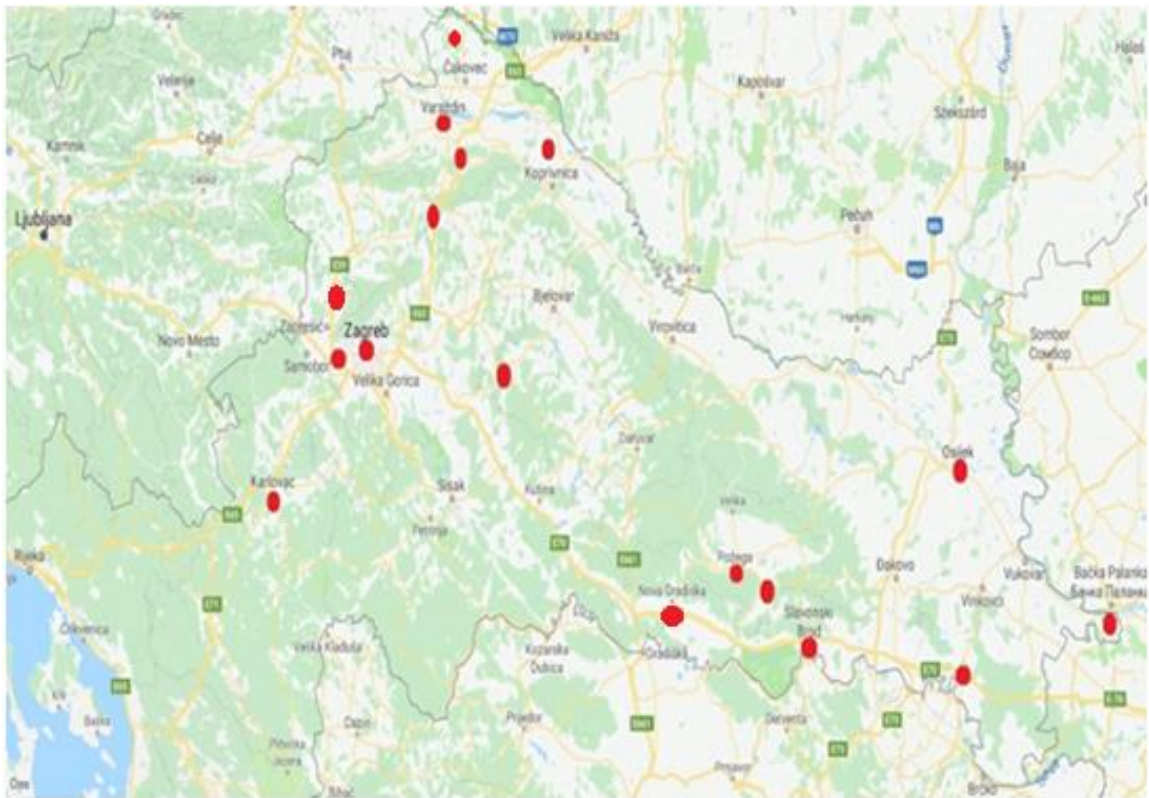
Slika 16. Dijagram zavisnosti kuta unutrašnjeg trenja i granice tečenja [11]



Slika 17. Dijagram zavisnosti indeksa plastičnosti i granice tečenja [11]



U ovom dijelu rada analizirat će se zavisnost vršnog kuta unutrašnjeg trenja i indeksa plastičnosti koristeći podatke dobivene ispitivanjem **197 uzoraka** glinovitog tla s više lokacija u Republici Hrvatskoj, a koje je proveo Geotehnički laboratorij Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u periodu od siječnja 2007. do lipnja 2010. godine. Sva ispitivanja provedena su u uređaju za izravni posmik s kontroliranom deformacijom, a za potrebe ovog rada prikazat će se zavisnost ove dvije varijable na **30 odabranih** uzoraka, kao i usporedba sa zavisnošću na **10 uzoraka** (radi postizanja maksimalnog koeficijenta determinacije). Također, za dobivanje najrealnijeg modela korelacije, svih 197 uzoraka bit će podijeljeno u 14 razreda gdje svaki obuhvaća jednaki interval indeksa plastičnosti, dok su pripadne vrijednosti  $\phi$  jednake aritmetičkoj sredini za pojedini razred.



Slika 18. Prikaz lokacija uzoraka u panonskoj zoni RH



Slika 19. Prikaz lokacija uzoraka u dubrovačkom području

Na slici 18 istaknute su lokacije s kojih su izvađeni uzorci u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske. Najveći dio ispitanih uzoraka pripada upravo ovom području. Radi se o lokacijama u široj zagrebačkoj (Zagreb, Horvati, Dedići, Dumovec, Sveta Nedelja, Planina Gornja, Dugo Selo, Donja Bistra) i varaždinskoj zoni (Varaždinske Toplice, Kneginec, Bisag, Vučkovec, Sveti Martin). Ostale lokacije obuhvaćaju područje Osijeka, Županje, Iloka, Čazme, Slavenskog Broda (Slobodnica), Nove Gradiške, Požege, Pleternice, Piškornice i Karlovca.

Nešto manji broj uzoraka izvađen je u širem dubrovačkom području (Stara Mokošica, Obod-Cavtat, Lopud, Slano, Buići - Župa Dubrovačka, Komolac, Dubrovnik). Navedene lokacije istaknute su na slici 19.

Za prvu analizu (30 uzoraka) uzorci su odabrani tako da pokrivaju širok raspon vrijednosti indeksa plastičnosti (15% do 50%) što je obuhvaćalo materijale klasificirane kao anorganske gline niske plastičnosti (CL) do anorganske gline visoke plastičnosti (CH) s različitim sadržajem pijeska (Tablica 6).

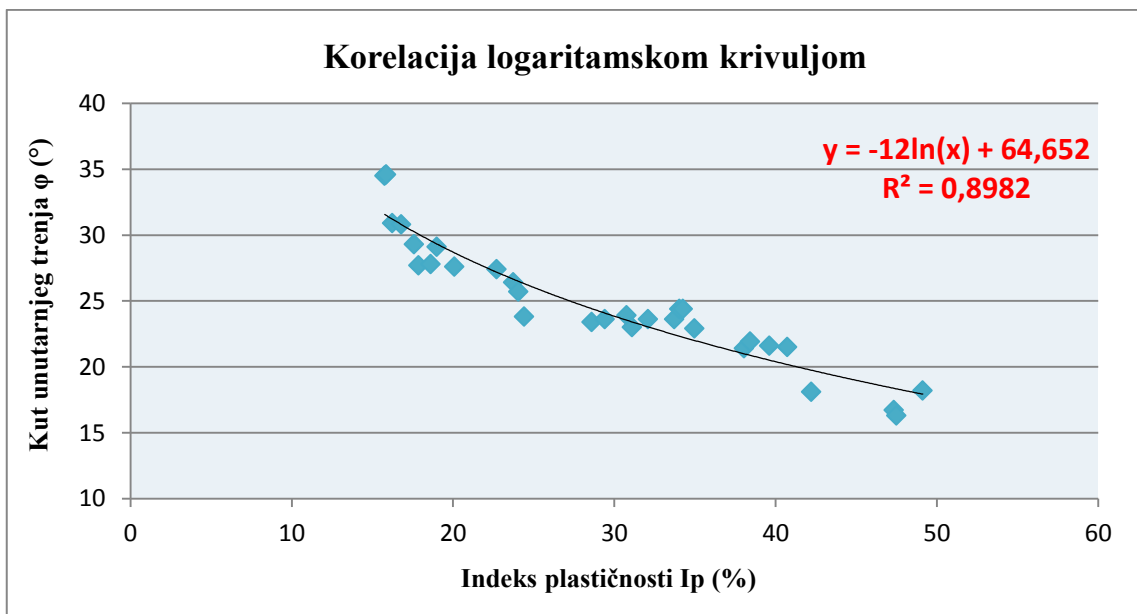
Tablica 6. Vrijednosti vršnog kuta unutarnjeg trenja i indeksa plastičnosti  
(GFV, 2007. - 2010.)

Uzorak	Red. br.	Dubina [m]	$I_p$ [%]	$\varphi$ [°]	USCS
1	221	3,00	<b>15,76</b>	<b>34,5</b>	CL pjeskovita
2	135	11,00	<b>15,85</b>	<b>34,6</b>	CL
3	158	1,50	<b>16,23</b>	<b>30,9</b>	CL
4	13	1,70	<b>16,78</b>	<b>30,8</b>	CL
5	8	4,00	<b>17,58</b>	<b>29,3</b>	CL s pijeskom
6	86	0,50	<b>17,85</b>	<b>27,7</b>	CL
7	65	9,00	<b>18,61</b>	<b>27,8</b>	CL s pijeskom
8	80	1,30	<b>18,98</b>	<b>29,1</b>	CL s pijeskom
9	225	4,00	<b>20,07</b>	<b>27,6</b>	CL s pijeskom
10	229	2,30	<b>22,70</b>	<b>27,4</b>	CL
11	16	2,00	<b>23,74</b>	<b>26,4</b>	CL s pijeskom
12	226	4,00	<b>24,05</b>	<b>25,7</b>	CL s pijeskom
13	230	5,00	<b>24,40</b>	<b>23,8</b>	CL
14	118	4,00	<b>28,59</b>	<b>23,4</b>	CH
15	12	2,20	<b>29,40</b>	<b>23,6</b>	CH s pijeskom
16	81	2,70	<b>30,76</b>	<b>23,9</b>	CH
17	185	1,50	<b>31,09</b>	<b>23,0</b>	CH
18	19	2,00	<b>32,09</b>	<b>23,6</b>	CH
19	102	1,00	<b>33,71</b>	<b>23,6</b>	CH s pijeskom
20	76	1,80	<b>34,04</b>	<b>24,4</b>	CH
21	156	4,00	<b>34,26</b>	<b>24,4</b>	CH s pijeskom
22	22	3,00	<b>34,96</b>	<b>22,9</b>	CH pjeskovita
23	82	5,70	<b>38,04</b>	<b>21,4</b>	CH
24	34	2,00	<b>38,42</b>	<b>21,9</b>	CH
25	231	5,00	<b>39,61</b>	<b>21,6</b>	CH
26	53	2,00	<b>40,72</b>	<b>21,5</b>	CH
27	7	2,00	<b>42,21</b>	<b>18,1</b>	CH
28	197	4,30	<b>47,34</b>	<b>16,7</b>	CH
29	218	3,20	<b>47,48</b>	<b>16,3</b>	CH
30	183	3,70	<b>49,12</b>	<b>18,2</b>	CH

Rezultati ispitivanja provedeni u okviru ovog završnog rada statistički su obrađivani u programskom alatu Microsoft Excel-u, s namjerom da se pronade čvrsta korelacijska zavisnost između indeksa plastičnosti i vršnog kuta unutrašnjeg trenja. Iz Tablice 6 vidljivo je da „u pravilu“ kut unutrašnjeg trenja *pada* za pripadne, po veličini poredane, vrijednosti indeksa plastičnosti od manjeg ka većem. Korelacija je, dakle, jaka (što ćemo dokazati) i negativna, odnosno porastom vrijednosti  $x$  (indeks plastičnosti), vrijednost  $y$  (kut unutrašnjeg trenja) se u prosjeku smanjuje. Ipak, na ispitanih 30 uzoraka postoje određene iznimke odnosno odstupanja zbog kojih se i provodi ova statistička analiza. Za primjer uočimo da uzorak 8 ima veći kut unutrašnjeg trenja od uzorka 9, iako mu je indeks plastičnosti manji, a radi se o istoj vrsti koherentnog tla prema klasifikaciji. Takvih odstupanja nema mnogo i u globalu se može reći da vrijednosti  $I_p$  i  $\varphi$  prate definiciju negativne korelacije. Točnije, i da znatno povećamo broj uzoraka, povećali bi i broj odstupanja, ali ona bi po veličini uvijek bila dovoljno mala da se korelacija ove dvije varijable smatra *jakom*.

Najbolji rezultati zavisnosti postignuti su primjenom korelacije *logaritamskog* (Slika 20) i *eksponencijalnog tipa* (Slika 21). Logaritamski vezu možemo izraziti kao:

$$y = -12\ln(x) + 64,652$$

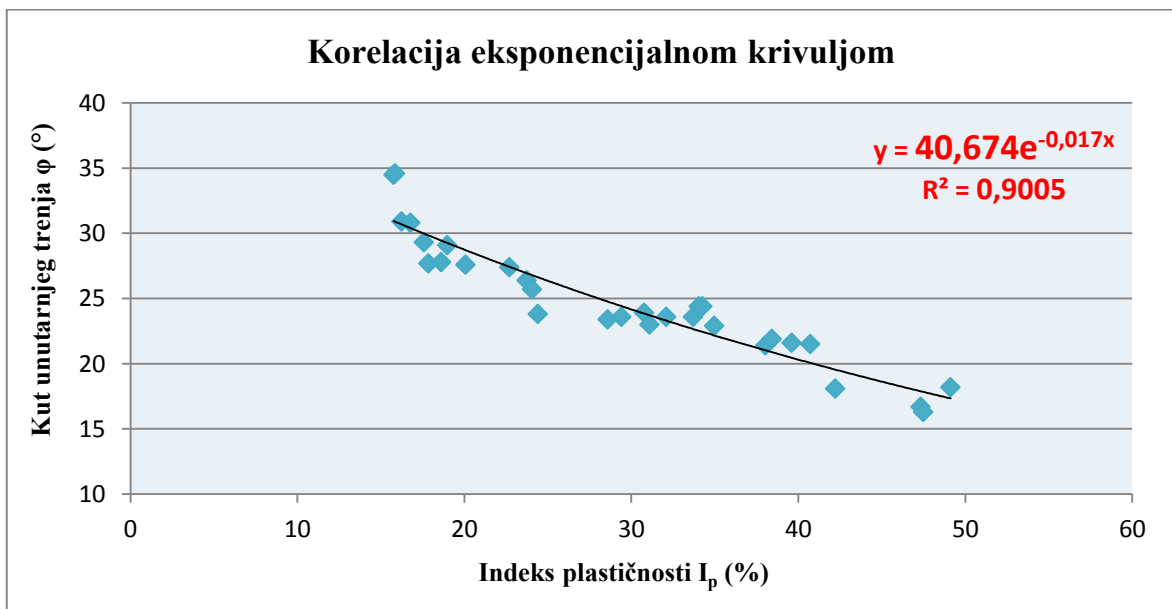


Slika 20. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\varphi$  (logaritamska krivulja)

Pri ovoj analizi postignut je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,8982$ . Dobiveni rezultat potvrđuje jaku korelaciju (povezanost) ove dvije varijable. Dijagram disperzije aproksimiran je *logaritamskom* krivuljom regresije iz koje je vidljivo da nema većih odstupanja za 30 uzoraka i da točke dobro prate krivulju.

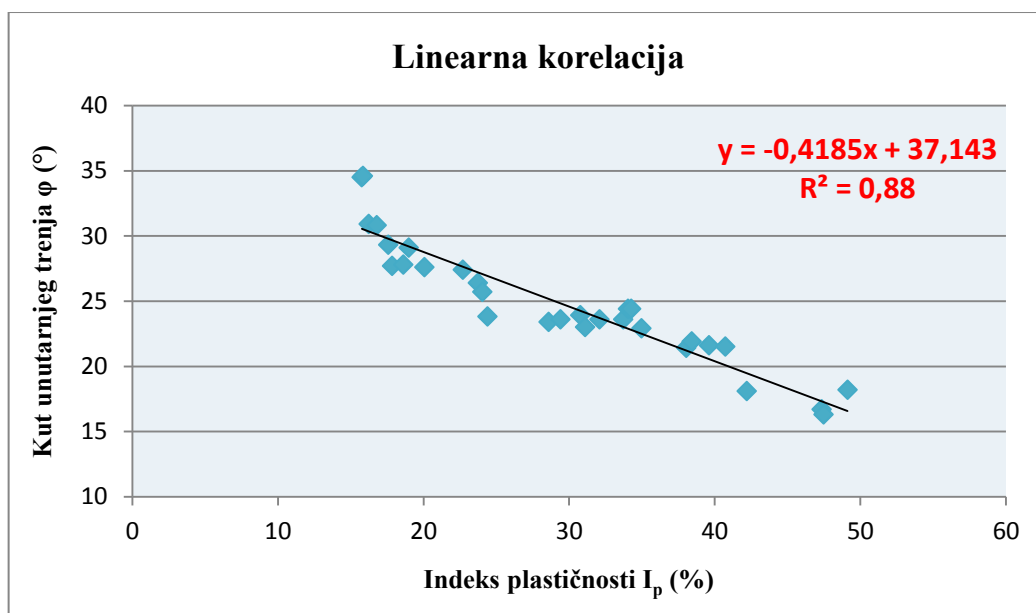
Ukoliko točke aproksimiramo *eksponencijalnom* krivuljom (Slika 21) koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9005$ . Ta vrijednost gotovo da se poklapa sa onom dobivenom logaritamskom krivuljom pa možemo zaključiti kako 90 % promjene statističkog obilježja  $y$  (kut unutrašnjeg trenja) ovisi o promjeni statističkog obilježja  $x$  (indeksa plastičnosti) za ispitanih 30 uzoraka. Eksponencijalno vezu možemo izraziti kao:

$$y = 40,674e^{-0,017x}$$

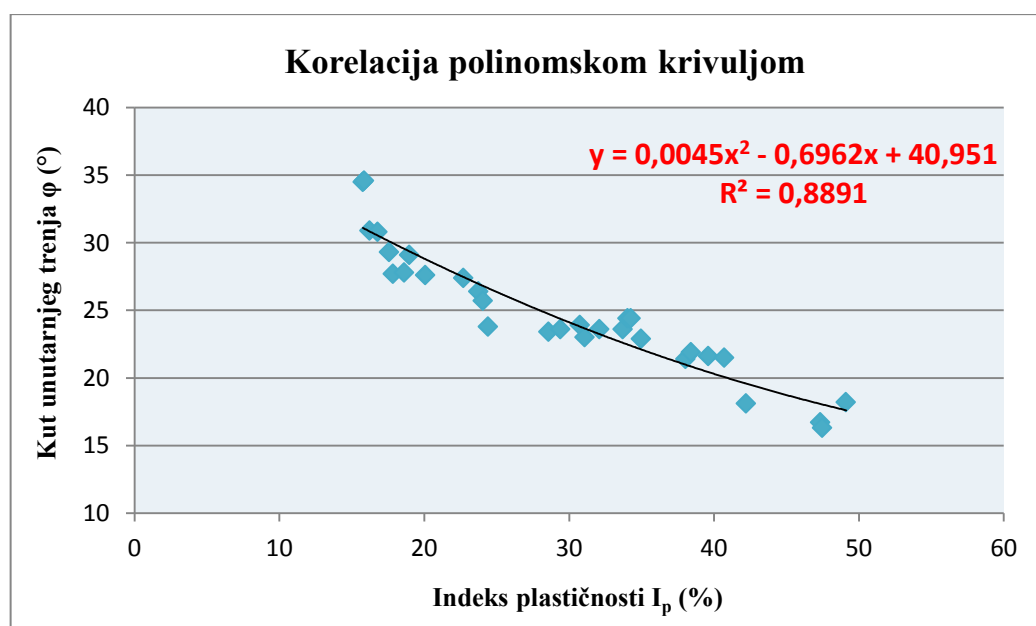


Slika 21. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\varphi$  (eksponencijalna krivulja)

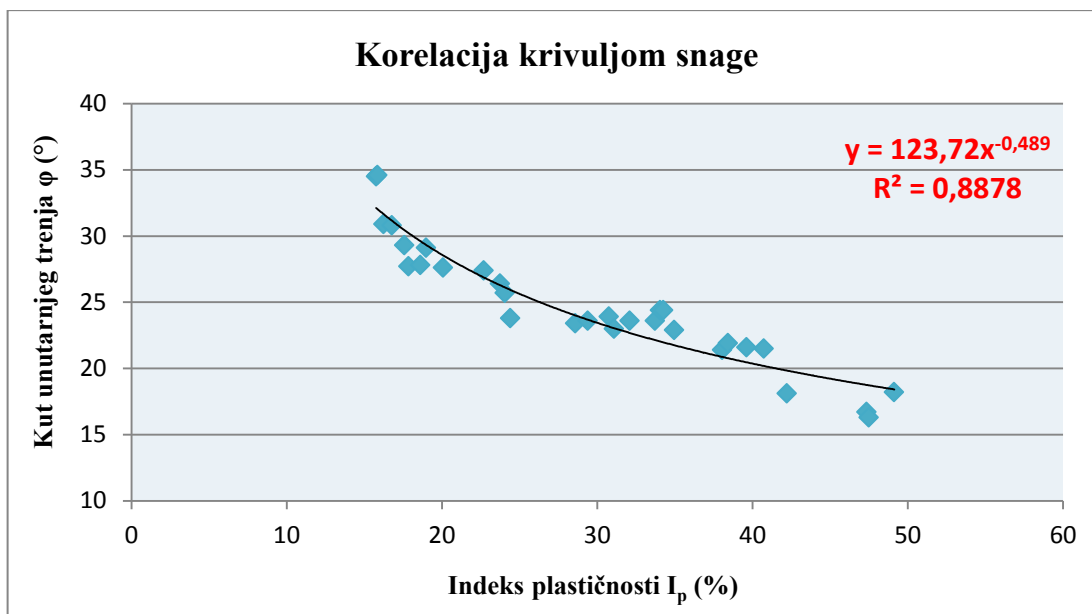
Iako su ove dvije krivulje **u ovom slučaju** najprikladnije za prikaz (jer daju najbolje rezultate  $R^2$ ), za usporedbu i eksperiment ćemo prikazati i dijagrame aproksimirane pravcem (Slika 22), polinomskom krivuljom (Slika 23), kao i krivuljom snage (Slika 24). Tablicom regresijskih modela lako se mogu usporediti pripadni koeficijenti determinacije za ispitane uzorke. Uočavamo da se kreću između 0,88 i 0,9005 (Tablica 7).



Slika 22. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (linearna korelacija)



Slika 23. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (polinomska krivulja)



Slika 24. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\varphi$  (krivulja snage)

Tablica 7. Vrijednosti regresijskih modela za 30 ispitanih uzoraka

MODEL REGRESIJE	PRIPADNA JEDNADŽBA	KOEFICIJENT DETERMINACIJE $R^2$
Nelinearan - logaritamski	$y = -12\ln(x) + 64,652$	0,8982
Nelinearan - eksponencijalni	$y = 40,674e^{-0,017x}$	0,9005
Linearan	$y = -0,4185x + 37,143$	0,8800
Nelinearan - polinomni	$y = 0,0045x^2 - 0,6962x + 40,951$	0,8891
Nelinearan - snaga	$y = 123,72x^{-0,489}$	0,8878

Za sve prikazane dijagrame, kao mjera povezanosti korišten je *koeficijent determinacije* ( $R^2$ ) jer je jedini pokazatelj koji vrijedi za svaki tip korelacije, linearan i nelinearan. Karakteristika mu je da se kreće u granicama od 0 do 1. Model je reprezentativniji što je  $R^2$  bliži jedinici.

Prema Ortolanu (1996.), za dobivanje najboljeg korelacijskog modela ispitivani uzorci trebaju biti uzorkovani na što užem geološkom području, uzevši u obzir mineraloški sastav tla (karakterističan za pojedine zone), kako bi se neizbježne devijacije smanjile na prihvatljivu vrijednost. Tu se vraćamo na sliku 15, gdje su posebno istaknuta značajnija *odstupanja* (prikazane su lokacije gdje su izvađeni takvi uzorci) u dijagramu disperzije s obzirom na lokacije uzorkovanog tla u drugoj geološkoj zoni, a čije točke dobro prate krivulju regresije.

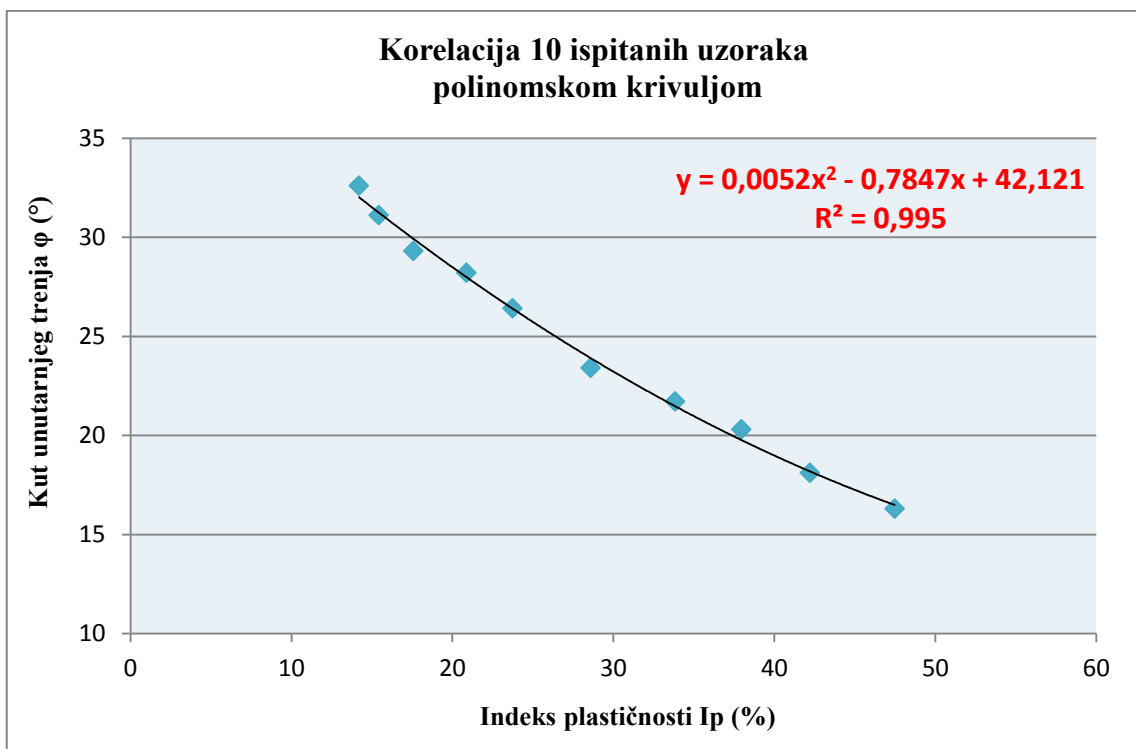
Uspoređujući rezultate ovog rada s rezultatima istraživanja navedenih autora, jaka korelacija ove dvije varijable može se dodatno potvrditi. Ukoliko od ispitanih 197 uzoraka koherentnog tla izdvojimo 10 uzoraka koji pokrivaju širok raspon indeksa plastičnosti (od 14% do 48%), uočavamo sljedeće (Tablica 8):

Tablica 8. Izdvojenih 10 uzoraka (GFV, 2007. - 2010.)

Uzorak	Red. br.	Dubina [m]	$I_p$ [%]	$\varphi$ [°]	USCS
1	139	1,50	<b>14,20</b>	<b>32,6</b>	CL
2	109	4,50	<b>15,43</b>	<b>31,1</b>	CL
3	6	4,00	<b>17,58</b>	<b>29,3</b>	CL s pijeskom
4	135	1,50	<b>20,88</b>	<b>28,2</b>	CL
5	12	2,00	<b>23,74</b>	<b>26,4</b>	CL s pijeskom
6	99	4,00	<b>28,59</b>	<b>23,4</b>	CH
7	7	1,50	<b>33,84</b>	<b>21,7</b>	CH
8	147	2,00	<b>37,97</b>	<b>20,3</b>	CH s pijeskom
9	5	2,00	<b>42,21</b>	<b>18,1</b>	CH
10	185	3,20	<b>47,48</b>	<b>16,3</b>	CH



U ovom slučaju dobiveni koeficijent determinacije polinomskom krivuljom regresije iznosi  $R^2 = 0,995$ . Takva vrijednosti odgovarala bi gotovo potpunoj vezi. No, vrijednosti indeksa plastičnosti za dva „susjedna“ uzorka poredana po veličini  $I_p$  razlikuju se za veće cjelobrojne vrijednosti, a u obzir treba uzeti i relativno malen broj uzoraka koji su se koristili pri ovoj analizi. Zbog toga odstupanja nije ni bilo, sve vrijednosti  $\phi$  padale su kako je rastao  $I_p$ . To je rezultiralo izuzetno visokim koeficijentom determinacije koji potvrđuje jaku vezu ali s obzirom na navedene stavke ipak ne prikazuje realno stanje povezanosti (uzorci su u ovom slučaju pažljivo izabrani kako bi se eksperimentalno dobila najveća vrijednost  $R^2$ ). Dijagram disperzije i pripadna polinomska krivulja za ovih 10 uzoraka prikazani su na slici 25.

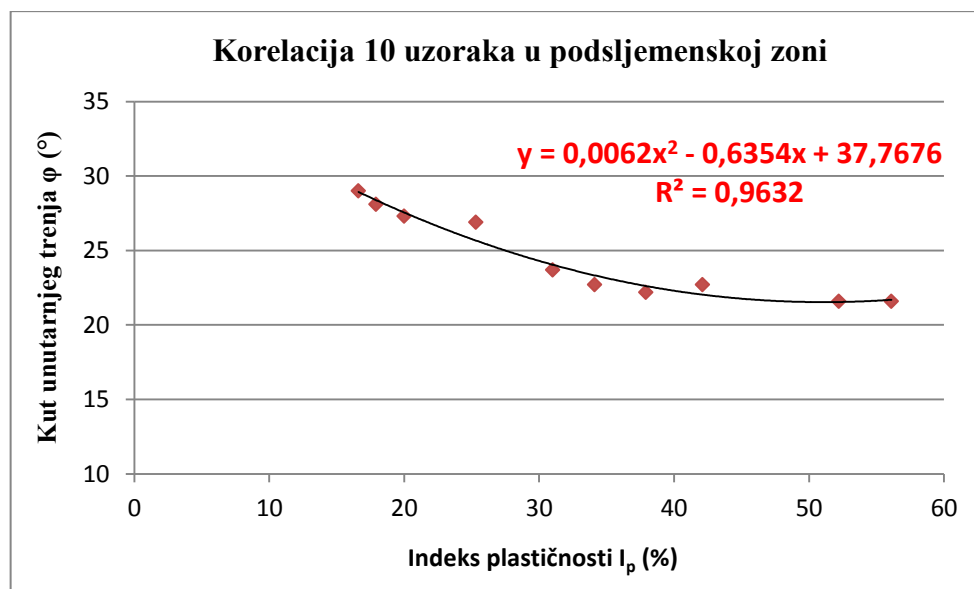


Slika 25. Korelacija 10 ispitanih uzoraka (polinomska krivulja)

U Tablici 9 izdvojeno je 10 uzoraka gline širokog raspona indeksa plastičnosti dobivenih ispitivanjima koje je proveo Ortolan sa svojim suradnicima u radu objavljenom 1998. godine. Ovi uzorci posebno su zanimljivi u kontekstu usporedbe jer su uzorkovani isključivo u području podsljemenske zone (**Medvednica**). Aproksimirat ćemo točke polinomskom krivuljom za najbolje rezultate (Slika 26). Dobiveni koeficijent determinacije iznosi  $R^2 = 0,9632$ . Vidljivo je da se kut unutarnjeg trenja za veći interval indeksa plastičnosti (od 30% pa nadalje) kreće u vrlo uskim granicama pa dolazi do manjih odstupanja ali se održava iznimno visok koeficijent determinacije.

Tablica 9. Izdvojenih 10 uzoraka gline iz podsljemenske zone [11]

UZORAK	$I_p$ [%]	$\varphi$ [°]
1	16,6	29
2	17,9	28,1
3	20	27,3
4	25,3	26,9
5	31	23,7
6	34,1	22,7
7	37,9	22,2
8	42,1	22,7
9	52,2	21,6
10	56,1	21,6



Slika 26. Korelacija uzoraka u podsljemenskoj zoni polinomskom krivuljom

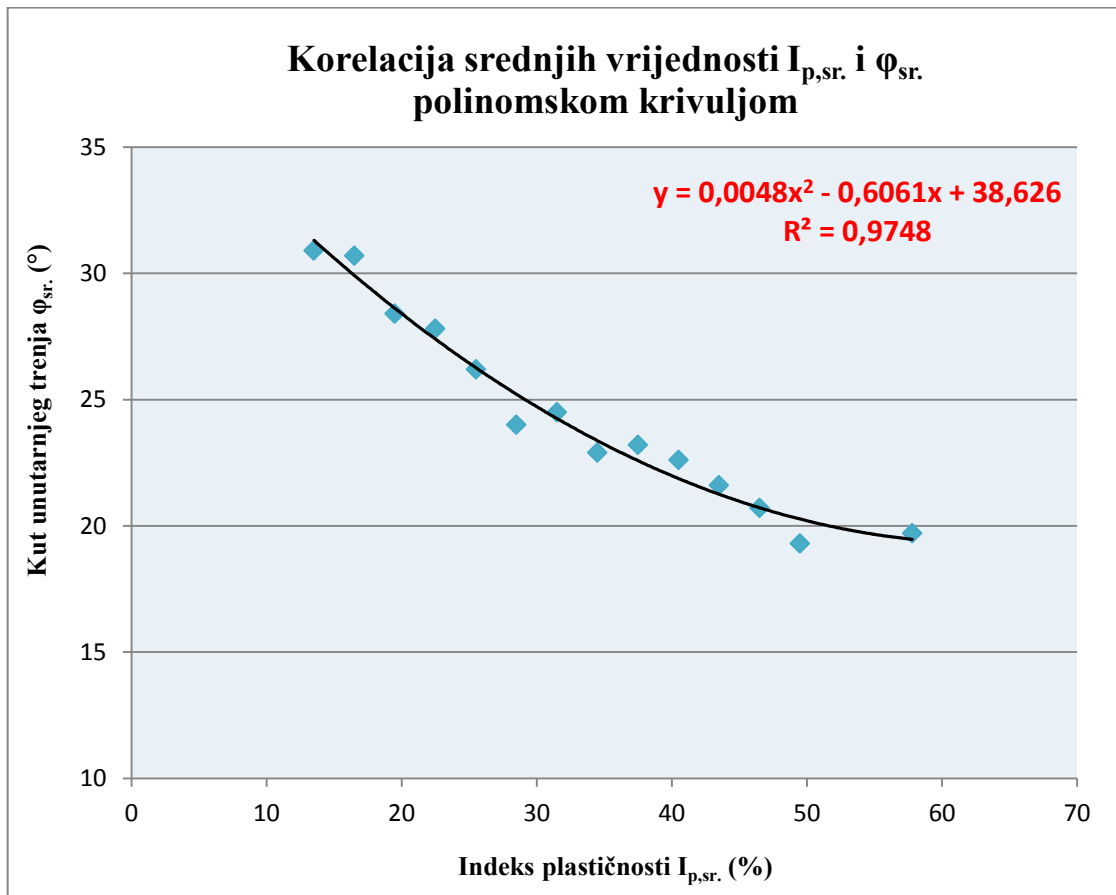
Za sve ispitane uzorke glinovitog tla u Geotehničkom laboratoriju (**197 uzoraka**) iz spomenutog razdoblja provedena je analiza distribucije vrijednosti  $I_p$  u pojedinim intervalima. Vrijednosti indeksa plastičnosti stavljene su u razrede gdje svaki obuhvaća interval od 3% počevši od 12% vrijednosti  $I_p$  (niti jedan ispitani uzorak nema  $I_p < 12\%$ ). Posljednji razred obuhvaća uzorke sa  $I_p > 51\%$  (Tablica 10).

Tablica 10. Distribucija  $I_p$  i pripadne srednje vrijednosti

<b>RAZRED</b>	<b>Broj uzoraka</b>	<b>Interval razreda <math>I_p</math> (%)</b>	<b>Sredina razreda <math>I_{p,sr.}</math> (%)</b>	<b>Srednja vrijednost <math>\phi_{sr.}</math> (°)</b>
1	7	12-15	<b>13,5</b>	<b>30,9</b>
2	19	15-18	<b>16,5</b>	<b>30,7</b>
3	30	18-21	<b>19,5</b>	<b>28,4</b>
4	22	21-24	<b>22,5</b>	<b>27,8</b>
5	23	24-27	<b>25,5</b>	<b>26,2</b>
6	20	27-30	<b>28,5</b>	<b>24,0</b>
7	19	30-33	<b>31,5</b>	<b>24,5</b>
8	19	33-36	<b>34,5</b>	<b>22,9</b>
9	8	36-39	<b>37,5</b>	<b>23,2</b>
10	16	39-42	<b>40,5</b>	<b>22,6</b>
11	4	42-45	<b>43,5</b>	<b>21,6</b>
12	4	45-48	<b>46,5</b>	<b>20,7</b>
13	3	48-51	<b>49,5</b>	<b>19,3</b>
14	3	51+	<b>57,8</b>	<b>19,7</b>
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>197</b>			

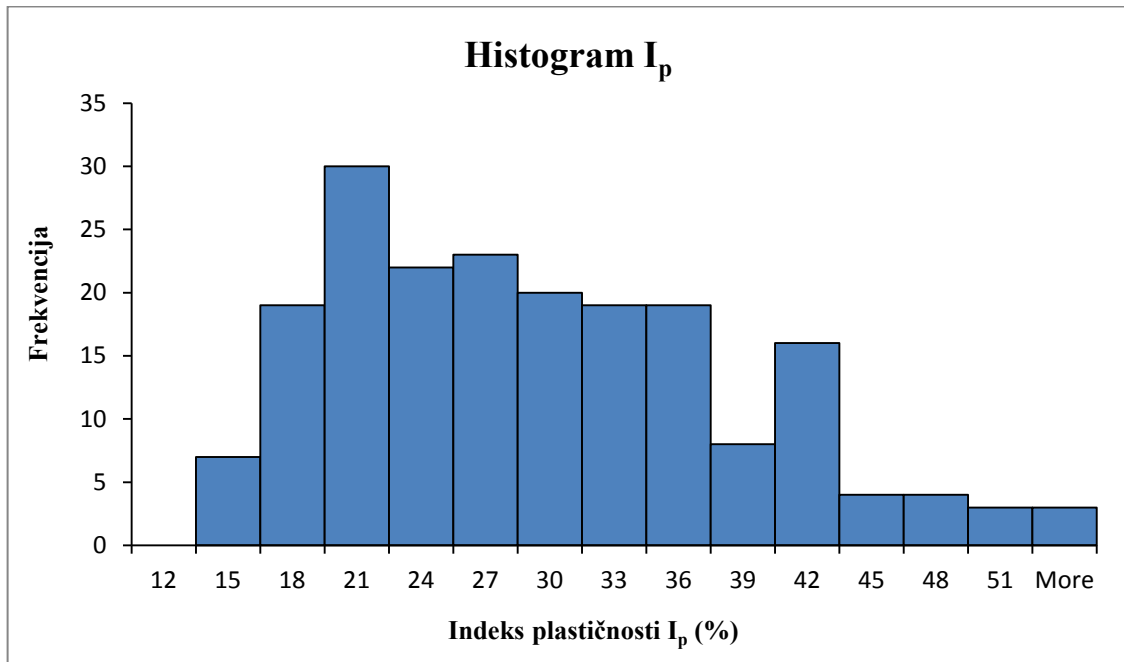
Za svaki interval pojedinog razreda u Tablici 10 prikazana je i pripadna sredina razreda indeksa plastičnosti  $I_{p,sr.}$  (%), a izračunate su i aritmetičke sredine kuta unutarnjeg trenja za pojedini razred  $\phi_{sr.}$  (°).

Na slici 27 prikazan je dijagram zavisnosti sredina razreda indeksa plastičnosti i srednjih vrijednosti kuta unutarnjeg trenja za pojedini razred. Aproksimacija točaka polinomskom krivuljom daje najbolji koeficijent determinacije i vrlo realan prikaz međusobne zavisnosti ove dvije varijable ( $R^2 = 0,9748$ ).

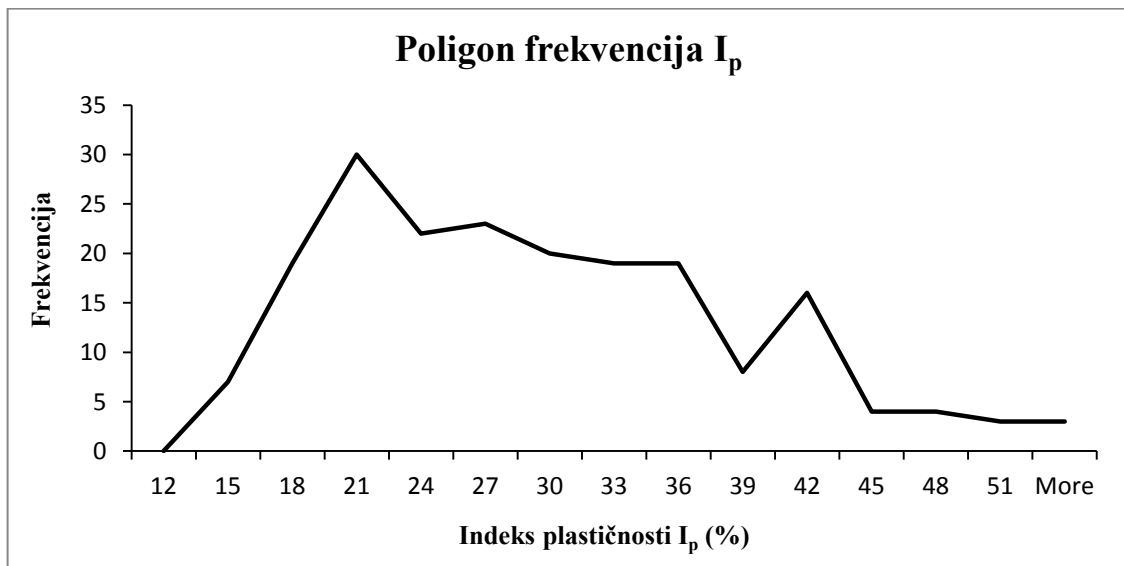


Slika 27. Korelacija  $I_{p,sr.}$  i  $\varphi_{sr.}$  polinomskom krivuljom

Koristeći podatke iz Tablice 10 kreiran je histogram distribucije vrijednosti indeksa plastičnosti u pojedinim intervalima (Slika 28). Vidljivo je da je najveći broj uzoraka u intervalu  $I_p$  od 18-21% (30 uzoraka). Poligon frekvencija prikazan je na Slici 29.



Slika 28. Histogram distribucije  $I_p$  u pojedinim intervalima



Slika 29. Poligon frekvencija  $I_p$

## 5. ZAKLJUČAK

Indeks plastičnosti najznačajniji je indirektni pokazatelj posmične čvrstoće koherentnog materijala. U ovom završnom radu dokazana je čvrsta međusobna zavisnost vršnog kuta unutrašnjeg trenja i indeksa plastičnosti (razlike vlažnosti na granici tečenja od one na granici plastičnosti) za ispitane uzorke glinovitog tla. Prikazanim dijagramima i izračunatom mjerom povezanosti (koeficijent determinacije) dviju pojava potvrđeni su izračuni stručnjaka koji su ranije uočili ovu vezu. Niti jedna statistička metoda nije potpuno egzaktna, uvelike ovisi i o broju ispitanih uzoraka, ali nam može dati dobar uvid u jasnu povezanost dvije varijable. Možemo zaključiti da vršni drenirani kut unutarnjeg trenja pada kako indeks plastičnosti koherentnog tla raste, uz manja odstupanja, neovisno o dubini s koje je uzorak izvađen. Vrijedi preporuka da se za najbolje rezultate (s najmanjim mogućim devijacijama) ispitivani uzorci nalaze u što užem geološkom području (zoni) kako bi se dobili najprihvatljiviji geotehnički modeli za obradu, a samim time i analizu.

## 6. LITERATURA

- [1] Roje-Bonacci, T. Mehanika tla, 3. izd. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; 2007.
- [2] Strelec S., Štuhec D. Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet; 2011.
- [3] Kvasnička P., Domitrović, D. Mehanika tla. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2007.
- [4] Ivanković T. Geotehnički istražni radovi, 1. izd. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet; 2010. str. 11
- [5] Nonveiller E. Mehanika Tla i Temeljenje Građevina, Školska knjiga, Zagreb; 1990.
- [6] Dostupno na: <https://civiltechtips.wordpress.com/construction-practices-materials/>  
Datum pristupa: 16.6.2018.
- [7] Dostupno na: [https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids\\_snjezanamihalic/06\\_poglavlje.pdf](https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/06_poglavlje.pdf)  
Datum pristupa: 19.4.2018.
- [8] Matešić, L. Geotehničko inženjerstvo, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; 2006.
- [9] Maksimović, M. Mehanika tla, Građevinska knjiga, Beograd; 2005.
- [10] Dostupno na: <https://cequcest.files.wordpress.com/2015/09/terzaghi129883967-soil-mechanics-in-engineering-practice-3rd-edition-karl-terzaghi-ralph-b-peck-gholamreza-mesri-1996.pdf>  
Datum pristupa: 16.6.2018.
- [11] Ortolan, Ž., Mihalinec Z. Plasticity index - Indicator of shear strength and major axis of geotechnical modelling // Geotechnical Hazards / Marić, B. et al. Balkema, Rotterdam; 1998. str. 743-750  
Dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/868972>  
Datum pristupa: 20.4.2018.

## 7. POPIS SLIKA

Slika 1. Dijagram plastičnosti

Slika 2. Areometar

Slika 3. Postupak areometriranja

Slika 4. Stanja konzistencije glinovitih materijala

Slika 5. Oprema za utvrđivanje Atterbergovih granica

Slika 6. Spojeni uzorak na dužini od 13 mm pri određenom broju udaraca

Slika 7. Valjčići za utvrđivanje granice plastičnosti

Slika 8. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

Slika 9. Ponašanje tla pri smicanju

Slika 10. Presjek uređaja za izravni posmik

Slika 11. Prikaz rezultata pokusa izravnog posmika

Slika 12. Uzorak nakon ispitivanja

Slika 13. Pomaci i naponi kod pokusa direktnog smicanja

Slika 14. Terzaghijev dijagram zavisnosti  $I_p$  i  $\phi$

Slika 15. Dijagram zavisnosti  $I_p$  i  $\phi$  (*Ortolan i Mihalinec*)

Slika 16. Dijagram zavisnosti kuta unutrašnjeg trenja i granice tečenja

Slika 17. Dijagram zavisnosti indeksa plastičnosti i granice tečenja

Slika 18. Prikaz lokacija uzoraka u panonskoj zoni RH

Slika 19. Prikaz lokacija uzoraka u dubrovačkom području

Slika 20. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (logaritamska krivulja)

Slika 21. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (eksponencijalna krivulja)

Slika 22. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (linearna korelacija)

Slika 23. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\phi$  (polinomska krivulja)



Slika 24. Dijagram korelacije  $I_p$  i  $\varphi$  (krivulja snage)

Slika 25. Korelacija 10 ispitanih uzoraka (polinomska krivulja)

Slika 26. Korelacija uzoraka u podsljemenskoj zoni polinomskom krivuljom

Slika 27. Korelacija  $I_{p,sr}$  i  $\varphi_{sr}$  polinomskom krivuljom

Slika 28. Histogram distribucije  $I_p$  u pojedinim intervalima

Slika 29. Poligon frekvencija  $I_p$

## 8. POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna

Tablica 2. Graduiranost krupnozrnatog tla

Tablica 3. Stupanj plastičnosti sitnozrnatog tla

Tablica 4. USCS klasifikacija tla

Tablica 5. Prikaz načina upisa podataka za granicu tečenja

Tablica 6. Vrijednosti vršnog kuta unutarnjeg trenja i indeksa plastičnosti  
(*GFV*, 2007. - 2010.)

Tablica 7. Vrijednosti regresijskih modela za 30 ispitanih uzoraka

Tablica 8. Izdvojenih 10 uzoraka (*GFV*, 2007. - 2010.)

Tablica 9. Izdvojenih 10 uzoraka gline iz podsljemenske zone

Tablica 10. Distribucija  $I_p$  i pripadne srednje vrijednosti