

# Kut dilatacije

---

**Romić, Tomislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

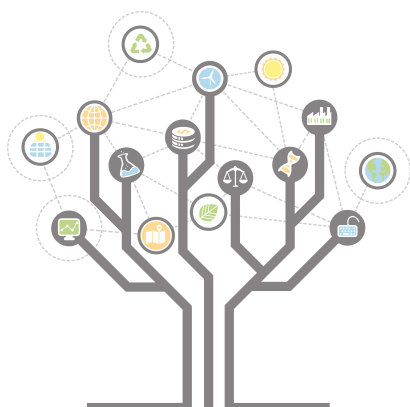
**2017**

*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:130:038991>

*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](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

TOMISLAV ROMIĆ

# **KUT DILATACIJE**

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

## KUT DILATACIJE

KANDIDAT:

TOMISLAV ROMIĆ



MENTOR:

Doc. dr. sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2017.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: TOMISLAV ROMIĆ

Matični broj: 2485 - 2014./2015.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

KUT DILATACIJE

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Osnovna svojstva tla  
3. Laboratorijska ispitivanja i rezultati  
4. Zaključak  
5. Popis literature  
6. Popis slika  
7. Popis tablica

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.03.2017.

Rok predaje: 08.09.2017.

Mentor:

  
Doc.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Doc.dr.sc. Igor Petrović

# IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

## **Kut dilatacije**

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Igora Petrovića**.

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, 6.9.2017.

Tomislav Romić  
(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

# SAŽETAK

**Ime i prezime:** Tomislav Romić

**Naslov rada:** Kut dilatacije

**Tekst sažetka:**

Tlo je trofazni materijal te se sastoji od zrna i čestica koja tvore skelet tla i od pora koje mogu biti ispunjene tekućinom i/ili zrakom. Različita tla imaju različitu strukturu i zbijenost. Struktura tla može biti koherentna ilinekoherentna te različite zbijenosti ovisno o raspodjeli zrnaca tla. Za potrebe rada korišteno je samo nekoherentno ili krupnozrnato tlo u rahlom i zbijenom obliku. Tla se svrstavaju u grupe sličnih svojstava klasifikacijom. Klasifikacija nekoherentnog tla vrši se prema njegovom granulometrijskom sastavu koji predstavlja raspodjelu čestica tla po veličini, a sastav se uobičajeno prikazuje granulometrijskim dijagramom. Jedno od najvažnijih inženjerskih svojstava tla je posmična čvrstoća, a to je vrijednost posmičnog naprezanja u trenutku sloma, duž klizne plohe unutar mase tla. U laboratoriju se određuje u uređaju za izravni posmik. S obzirom da se ne ponašaju sva tla jednako nakon što su podvrgnuta posmičnim silama opisane su razlike u ponašanju rahlog i zbijenog nekoherentnog tla istih granulometrijskih svojstava. Uzorci ovih tala postupno se deformiraju djelovanjem jednake posmične deformacije na svaki od njih. Ispitivanja pokazuju da prilikom smicanja pijeska dolazi do značajne promjene volumena ugrađenih uzoraka, pri čemu se početno zbijeni uzorci razrahljuju, a rahli uzorci zbijaju. Do promjene volumena dolazi zbog zrnate strukture pijeska za koju je karakteristično da prilikom smicanja nužno dolazi do preraspodjele zrna u zoni smicanja, čime se mijenja volumen početne strukture. Ta pojava naziva se dilatacija. U ovom radu prikazan je postupak određivanja kuta dilatacije.

**Ključne riječi:** *dilatacija, rahli pijesak, zbijeni pijesak, posmična čvrstoća, kut dilatacije*

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OSNOVNA SVOJSTVA TLA .....	2
2.1. FAZNI ODNOSI.....	2
2.1.2 Struktura i zbijenost tla .....	3
2.2 KLASIFIKACIJA KRUPNOZRNATOG TLA .....	5
2.3. POSMIČNA ČVRSTOĆA TLA .....	7
2.4. ODZIV TLA NA POSMIČNE SILE .....	9
2.4.1. Efekti povećanja normalnog efektivnog naprezanja.....	12
2.4.2. Coulomb-ov kriterij sloma.....	13
3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI.....	19
3.1. ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA I KLASIFIKACIJA .....	19
3.2. ODREĐIVANJE SPECIFIČNE GUSTOĆE ČESTICA TLA.....	21
3.3. ODREĐIVANJE MINIMALNOG I MAKSIMALNOG KOEFICIJENTA PORA TE ZBIJENOSTI SVAKOG UZORKA.....	22
3.4. UREĐAJ ZA IZRAVNI POSMIK ILI TEST DIREKTOG POSMIKA.....	24
4. ZAKLJUČAK.....	30
5. POPIS LITERATURE.....	31
6. POPIS SLIKA.....	32
7. POPIS TABLICA .....	33

# 1. UVOD

Struktura tla sastavljena od zrna i čestica naziva se skeletom tla. Osim skeleta, tlo se sastoji i od pora koje mogu biti ispunjene tekućinama ili plinovima što predstavlja trofazni karakter tla. Tlo je prostorno vrlo promjenjivog karaktera, često nehomogene strukture i anizotropnih svojstava što utječe na njegova fizičko-mehanička odnosno inženjerska svojstva. Jedno od najvažnijih inženjerskih svojstava tla je posmična čvrstoća.

Posmična čvrstoća je vrijednost posmičnog naprezanja u trenutku sloma, duž klizne plohe unutar mase tla. U laboratoriju se određuje u uređaju za izravni posmik. Cilj ovog rada je opisati ponašanje dvije grupe tala nakon što su podvrgnuta posmičnim silama. Jedna grupa predstavlja rastresita tla. Druga grupa predstavlja zbijena tla. Uzorci ovih tala postupno se deformiraju djelovanjem jednake posmične deformacijena svaki od njih. Jedan uzorak (Tip I) predstavlja rastresiti pijesak, a drugi (Tip II) zbijeni pijesak sa 4 % vlage.

Rahlo i zbijeno nekoherentno tlo istih granulometrijskih svojstava pokazati će različita svojstva u istom pokusu i pri istim razinama naprezanja sve do točke kada se postiže koeficijent pora u kritičnom stanju ili kritični porozitet  $e_c$ . Pri velikim deformacijama koeficijent pora ostaje isti sa daljnjim smicanjem, uz isto posmično naprezanje, te se kaže da se pijesak nalazi u kritičnom stanju. Pokusi pokazuju da prilikom smicanja pijeska dolazi do značajne promjene volumena ugrađenih uzoraka, pri čemu se početno zbijeni uzorci razrahljuju, a rahli uzorci zbijaju. Do promjene volumena dolazi zbog zrnate strukture pijeska za koju je karakteristično da prilikom smicanja nužno dolazi do preraspodjele zrna u zoni smicanja, čime se mijenja volumen početne strukture. Ova pojava naziva se dilatacija. U ovom radu prikazan je postupak određivanja kuta dilatacije.

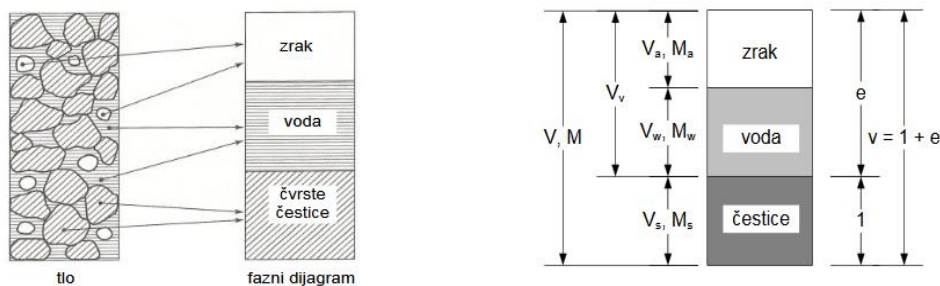


## 2. OSNOVNA SVOJSTVA TLA

Zbog razumijevanja samog rada slijedi opis tla kao inženjerskog materijala kojim se bave razne struke, a u ovom slučaju mehanika tla koja proučava i opisuje osobine tla kao podloge umjetnim građevinama ili kao materijala koji služi pri građenju te uz to i objašnjenja teoretskih poglavlja mehanike tla kao što su: trofazni karakter, struktura i zbijenost tla, postupak klasifikacije tla, posmična čvrstoća te odziv nekoherentnog tla na djelovanje posmične sile.

### 2.1. FAZNI ODNOSI

Tlo je trofazni materijal. Sastoji se od zrna i čestica koja tvore skelet tla i od pora koje mogu biti ispunjene tekućinom i/ili zrakom (za pore će se koristiti indeks  $v$ ). Tri faze koje se promatraju su zrna i čestice ili čvrste čestice (indeks  $s$ ), voda (indeks  $w$ ) i zrak (indeks  $a$ ). Za definiranje odnosa među fazama tla, predočimo element tla kao da jepodijeljen na tri dijela: na volumen ispunjen samo čvrstim česticama, volumen ispunjen samo vodom i volumen ispunjen samo zrakom. Tako jednostavno možemo definirati svojstva tla, koja su neophodna za analizu njegova ponašanja. Pod ponašanjem tla najčešće podrazumijevamo odnos između naprezanja i deformacija u tlu. Međusobni odnos triju faza u tlu ima utjecaj na mehaničko ponašanje tla. Taj se odnos prikazuje u *faznom dijagramu*, koji je prikazan na *Slici 2.1*. U faznom dijagramu elementa tla,  $V_a$  označava volumen zraka u porama,  $V_w$  volumen vode u porama a  $V_s$  volumen čvrstih čestica u tlu, dok  $M_a$ ,  $M_w$  i  $M_s$  označavaju odgovarajuće mase tih faza. Za masu zraka se pretpostavlja da je  $M_a = 0$ . Zrak i/ili voda ispunjavaju pore tla, pa još imamo oznaku za volumen pora  $V_v = V_a + V_w$ . Volumen pora i volumen čvrstih čestica čine ukupan volumen elementatla, pa je  $V = V_v + V_s$ .



Slika 2.1 Fazni dijagram tla i oznake volumena i masa (Szavits-Nossan)

Na temelju ovog modela tla definirani su sljedeći volumenski i maseni odnosi prikazani u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Volumenski i maseni odnosi

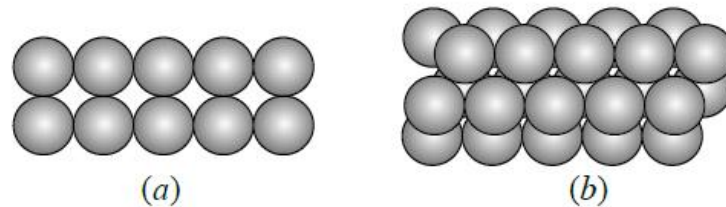
Relativni porozitet, [%]	$n = \frac{V_v}{V}$	(2.1)
Koeficijent pora, [1]	$e = \frac{V_v}{V_s}$	(2.2)
Vlažnost, [%]	$w = \frac{m_w}{m_s}$	(2.3)
Stupanj zasićenosti, [%]	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	(2.4)
Gustoća čestica tla, [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$	(2.5)
Gustoća suhog tla, [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d = \rho_s \cdot (1 - n)$	(2.6)
Gustoća tla, [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho = \frac{m}{V}$	(2.7)
Gustoća vode, [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$	(2.8)

### 2.1.2 Struktura i zbijenost tla

Struktura tla predstavlja raspodjelu čvrstih čestica te sila među njima, kao i pora između njih, pri čemu se razlikuju:

- nekoherentna ili krupnozrnata (nevezana)
- koherentna ili sitnozrnata (vezana)

Strukturu krupnozrnatog tla čine kompaktna zrna koja se mogu prikazati kuglicama. Kao primjer može se razmotriti skup pravilnih kuglica približno iste veličine. Ovisno o relativnom položaju kuglica moguć je širok interval poroznosti. Krupnozrnata tla, pijesci i šljunci, ne pokazuju zamjetno smanjenje volumena pri smanjenju vlažnosti pa tako niti svojstvo plastičnosti. Jedan od razloga je taj što im je efektivni promjer zrna ( $D_{10}$ ), pa tako i pora među njima, prevelik za razvoj značajnijih kapilarnih sila koje bi stezale skelet tla. Znači da je krupnozrnatom tlu teško smanjiti volumen i dovesti ga u zbijenije stanje primjenom statičkog opterećenja. Ali, ako se uzorak rahlog krupnozrnatog tla malo potrese, on će značajno smanjiti volumen na račun smanjenja volumena pora i to tako da se njegova zrnca „bolje“ poslože. Čak se i pravilne kuglice mogu različito posložiti tako da tvore rahlu strukturu (Slika 2.2 a), s pripadnim maksimalnim koeficijentom pora,  $e_{max}$ , odnosno zbijenu strukturu, s pripadnim minimalnim koeficijentom pora,  $e_{min}$ , (Slika 2.2 b).



Slika 2.2 Rahla ili kubična (a) i zbijena ili heksagonalna struktura (b) (Szavits-Nossan)

Za određivanje  $e_{min}$  i  $e_{max}$  koristi se izraz koji povezuje gustoću suhog tla s koeficijentom pora:

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} \rightarrow e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.9)$$

Iz ovog izraza proizlazi da najrahlijem stanju, s maksimalnim koeficijentom pora, odgovara minimalna gustoća suhog tla i obrnuto, najzbijenijem stanju, s minimalnim koeficijentom pora, odgovara maksimalna gustoća suhog tla. Za krupnozrnata tla standardizirani su pokusi određivanja minimalnog i maksimalnog koeficijenta pora. Minimalna gustoća suhog tla (ili maksimalni koeficijent pora) određuje se, primjerice, sipanjem suhog uzorka tla kroz lijevak u posudu poznatog volumena. Ako se ova posuda vibrira (trese) dobije se maksimalna gustoća suhog tla (ili minimalni koeficijent pora  $e_{min}$ ). Stupanj zbijenosti nekog krupnozrnog tla u odnosu na minimalnu i maksimalnu zbijenost, kao indikator mogućih mehaničkih svojstava tog tla, opisuje se relativnom gustoćom,  $D_r$ , definiranom kao:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} * 100 (\%) \quad (2.10)$$

Prema tom pokazatelju može se opisati zbijenost prirodnog krupnozrnatog tla kao što je prikazano u *Tablici 2.2*.

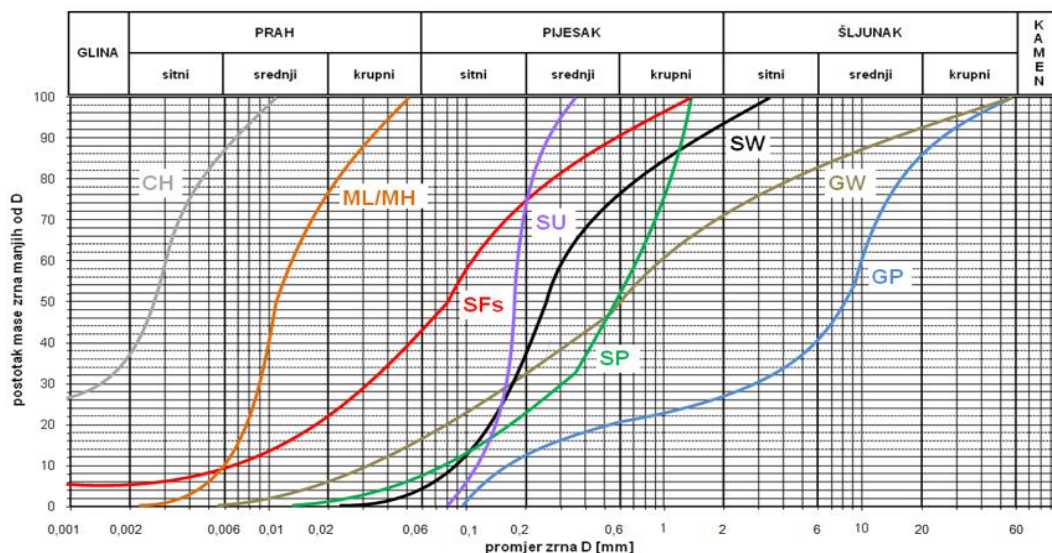
<b>Relativna gustoća D<sub>r</sub> (%)</b>	<b>Poroznost n (%)</b>	<b>Stanje zbijenosti</b>
0 – 20	100 – 80	Vrlo rastresito
20 – 40	80 – 60	Rastresito
40 – 70	60 – 30	Srednje zbijeno
70 – 85	30 – 15	Zbijeno
85 – 100	< 15	Jako zbijeno

*Tablica 2.2. Opis zrnatih tala na temelju relativne gustoće i poroznosti (Budhu, 2000)*

Mehaničko ponašanje krupnozrnatih materijala u znatnoj mjeri ovisi o relativnoj zbijenosti. Ukoliko je veća relativna zbijenost manja je deformabilnost, veća posmična čvrstoća, a manja vodopropusnost. Zbijenost također utječe i na odziv tla kod posmika.

## **2.2 KLASIFIKACIJA KRUPNOZRNATOG TLA**

Klasifikacija krupnozrnatog tla vrši se prema njegovom granulometrijskom sastavu koji predstavlja raspodjelu čestica tla po veličini, izraženu u postotku mase. Samo temeljem granulometrijskog sastava moguće je odrediti neke njegove fizikalne karakteristike, kao primjerice stišljivost. Osnovni koraci u određivanju granulometrijskog sastava su odabir reprezentativnog uzorka te dispergiranje agregata na konačne čestice sijanjem, suhim ili mokrim postupkom, na nizu sita standardnih veličina otvora, te vaganjem ostataka na svakom situ i onoga što je prošlo kroz najfinije sito. Za čestice manje od 0,06 mm granulometrijski sastav se određuje areometriranjem. Granulometrijski sastav uobičajeno se prikazuje granulometrijskim dijagramom (*Slika 2.3*) na kojem je prikazan postotak mase prolaza kroz sito, tj. udio čvrstih čestica koji su manji od date dimenzije. Pri tome se na apscisi prikazuje veličina zrna, u logaritamskom mjerilu, a na ordinati postotak prolaza.



Slika 2.3 Granulometrijski dijagram s tipičnim granulometrijskim krivuljama (Strelec, Štuhec, 2011)

Klasifikacija tla je postupak svrstavanja materijala tla u grupe sličnih svojstava. U ovom završnom radu korištena je USCS klasifikacija (Unified Soil Classification System) prema ASTM (American Society for Testing and Materials) s graničnim veličinama zrna prema MIT-u, prikazana u Tablici 2.3.

Tablica 2.3. USCS klasifikacija tla

Glavna podjela		Grupa simbola	Uobičajeni nazivi	Klasifikacijski kriterij za krupnozrna tla	
<b>Krupnozrna tla (više od polovice materijala s zrnima većim od 0,06 mm)</b>	Šljunak (više od polovice krupnih frakcija s zrnima većim od 2 mm)	Čisti šljunak (malo ili ništa sitnih čestica)	GW	dobro granularni 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 granularni šljunci, mješavina šljunka i pijeska, malo ili ništa sitnih čestica	
		Šljunak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)	GM	prašnasti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i praha	Attebergove granice ispod A-linije ili $I_p < 4$
	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 granularni 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 granularni pijesci, sljnkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica	
Pijesak sa sitnim česticama (znatna količina sitnijih čestica)		SM	prašnasti pijesci, mješavina pijeska i praha	Attebergove granice ispod A-linije ili $I_p < 4$	Iscrtane granice u zoni

			SC	glinoviti pijesci, mješavina pijeska i praha	Attebergove granice iznad A-linije ili $I_p > 7$	vrijednosti s $4 < I_p < 7$ su granični slučajevi koji zahtijevaju uporabu dvojnih simbola
--	--	--	----	-------------------------------------------------	-----------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Za krupnozrnate materijale, tipovi graduiranosti se određuju na temelju dva koeficijenta:

- koeficijent jednoličnosti

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.11)$$

- koeficijent zakrivljenosti

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2.12)$$

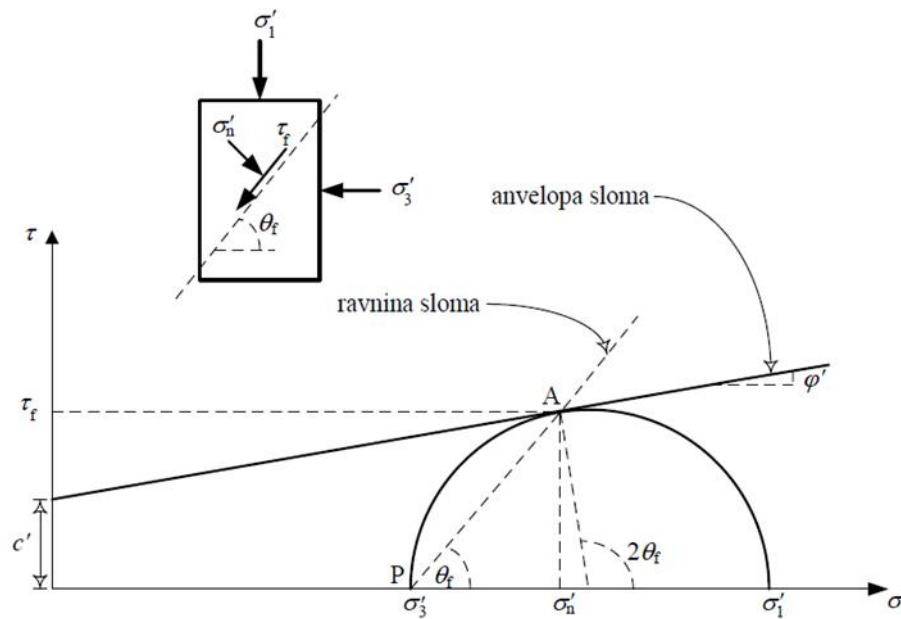
Karakteristični promjeri zrna  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  i  $D_{60}$  određuju se tako da se u granulometrijskom dijagramu povuče horizontalna linija na odgovarajućim postocima (10%, 30% i 60%) te se očitaju vrijednosti promjera zrna u milimetrima. Ako je koeficijent jednoličnosti  $C_u$  jednak 1 znači da su sva zrna jednakog promjera, ako su pak u uzorku promjeri zrna u širokom rasponu,  $C_u$  je jako velik. Dakle, što je koeficijent jednoličnosti veći to je materijal manje jednoličan.

### 2.3. POSMIČNA ČVRSTOĆA TLA

Posmična čvrstoća tla povezuje se sa slomom tla. Slom tla je stanje nestabilnosti popraćeno velikim posmičnim deformacijama i s njima povezanim velikim pomacima. Obično se očituje kao klizanje jedne mase tla po drugoj preko jasno izražene klizne plohe ili manje izražene klizne zone. Na kliznoj plohi ili u kliznoj zoni posmično naprezanje je doseglo posmičnu čvrstoću tla, a daljnji rast posmičnih deformacija više nije popraćen povećanjem otpora u obliku povećanja posmičnih naprezanja kao prije sloma. Posmična čvrstoća je dakle vrijednost posmičnog naprezanja pri lomu, duž klizne površine unutar mase tla. Mohr-Coulombov zakon sloma definira posmičnu čvrstoću  $\tau_f$  tla prema izrazu:

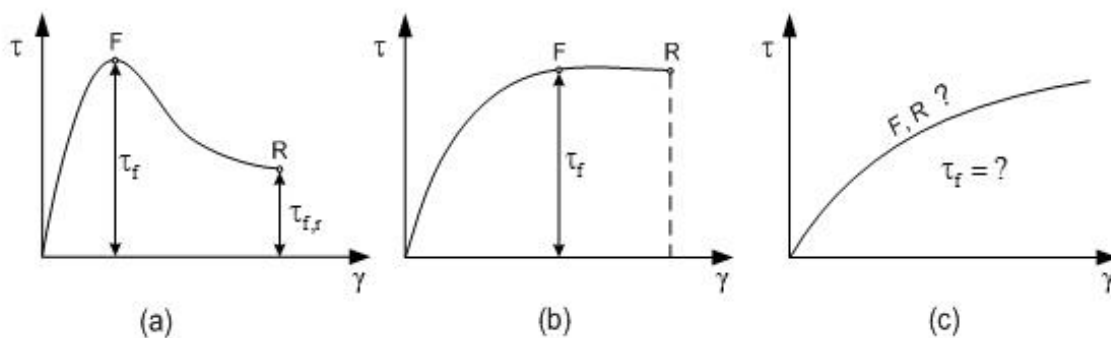
$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg}\varphi' \quad (2.13)$$

gdje je  $c'$  efektivna kohezija,  $\varphi'$  efektivni kut unutarnjeg trenja, a  $\sigma'_n$  je normalno efektivno naprezanje, koje djeluje na istu ravninu kao i posmično naprezanje  $\tau_f$ . Ova se ravnina zove ravninom sloma. Jednadžba (2.13) definira pravac, kojemu je  $c'$  odsječak na ordinati, a  $\varphi'$  mu je nagib u odnosu na horizontalu. Ovaj pravac predstavlja linearnu aproksimaciju anvelope sloma u promatranom rasponu vertikalnih opterećenja. Do sloma u tlu dolazi kada Mohr-ova kružnica naprezanja dodirne anvelopu sloma opisanu jednadžbom (2.13), kao što je prikazano na *Slici 2.4*. Parametri tla  $c'$  i  $\varphi'$  su efektivni parametri posmične čvrstoće tla. Oni nisu konstante materijala, već ovise o nizu čimbenika: vrsti materijala, stanju materijala, 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.



*Slika 2.4. Mohr – Coulomb-ov zakon sloma (Szavits-Nossan)*

Oblici zavisnosti relativne posmičnedehformacijey u funkciji posmičnih naprezanja  $\tau$  prikazani su na *Slici 2.5.*, gdje se vide tri različita mehanizma sloma:



Slika 2.5. Ponašanje tla pri smicanju (Maksimović, 2008)

Krto – plastični (Slika 2.5.a) slom podrazumijeva povećanje posmičnog naprezanja do maksimalne veličine  $\tau_f$ , koja predstavlja vršnu posmičnu čvrstoću, a zatim opadanje posmičnog naprezanja pri daljnjim deformacijama, do rezidualne čvrstoće  $\tau_{f,r}$  pri velikim deformacijama. 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.

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 2.5.b). Ovakav mehanizam sloma karakterističan je za rastresita tla.

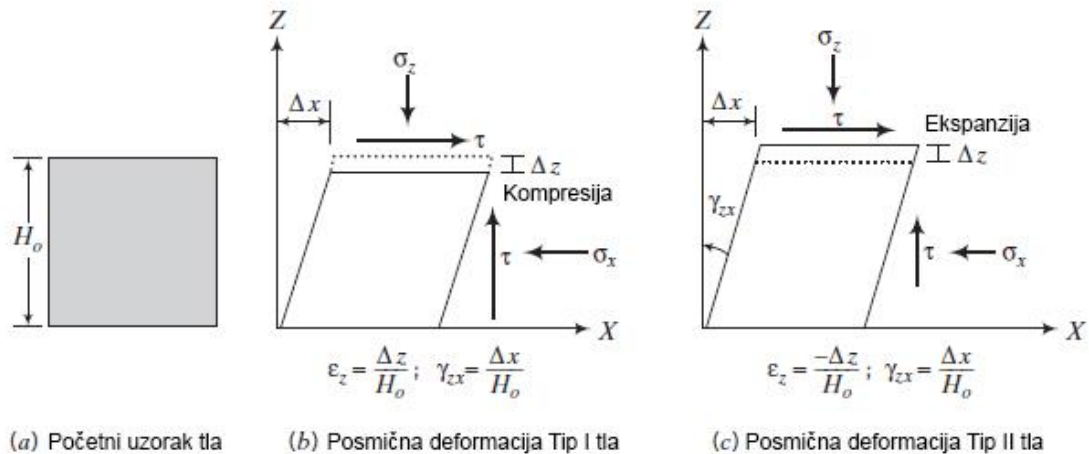
U nekim okolnostima tlo može pokazivati i žilavo ponašanje (Slika 2.5.c) gdje se porastom posmične deformacije povećava posmično naprezanje, te se ne dostiže karakteristična maksimalna vrijednost u ispitanom intervalu deformacija.

## 2.4. ODZIV TLA NA POSMIČNE SILE

Slijedi opis ponašanja dvije grupe tala nakon što su podvrgnuta posmičnim silama. Jedna grupa je rastresito tlo. Druga grupa je zbijeno tlo. Uzorke ovih tala postupno se deformira djelujući jednakom posmičnom deformacijom na svaki od njih. Jedan uzorak



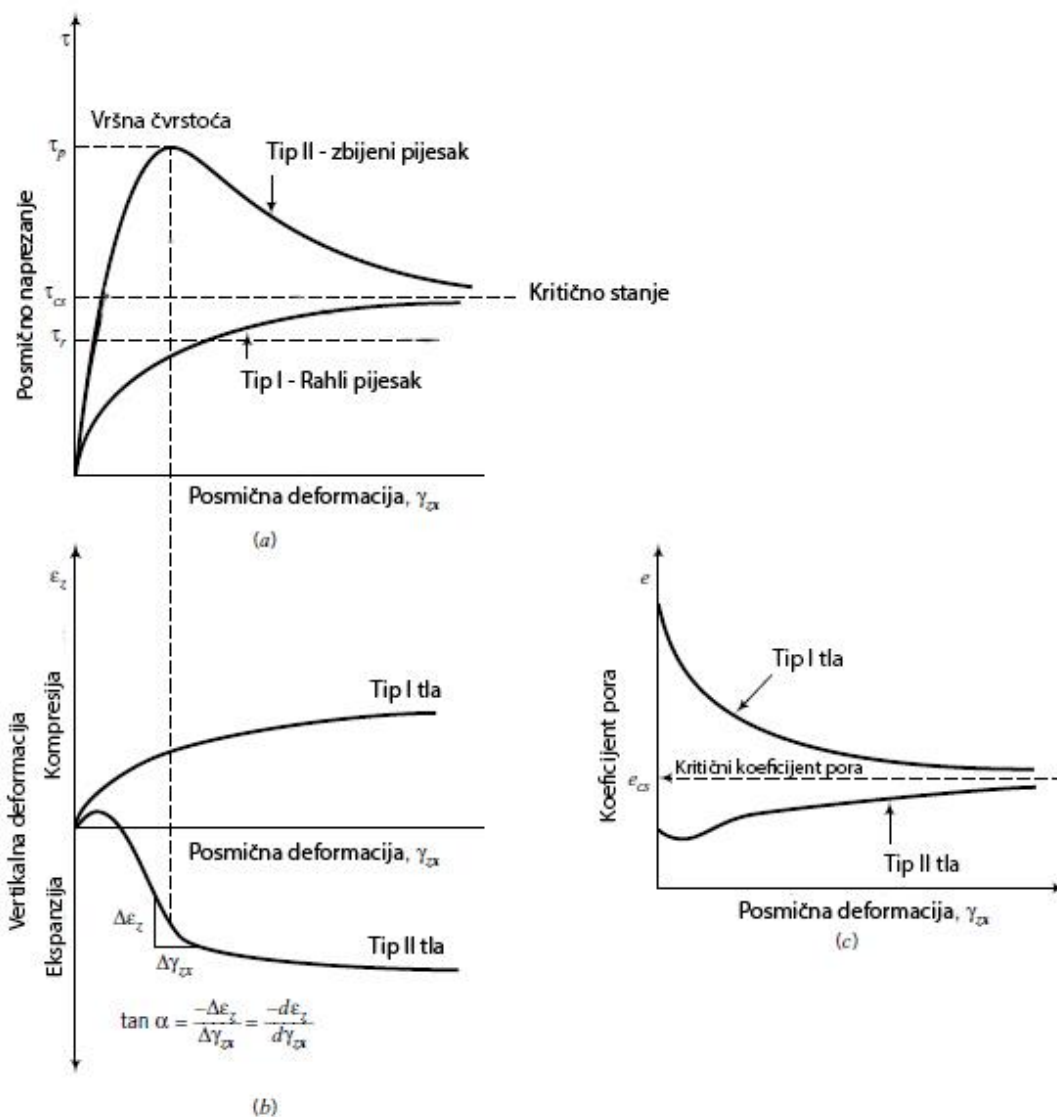
(Tip I) predstavlja rastresiti pijesak, a drugi (Tip II) zbijeni pijesak sa 4% vlage (Slika 2.6).



Slika 2.6. Posmična deformacija Tip I i Tip II tla (Budhu, 2000)

U klasičnoj mehanici jednostavna posmična deformacija odnosi se na smicanje pod konstantnim volumenom. U mehanici tla zanemaruje se ova restrikcija upravo da bi se saznale karakteristike tla na koje djeluje jednostavan posmik. Implikacija je da tada matematička interpretacija testa jednostavnog posmika postaje komplicirana pošto u obzir treba uzeti utjecaj volumetrijskih deformacija na ponašanje tla. Pošto je kod jednostavnog posmika  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ , volumetrijske deformacije su jednake vertikalnim deformacijama  $\varepsilon_z = \Delta z/H_0$ , gdje je  $\Delta z$  vertikalni pomak (pozitivan za kompresiju), a  $H_0$  je početna visina uzorka. Posmična deformacija je mala kutna deformacija izražena kao  $\gamma_{zx} = \Delta x/H_0$ , gdje je  $\Delta x$  horizontalni pomak.

Važna svojstva odziva ove dvije grupe tala (Tip I i Tip II) nakon što su podvrgnuta konstantnom vertikalnom (normalnom) efektivnom naprežanju i povećanju posmičnih deformacija su slijedeća, arazmatra se posmično naprežanje naspram posmične deformacije, volumetrijska deformacija naspram posmične deformacije i omjer koeficijenta pora naspram odziva posmične deformacije (Slika 2.7):



Slika 2.7. Odziv tala na smicanje (Budhu, 2000)

Za Tip I tla – rahli pijesak uočeno je da pokazuje postepeno povećanje posmičnog naprezanja uz porast posmične deformacije (deformacija - zbijanje) sve do postignutog približno konstantnog posmičnog naprezanja tzv. kritično stanje  $\tau_{cs}$  (Slika 2.7a).

Kompresija dakle zbijanje uzorka (Slika 2.7 b) sve dok nije postignut konstantni koefficient pora tzv. kritični porozitet  $e_{cs}$  (Slika 2.7 c).

Za Tip II tla – zbijeni pijesak, uočeno je da pokazuje nagli porast posmičnog naprezanja do vršne čvrstoće  $\tau_p$  pri malim posmičnim deformacijama (usporedivo s Tip I tlom), a zatim smanjenje posmičnog naprezanja uz daljnje povećanje posmičnih deformacija (deformacija - ekspanzija) do kritičnog stanja (Slika 2.7 a). Odgovor na deformacija-omekšanje rezultira lokaliziranim zonama loma zvanim pojasi smicanja. Ti pojasi tla su

zapravo džepići tla kojisu „olabavili“ i dosegli kritično stanje. Masa tla u pojasu smicanja prolazi kroz intenzivno smicanje, dok se mase tla iznad i ispod njega se ponašaju kao kruto tijelo. Razvoj pojasa smicanja ovisi o rubnim uvjetima nametnutim tlu, homogenosti tla, veličini zrna, ujednačenosti opterećenja te početnoj gustoći. Početno zbijanje tla (pripisano namještanju čestica), a zatim razvlačenje tako da tlo postaje rahlije (*Slika 2.7 b*) sve dok se ne postigne kritični porozitet (*Slika 2.7 c*). Kritično stanje naprezanja je postignuto za sva tla kada više ne dolazi do promjena volumena prilikom smicanja.

#### **2.4.1. Efekti povećanja normalnog efektivnog naprezanja**

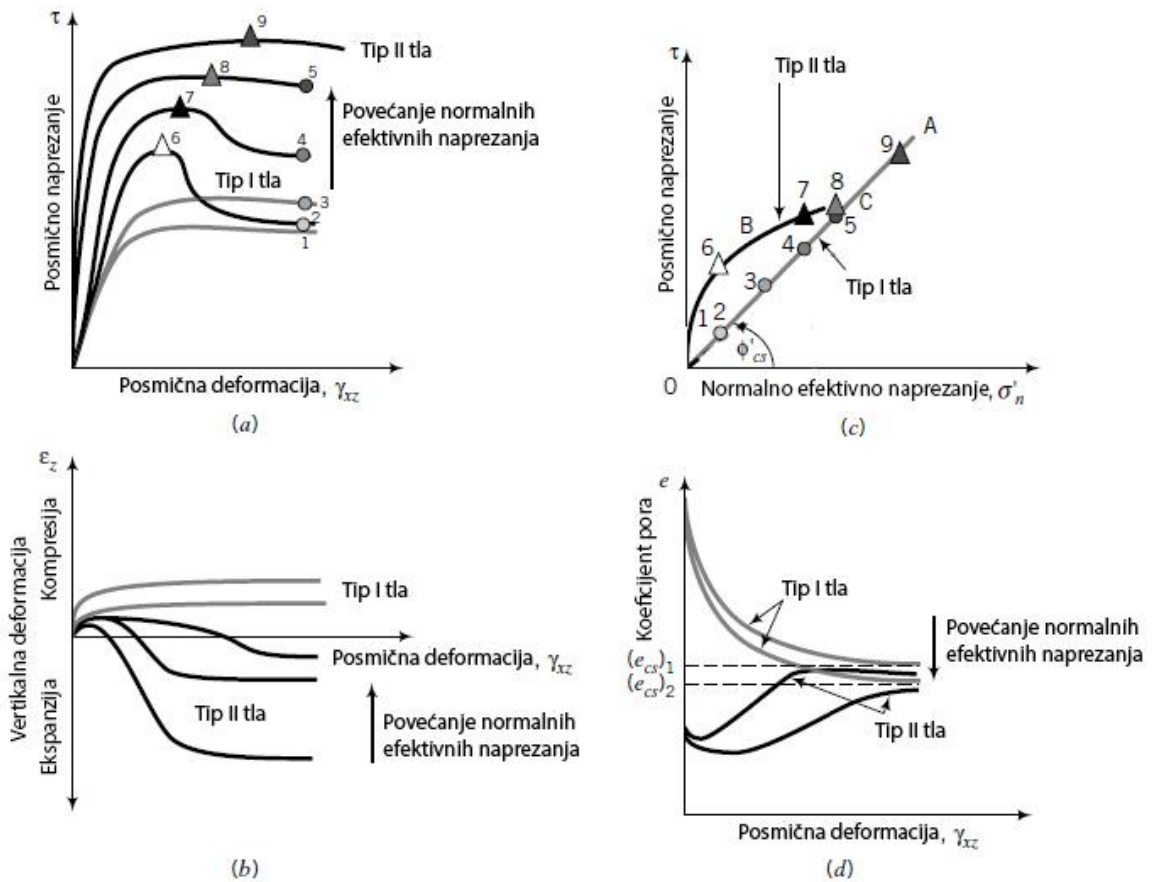
Do sada je korišteno samo jedno normalno efektivno naprezanje u prezentiranju odziva Tipa I i Tipa II tala. Efekt povećanja normalnih efektivnih naprezanja za Tip I tla je povećanje količine kompresije i veličine kritičnog stanja posmika. Za Tip II tla vršna čvrstoća nestaje, kritično naprezanje se povećava, a promjena u povećanju volumena se smanjuje.

Ako se prikažu vršna posmična naprezanja i kritična stanja naprezanja za svako konstantno normalno efektivno naprezanje, dobije se:

- Približna ravna linija ( $OA$ , *Slika 2.8 c*) koja povezuje sve vrijednosti kritičnih stanja posmika Tip I i Tipa II tla. Kut između  $OA$  i osi normalnih efektivnih naprezanja je kut kritičnog stanja sloma  $\rho_{cs}$ . Pravac  $OA$  zove se anvelopa sloma pošto su sva posmična naprezanja koja leže na njoj kritična stanja naprezanja.
- Krivulju ( $OBCA$ , *Slika 2.8 c*) koja povezuje sve vršne vrijednosti posmičnih naprezanja za Tip II tla.  $OBC$  (zakrivljeni dio  $OBCA$ ) je anvelopa vršnih posmičnih naprezanja pošto su sva posmična naprezanja koja leže na njoj vršna posmična naprezanja.

Pri velikim normalnim efektivnim naprezanjima, vršna posmična čvrstoća za Tip II tla je potisnuta i promatraju se samo kritična stanja naprezanja te se pojavljuju kao točka (točka 9) locirana na  $OA$  (*Slika 2.8 c*). kako se normalna efektivna naprezanja

povećavaju, kritični porozitet se smanjuje (Slika 2.8 d). Zaključak je da kritični porozitet ovisi o veličini normalnih efektivnih napreznja.



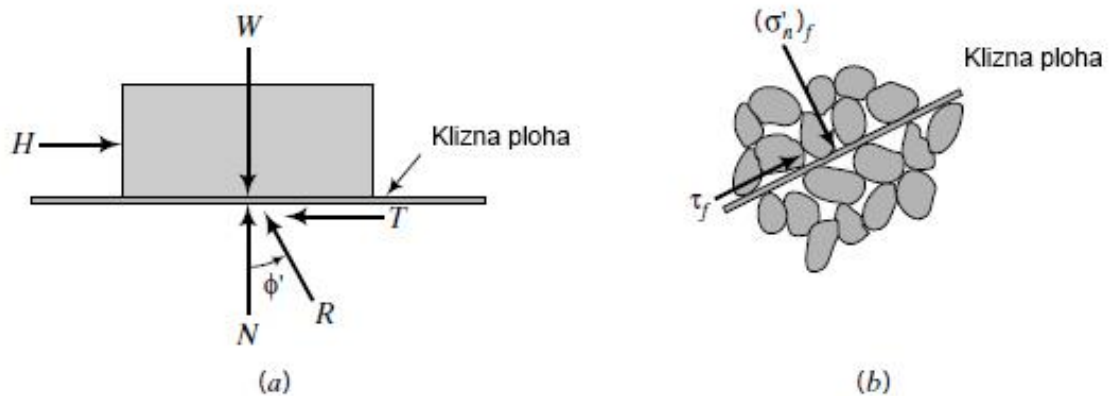
Slika 2.8. Efekti povećanja normalnih efektivnih napreznja na odziv tala (Budhu, 2000)

## 2.4.2. Coulomb-ov kriterij sloma

Tla, posebice zrnata tla, po prirodi imaju klizne plohe. Svaki kontakt jedne čestice tla s drugom je potencijalna mikro klizna ploha. Opterećenja mogu izazvati da se više tih mikro kliznih ploha poravnava u smjeru najmanjeg otpora. Može se zaključiti da je mogući način sloma tla klizanje po plohi najmanjeg otpora. Iz statike je poznato da je predstojeće klizanje između dva kruta tijela baza Coulomb-ovog zakona trenja. Na primjer, ako se drveni blok gurne horizontalno preko stola (Slika 2.9a) horizontalna sila  $H$  potrebna za pokretanje bloka prema Coulomb-ovom zakonu trenja je:

$$H = \mu W \quad (2.14)$$

gdje je  $\mu$  koeficijent statičkog trenja između bloka i stola, a  $W$  je težina bloka. Kut između rezultantne sile i normalne sile zove se kut trenja  $\varphi' = \tan^{-1}\mu$ .

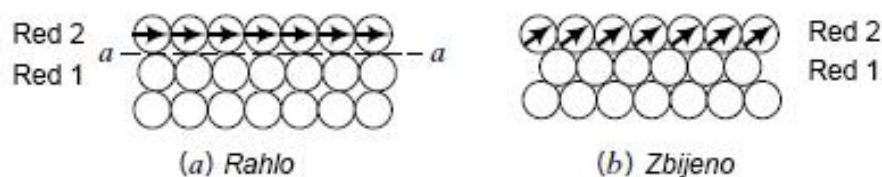


Slika 2.9. a) Klizanje drvenog bloka. b) Klizna ploha u tlu (Budhu, 2000)

Coulomb-ov zakon zahtijeva postojanje ili razvoj kritične klizne ravnine. U slučaju drvenog bloka na stolu klizna ploha je horizontalna ravnina na sučelju između bloka i stola. Za razliku od drvenog bloka, u tlu se ne zna gdje je locirana klizna ploha. U pogledu naprezanja, Coulomb-ov zakon je izražen kao:

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan \varphi' \quad (2.15)$$

gdje.  $\tau_f (= T/A)$ , gdje je  $T$  posmična sila na predstojeće klizanje, a  $A$  je površina ravnine paralelna sa  $T$ ) posmična sila kada je klizanje pokrenuto, a  $(\sigma'_n)_f$  je normalno efektivno naprezanje na ravnini na kojoj je klizanje pokrenuto. Oznaka  $f$  predstavlja slom, koji prema Coulomb-ovom zakonu nastaje kadaje pokrenuto kretanje jednog krutog tijela u odnosu na drugo. Ako se Coulomb-ova jednadžba (2.15) prikaže na grafu posmičnih naprezanja naspram normalnih efektivnih naprezanja dobiva se pravac sličan  $0A$  (Slika 2.8 c) ako je  $\varphi' = \varphi'_{cs}$ . Dakle Coulomb-ov zakon može biti korišten za prikaz ponašanja tla kod kritičnog stanja. Međutim što je s prikazivanjem vršnog ponašanja karakterističnog za Tip II tla?



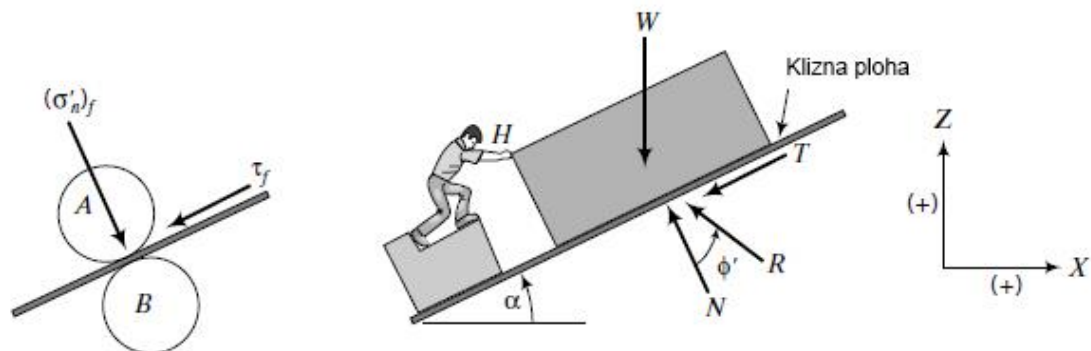
Slika 2.10. Raspored kuglica koje predstavljaju rahli i zbijeni pijesak (Budhu, 2000)

Tla mogu imati različite jedinične težine ovisno o rasporedu čestica. Simulacija dva ekstremna rasporeda čestica tla za grubo zrnatija tla – jedno rahlo, drugo zbijeno prikazana je na (Slika 2.10). Kao što je već spomenuto u poglavlju 2.1.2 *Struktura i zbijenost tla* pretpostavka je da su čestice tla kuglice. Rahli niz je dobiven slaganjem kuglica jedne poverh druge, dok je zbijen niz dobiven zapunjavanjem redaka. Zbog jednostavnosti u obzir se uzimaju prva dva reda. Ako se gurne (posmikom) red 2 u odnosu na red 1, u rahlom stanju, klizanje će biti inicirano na horizontalnoj ravnini *a-a*, konzistentno s Coulomb-ovim zakonom trenja (Jednadžba 2.15). Jednom kada je kretanje pokrenuto, čestice u rahlom stanju će težiti ka pomicanju u prazne prostore. Smjer kretanja imati će silaznu komponentu, što je, kompresija.

U zbijenom stanju, relativno klizanje reda 2 u odnosu na red 1 ograničeno je zbog uzglobljenosti kuglica (zrna tla). Klizanje za zbijeno stanje će biti inicirano po kosini, a ne horizontalnoj ravnini. U tom slučaju čestice moraju prelaziti jedna preko druge, biti gurnute na stranu ili oboje. Smjer kretanja čestica imati će uzlaznu komponentu, što je, ekspanzija. Primjenom statike za istraživanje predstojećeg klizanja čestica iznad ili ispod klizne plohe interpretira se posmično ponašanje tla korištenjem Coulomb-ovog zakona trenja. Smicanje rahlog niza može se idealizirati analogijom s klizanjem drvenog bloka po horizontalnoj plohi. Kod sloma:

$$\frac{\tau_f}{(\sigma'_n)_f} = \frac{H}{W} = \tan \phi' \quad (2.16)$$

U obzir se uzmu dvije čestice A i B u zbijenom stanju i nacrtava se dijagram naprezanja po klizećem kontaktu između A i B (Slika 2.11). Uzima se drveni blok zbog analogije za opisivanje posmičnog ponašanja zbijenog niza. Za zbijeni niz, drveni blok je postavljen na ravninu nagnutu pod kutom  $\alpha$  u odnosu na horizontalnu (Slika 2.11b).



(a) Naprezanja na plohu sloma

(b) Simulacija posmika zbijenog niza čestica

*Slika 2.11. Simulacija sloma u zbijenom pijesku (Budhu, 2000)*

Cilj je naći horizontalnu silu potrebnu za iniciranje kretanja bloka prema gore po nagibu. Na predstojećem pokretu,  $T = \mu N$ , gdje je  $N$  normalna sila. Korištenjem jednadžbe ravnoteže sila u  $X$  i  $Z$  smjeru dobiva se

$$\sum F_x = 0: H - N \sin \alpha - \mu N \cos \alpha = 0 \quad (2.17)$$

$$\sum F_z = 0: N \cos \alpha - \mu N \sin \alpha - W = 0 \quad (2.18)$$

Rješavanjem po  $H$  i  $W$ , dobiva se:

$$H = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \quad (2.19)$$

$$W = N(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (2.20)$$

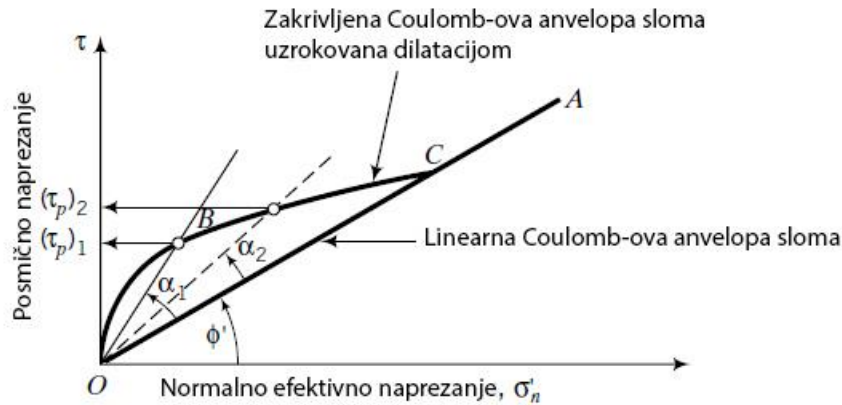
Dijeljenjem jednadžbe (2.19) sa jednadžbom (2.20) i pojednostavljenjem, dobiva se

$$\frac{H}{W} = \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \tan \alpha} = \frac{\tan \varphi' + \tan \alpha}{1 - \tan \varphi' \tan \alpha}$$

Zbog analogije s rahlom strukturom,  $H$  se može zamijeniti sa  $\tau_f$  a  $W$  sa  $(\sigma'_n)_f$  rezultat čega je:

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \frac{\tan \varphi' + \tan \alpha}{1 - \tan \varphi' \tan \alpha} = (\sigma'_n)_f \tan(\varphi' + \alpha) \quad (2.21)$$

Ako je  $\alpha = 0$ , jednadžba (2.21) se reducira na Coulomb-ov zakon trenja (2.15). Ako se  $\alpha$  povećava, posmična čvrstoća,  $\tau_f$  se također povećava. Ako se npr. pretpostavi da je  $\varphi' = 30^\circ$ , a  $(\sigma'_n)_f$  je konstanto; za  $\alpha = 0$  dobiva se da je  $\tau_f = 0,58(\sigma'_n)_f$ , ali ako je  $\alpha = 10^\circ$  dobiva se da je  $\tau_f = 0,84(\sigma'_n)_f$ , što je povećanje od 45% posmične čvrstoće za 10% povećanja kuta  $\alpha$ . Ako se povećavaju normalna efektivna naprezanja kod zbijenog stanja kuglica, količina „oslobođenja prema gore“ kuglica se smanjuje. U principu, mogu se nametnuti dovoljno visoka normalna efektivna naprezanja da se u potpunosti suzbije tendencija „oslobođenja prema gore“ zbijenog stanja kuglica. Stoga, mogućnost zbijenog stanja kuglica da ekspandira ovisi o veličini normalnih efektivnih naprezanja. Što je manja vrijednost normalnih efektivnih naprezanja, veća je vrijednost kuta  $\alpha$ . Učinak  $\alpha$  kod povećanja normalnih efektivnih naprezanja je da anvelopa sloma postaje zakrivljena kao što je prikazuje OBC na (Slika 2.12), što je slično odzivu Tipa II tla vršnoj vrijednosti posmika (Slika 2.8 c).



Slika 2.12 Efekti dilatacije na Coulomb-ovu anvelopu sloma (Budhu, 2000)

Geometrija zrna tla i njihovih strukturnih poredaka je puno kompleksnija od strukture zbijenih i rahlih diskova. Međutim, model s diskovima je primjenjiv na tla ako se želi interpretirati posmična čvrstoća tla korištenjem Coulomb-ovog zakona trenja. U pravim tlima, čestice su nasumično raspoređene i često nepravilne. Posmik zadanog volumena tla će uzrokovati da se klizanje nekih čestica dogodi iznad klizne plohe dok se klizanje drugih dešava ispod klizne plohe. Opći oblik jednadžbe (2.21) je tada

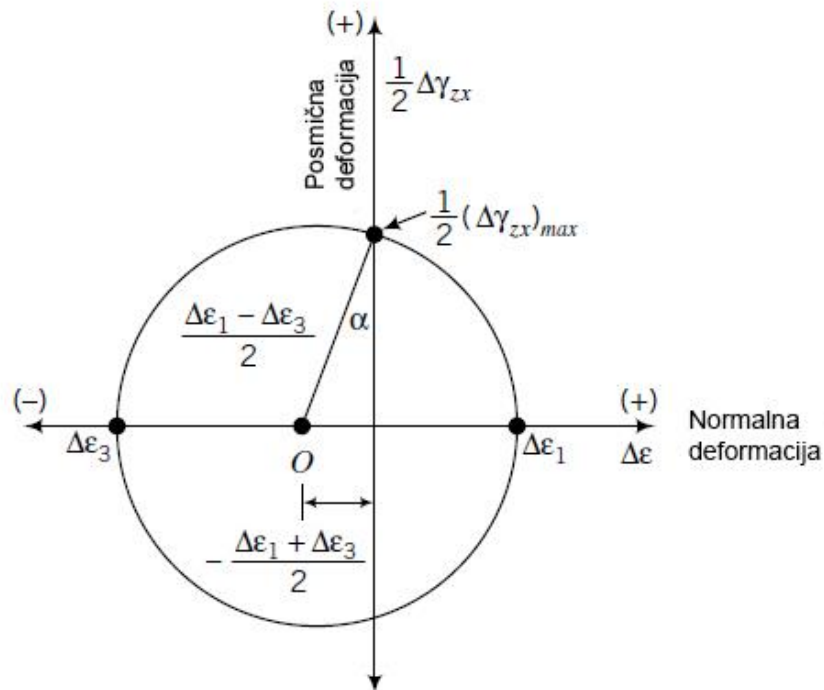
$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan(\varphi' \pm \alpha) \quad (2.22)$$

u kojoj se operacija zbrajanja odnosi na tla u kojima je kretanje čestica inicirano iznad klizne plohe, a operacija oduzimanja se odnosi na pomicanje čestica ispod klizne plohe. Taj kut  $\alpha$  zove se kut dilatacije. On je mjera promjene volumetrijskih deformacija s obzirom na promjene posmičnih deformacija. Tla koja imaju pozitivne vrijednosti kuta dilatacije ( $\alpha$ ) se šire za vrijeme smicanja dok se tla s negativnim vrijednostima  $\alpha$  zbijaju tokom smicanja. Kod Mohr-ove kružnice deformacija (Slika 2.13), kut dilatacije je:

$$\alpha = \sin^{-1} \left( -\frac{\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3} \right) = \sin^{-1} \left( -\frac{\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3}{(\Delta\gamma_{zx})_{max}} \right) \quad (2.23)$$

Gdje  $\Delta$  označava promjenu. Predznak minus se koristi jer želimo da  $\alpha$  bude pozitivan kada tlo ekspandira. U mehanici tla kompresija se uzima kao pozitivna.





Slika 2.13 Mohr-ova kružnica deformacija i kut dilatacije (Budhu, 2000)

Ako je masa tla ograničena u bočnim smjerovima, kut dilatacije je predstavljen (Slika 2.7 b) kao:

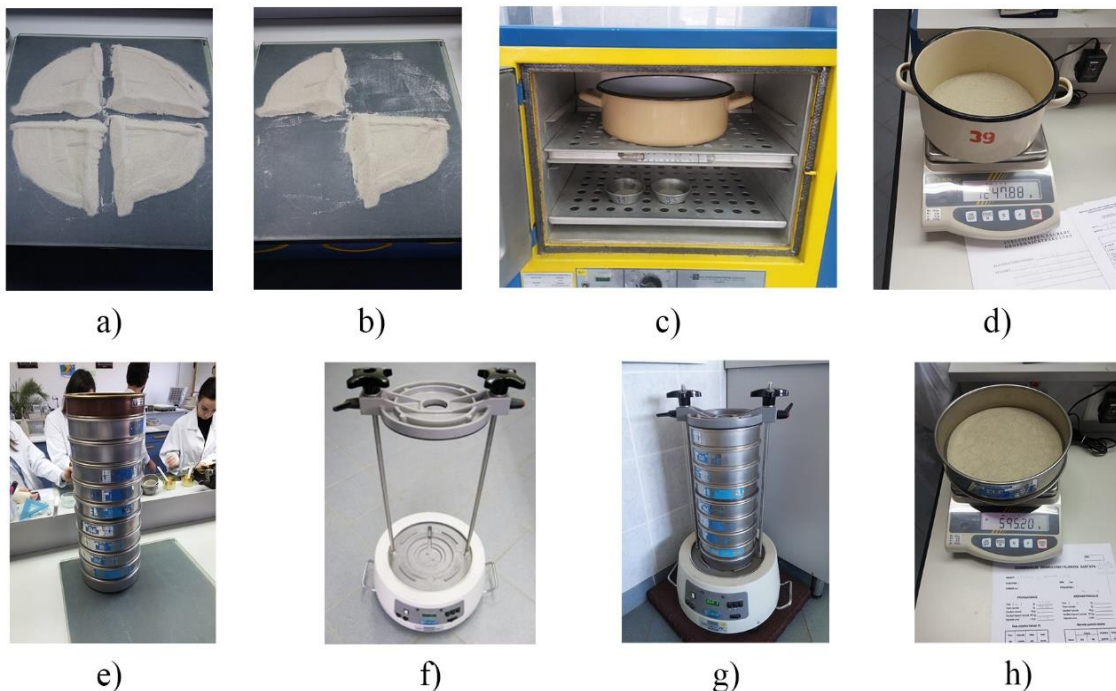
$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{-\Delta z}{\Delta x} \right) \quad (2.24)$$

Dilatacija nije osobina tla ali se pojavljuje u mnogim materijalima, npr. riža i pšenica. Drevni trgovci žitaricama su bili svjesni fenomena povećanja volumena žitarica, međutim, Osborne Reynolds (1885.) je bio taj koji je opisao fenomen dilatacije i njome zainteresirao znanstvenu zajednicu. Ispitivanje dilatacije pijeska u uređaju za direktni posmik prvi je ispitao Cassagrande (1936.). Dilataciju kako djeluje je moguće vidjeti na plažama. Ako se na plaži nogom nagazi pijesak odmah nakon odlazećeg vala, primijeti se da se u početku mokar, zasićen pijesak oko stopala na trenutak čini suh. To se dešava zato što masa pijeska oko stopala dilatira (širi se), usisavajući vodu u šupljine. Ta se voda oslobađa i pojavljuje kao površinska voda kada se digne stopalo.

### 3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI

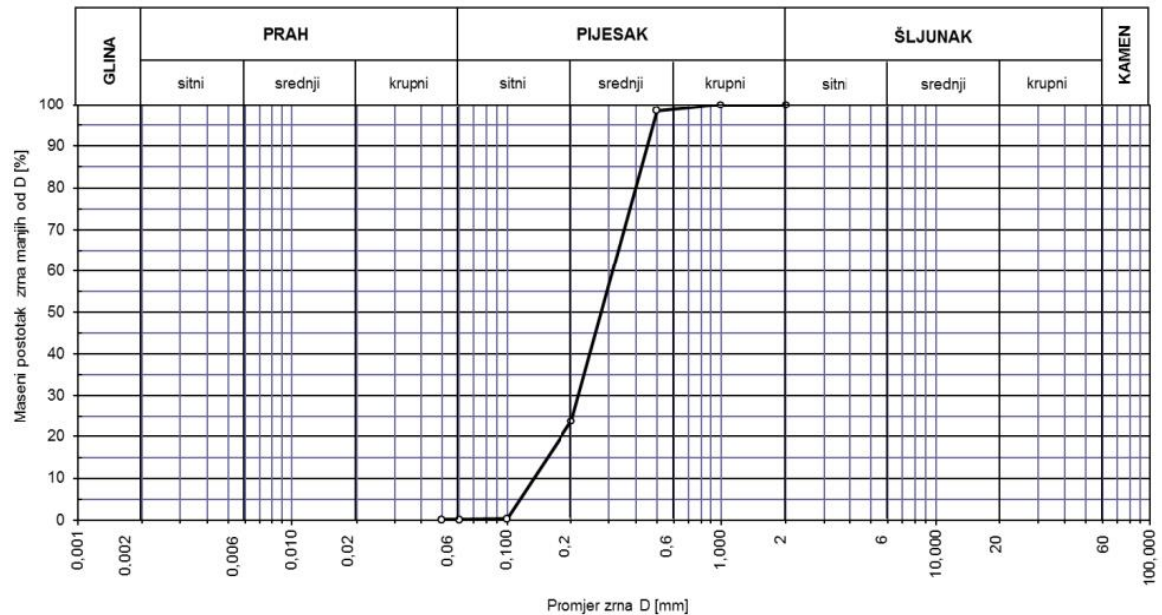
#### 3.1. ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA I KLASIFIKACIJA

Kako bi se uzorak mogao klasificirati potrebno je poznavati njegov granulometrijski sastav. Određivanje granulometrijskog sastava provedeno je prema normi HRS CEN ISO/TS 17892-4. Uzorak je nakon četvrtanja (dobivanje reprezentativnog uzorka) osušen u sušioniku do stalne mase. Nakon vaganja nasipan je na najgrublje sito u nizu sita (sita su postavljena jedno iznad drugog od finijeg prema grubljem) koja su zatim stavljena u tresalicu na 5 minuta kako bi se uzorak prosijao i kako bi na svakom situ ostala samo zrna koja kroz otvore na situ nisu mogla proći. Nakon sijanja sita su izvađena iz tresalice i izvagan je ostatak na svakom pojedinom situ i na dnu. Postupak je prikazan na *Slici 3.1.*



*Slika 3.1. Sijanje uzorka; a) i b) postupak četvrtanja radi dobivanja reprezentativnog uzorka; c) sušenje do stalne mase; d) vaganje suhog uzorka prije sijanja; e) sipanje uzorka na set sita, f) tresalice; g) prosijavanje uzorka u tresalici; h) vaganje sita i ostataka uzorka na svakom situ*

Iz podataka o ostatku uzorka na situ poznatog promjera tj. postotku prolaska mase kroz pojedino sito, iscrtana je granulometrijska krivulja prikazana na *Slici 3.2*.



*Slika 3.2. Granulometrijska krivulja*

Također su izračunati koeficijenti potrebni za klasifikaciju uzorka: koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti, a prema izrazima (2.11) i (2.12). Za ispitani uzorak oni iznose:

$$C_u = 2,34$$

$$C_c = 1,12$$

Prema USCS klasifikaciji koja je prikazana u poglavlju 2.2.u *Tablici 2.3*, a prema granulometrijskoj krivulji i izračunatim podacima, uzorak je klasificiran kao slabo graduirani pijesak te ima oznaku **SP**.

## 3.2. ODREĐIVANJE SPECIFIČNE GUSTOĆE ČESTICA TLA

Gustoća čestica tla ili specifična gustoća određena je prema normi ASTM D854. Pokus se provodi pomoću piknometara tipa Gay-Lyssac što je staklena bočica s brušenim šupljim čepom, točno poznatog volumena. Vaganjem se odredi masa praznog piknometra  $M_p$ , a zatim se piknometar naspe uzorak te određi masa piknometra sa suhim uzorkom tla  $M_I$ . Kako bi se istisnuo zrak iz pora u piknometar se nalije destilirana voda (približno dvije trećine volumena) i on se stavi u pješčanu kupelj koja se zagrije i uzrokuje kuhanje uzorka u piknometru. Kad se piknometar s uzorkom ohladi, napuni se destiliranom vodom do vrha, ponovno važe (masa piknometra s uzorkom i vodom  $M_2$ ) te se mjeri temperatura vode. Još je potrebno odrediti masu piknometra napunjenog samo s vodom. Redoslijed izvođenja pokusa prikazan je na *Slici 3.2*. Za izračun gustoće čestica tla bez pora na temperaturi  $T$ , koristi se jednadžba:

$$\rho_{sT} = \frac{M_s}{M_{ws}} \cdot \rho_{wT} \quad (3.1)$$

gdje je:  $M_s$ -masa suhog uzorka,  $M_{ws}$ -masa istisnute vode,  $\rho_{wT}$ -gustoća vode.

Nakon toga se računa korigirana gustoća zbog temperature:

$$\rho_{s(20^\circ\text{C})} = \rho_{sT} \cdot K_T \quad (3.2)$$

gdje je:  $K_T$ - koeficijent korekcije zbog temp. vode T (čita se iz tablice).

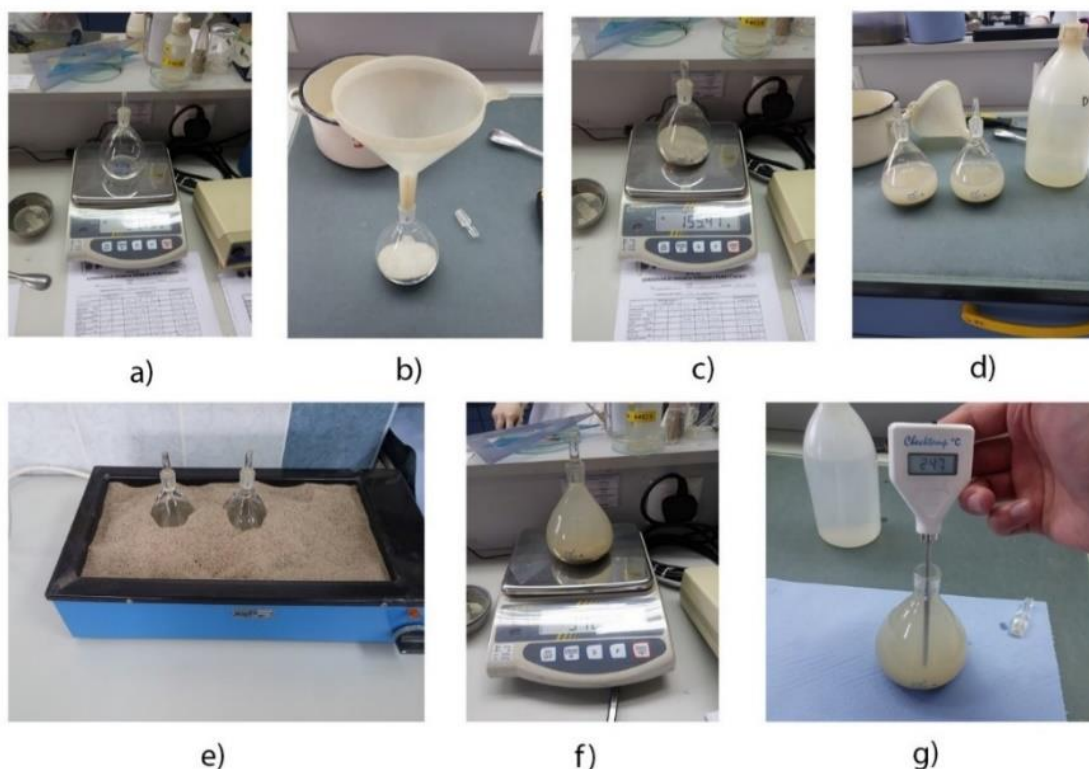
$$\rho_s = 2,654 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Specifična težina odredi se prema:

$$\gamma_s = g \cdot \rho_{s(20^\circ\text{C})} \quad (3.3)$$

gdje je:  $g$  - gravitacija ( $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ ).

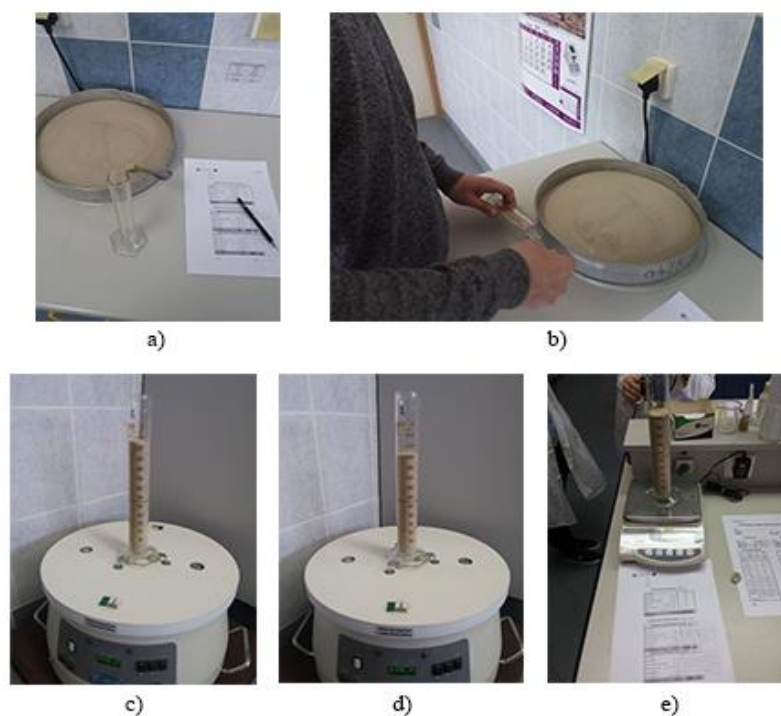
$$\gamma_s = 26,032 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$



Slika 3.2. Postupak određivanja specifične gustoće tla: a) vaganje samog piknometra b) stavljanje uzorka tla u piknometar; c) vaganje uzorka tla i piknometra; d) dodavanje vode u piknometar; e) istiskivanje zraka iz pora; f) vaganje piknometra s uzorkom i vodom; g) mjerenje temperature

### 3.3. ODREĐIVANJE MINIMALNOG I MAKSIMALNOG KOEFICIJENTA PORA TE ZBIJENOSTI SVAKOG UZORKA

Za određivanje minimalnog i maksimalnog koeficijenta pora potreban je potpuno suhi uzorak, posuda poznatog volumena, u ovom slučaju menzura, vaga na dvije decimale te žlica za uzimanje uzorka. Postupak za određivanje maksimalnog koeficijenta pora  $e_{max}$  (Slika 3.3): suhi uzorak rahlo se nasipava u menzuru poznate mase ( $m_m$ ) od unaprijed određenog volumena označenog na menzuri. Vrlo je bitno paziti da se uzorak ne potresa kako se ne bi došlo do zbijanja jer je potrebno da bude nasipan u najrahlijem mogućem stanju. Nakon što je uzorak nasipan do određenog volumena važe se zajedno s menzutom kao što je prikazano na Slici 3.3 c ( $m_{m+u}$ ). Pomoću poznatog volumena i mase uzorka odredi se minimalna gustoća uzorka pomoću jednadžbe(3.4), a iz toga maksimalni koeficijent pora.



Slika 3.3 Određivanje minimalnog i maksimalnog koeficijenta pora: a) uzorak i menzura; b) rahlo sipanje uzorka u menzuru; c) i d) vibriranje menzure kako bi se uzorak zbio; e) vaganje menzure i uzorka

Masa uzorka ( $m_u = m_{m+u} - m_m$ ) jednaka je razlici mase menzure s uzorkom i mase menzure. Gustoća uzorka iznosi:

$$\rho_d = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.4)$$

Maksimalni koeficijent uzorka računa se pomoću izraza:

$$e_{max} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,min}} - 1 \quad (3.5)$$

Minimalni koeficijent pora za promatrano tlo označavamo sa  $e_{min}$ , a određujemo ga sipanjem suhog uzorka tla u menzuru, u slojevima, te potresanjem menzure u tresalici (Slika 3.3 c) dok se ne dobije najzbijenije stanje. Tada se vagne uzorak u menzuri i provede isti račun kao kod određivanja minimalnog koeficijenta pora pomoću izraza:

$$e_{min} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,max}} - 1 \quad (3.6)$$

Dobiveni rezultati su:

$$\rho_{d,max} = 1,622 \frac{g}{cm^3} \quad \rightarrow \quad e_{min} = 0,6363$$

$$\rho_{d,min} = 1,282 \frac{g}{cm^3} \quad \rightarrow \quad e_{max} = 1,0702$$

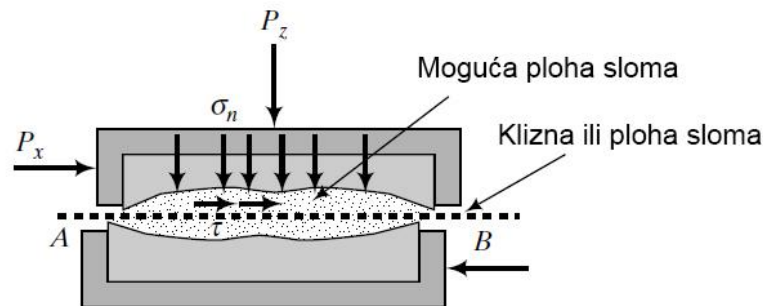
Prema *Tablici 2.2* koja opisuje stanje zbijenosti i gustoće uzoraka uzorci su klasificirani kao:

**uzorak A – vrlo rahli**

**uzorak B – rahlo do srednje zbijen**

### 3.4. UREĐAJ ZA IZRAVNI POSMIK ILI TESTDIREKTOG POSMIKA

Popularna aparatura za određivanje parametara posmične čvrstoće je uređaj za izravni posmik. Ovaj test je koristan kada je masa tla sklona pucanju po tankoj zoni u uvjetima ravninske deformacije.



*Slika 3.4 Uređaj za izravni posmik (Budhu, 2000)*

Uređaj za izravni posmik se sastoji od horizontalno razdvojene, otvorene metalne kutije. Sam uređaj i postupak ugradnje uzorka detaljno su prikazani na (*Slika 3.5*). Tlo se ugradi u kutiju i polovica kutije se pomiče u odnosu na drugu polovicu. Time je slom ograničen uzduž tankog sloja tla na horizontalnoj plohi (AB). Metalne ploče s gornje i donje strane tla generiraju posmičnu silu. Vertikalna sila nanosi se preko metalne kuglice na sredini gornje ploče. Horizontalna sila nanosi se preko motora s kontrolom pomaka da bi se dobila vršna posmična sila i kritična posmična sila. Mjere se: horizontalni pomaci  $\Delta x$ , vertikalni pomaci  $\Delta z$ , horizontalna opterećenja  $P_x$  i vertikalna

opterećenja  $P_z$ . Obično se provode tri testa na uzorku tla koristeći tri različite konstantne vertikalne sile. Slom je definiran kada se tlo više ne može opirati daljnjem povećanju inkremenata horizontalne sile. Naprezanja i deformacije kod testa direktnog posmika je teško izračunati iz izmjerenih sila i pomaka. Naprezanja u tankoj (nepoznata dimenzija) ograničenoj zoni sloma (*Slika 3.4*) nisu ravnomjerno raspoređena i deformacije se ne mogu utvrditi. Dakle, uzorak tla je u svakom testu smican pod konstantnom vertikalnom silom koja je duplo veća u svakom testu.

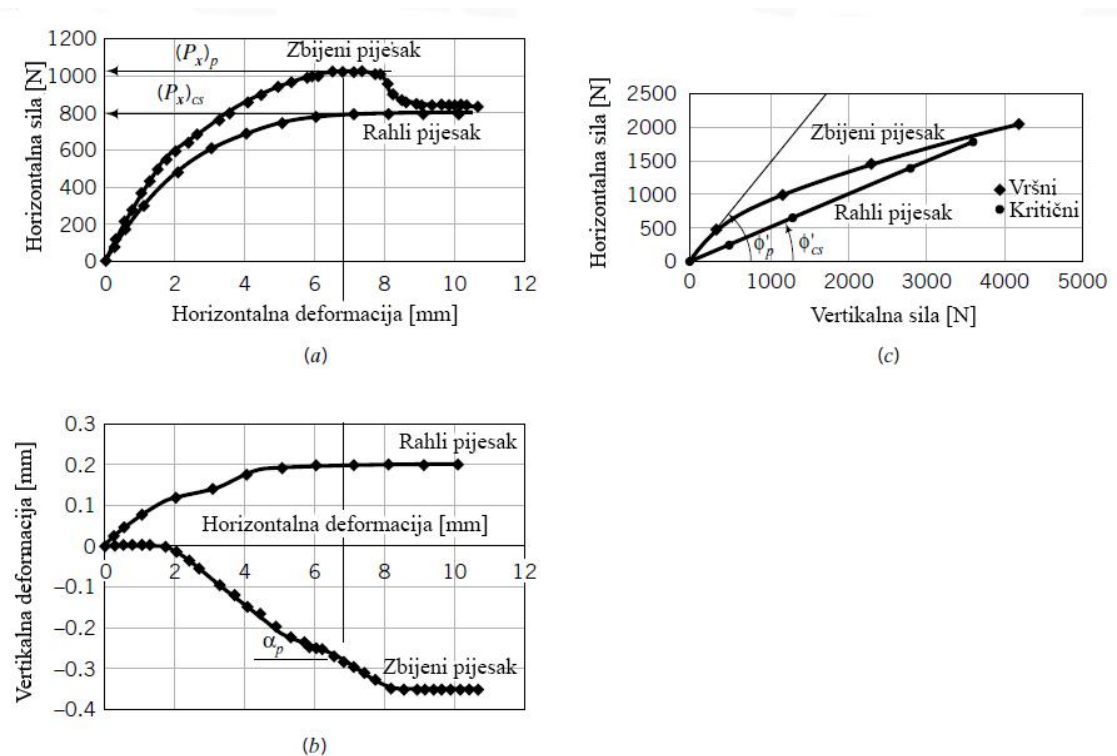


*Slika 3.5. Ugradnja uzoraka u uređaj za izravni posmik: a) metalne kutije; b) mjerenje pokrovne pločice radi određivanja visine uzorka; c) mjerenje dubine metalne kutije radi*



određivanja visine uzorka; d) vaganje kutije bez uzorka radi određivanja mase uzorka; e) ugradnja sipanjem rahlog uzorka; f) ugradnja zbijanjem zbijenog uzorka; g) vaganje kutije s uzorkom radi određivanja mase uzorka; h) uređaj zaizravni posmik bez ugrađenog uzorka; i) ugradnja kutije s uzorkom; j) nanošenje normalnog naprezanja; k) uređaj za izravni posmik s ugrađenim uzorkom; l) prikaz posmične sile i deformacije uzorka za vrijeme trajanja faze smicanja

Podatci dobiveni za svaki test su: horizontalni pomak, horizontalna sila, vertikalni pomak, konstantna vertikalna sila pod kojom je test proveden. Iz tih podataka mogu se odrediti parametri čvrstoće:  $\tau_p$ ,  $\tau_{cs}$ ,  $\varphi'_p$ ,  $\varphi'_{cs}$ ,  $\alpha$ . Coulomb-ov kriterij sloma koristi se za određivanje posmične čvrstoće. Parametri čvrstoće se određuju iz dijagrama podataka kao što je prikazano na Slici 3.6 za pijesak.



Slika 3.6. Rezultati testa izravnog posmika na zbijeni i rahli pijesak (Budhu, 2000)

Rezultati samo jednog testa pod konstantnom vrijednosti  $P_z$  su prikazani na (Slika 3.6 a, b). Rezultati  $(P_x)_p$  i  $(P_x)_{cs}$  naspram  $P_z$  za sve testove prikazani su na (Slika 3.6 c). Ako je tlo dilatantno to će biti prikazano kao vršna posmična sila (Slika 3.6 a zbijeni pijesak) i kao ekspanzija (Slika 3.6 b zbijeni pijesak), a anvelopa sloma će biti krivulja (Slika 3.6 c zbijeni pijesak). Vršno posmično naprezanje je vršna posmična sila podijeljena poprečnim presjekom površine ( $A$ ) uzorka:

$$\tau_p = \frac{(P_x)_p}{A} \quad (3.7)$$

Kritično stanje posmika je:

$$\tau_{cs} = \frac{(P_x)_{cs}}{A} \quad (3.8)$$

Kod grafa vertikalnih naspram horizontalnih sila (*Slika 3.6 c*) točke koje predstavljaju kritične horizontalne sile bi trebale idealno ležati na pravcu koji ide kroz ishodište. Eksperimentalni rezultati obično pokazuju mala odstupanja od tog pravca te se konvencionalno crta pravac koja „najbolje odgovara“. Kut između tog pravca i horizontalne osi je  $\varphi'_{cs}$ . Alternativno:

$$\varphi'_{cs} = \tan^{-1} \frac{(P_x)_{cs}}{P_z} \quad (3.9)$$

Za dilatantna tla, kut između pravca iz ishodišta i svake vršne horizontalne sile koja ne leži na pravcu koji „najbolje odgovara“ (*Slika 3.6 c*) i apscise (os normalnih efektivnih naprežanja) predstavlja vrijednost  $\varphi'_p$  na odgovarajuću vertikalnu silu. Kut  $\varphi'_p$  nije konstantan već varira s veličinom normalnih efektivnih naprežanja ( $P_z/A$ ). Obično normalna efektivna naprežanja pod kojima je određen  $\varphi'_p$  trebaju odgovarati maksimalnim očekivanim normalnim efektivnim naprežanjima na terenu. Vrijednost  $\varphi'_p$  je najveća kod najniže vrijednosti nanesenog normalnog efektivnog naprežanja (*Slika 3.6 c*).  $\varphi'_p$  odredi se crtanjem pravca iz ishodišta do točke koja predstavlja vršnu horizontalnu silu kod željene normalne sile te mjerenjem kuta između tog pravca i horizontalne osi. Alternativno:

$$\varphi'_p = \tan^{-1} \frac{(P_x)_p}{P_z} \quad (3.10)$$

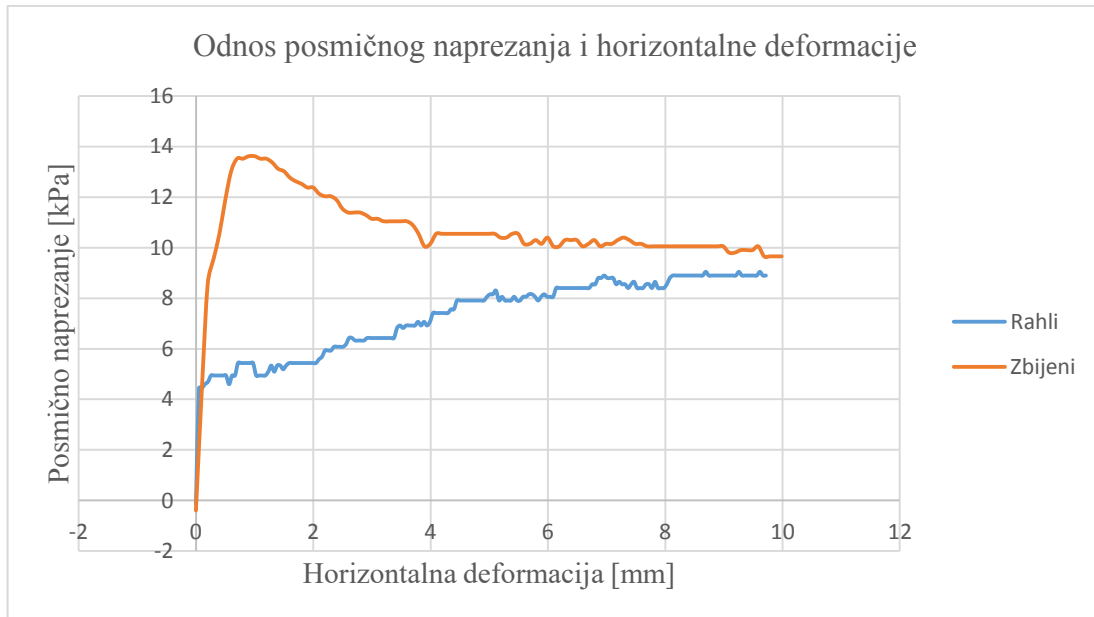
Također se može odrediti vršni kut dilatacije direktno za svaki test iz dijagrama horizontalnih naspram vertikalnih pomaka (*Slika 3.6 b*). Vršni kut dilatacije je:

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left( \frac{-\Delta z}{\Delta x} \right) \quad (3.11)$$

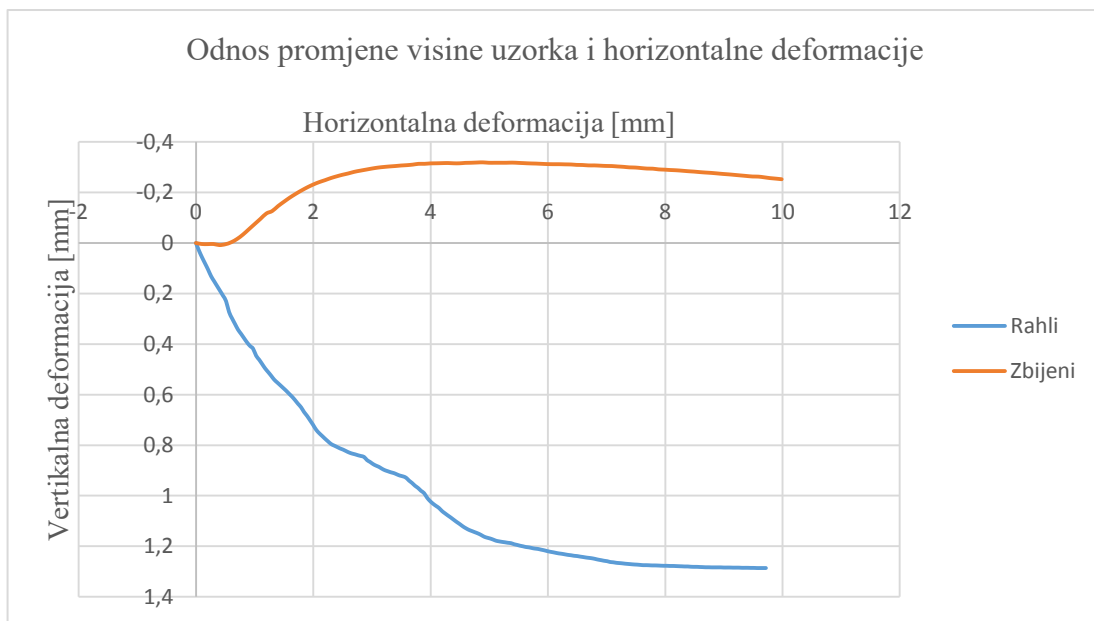
Također se može odrediti pomoću izraza:

$$\alpha_p = \varphi'_p - \varphi'_{cs} \quad (3.12)$$

Slika 3.7 i 3.8 prikazuju rezultate za rahli i zbijeni uzorak koji je smican pod vertikalnim naprežanjem od 13,7 kPa. Rezultati za rahli uzorak preuzeti su iz [3].

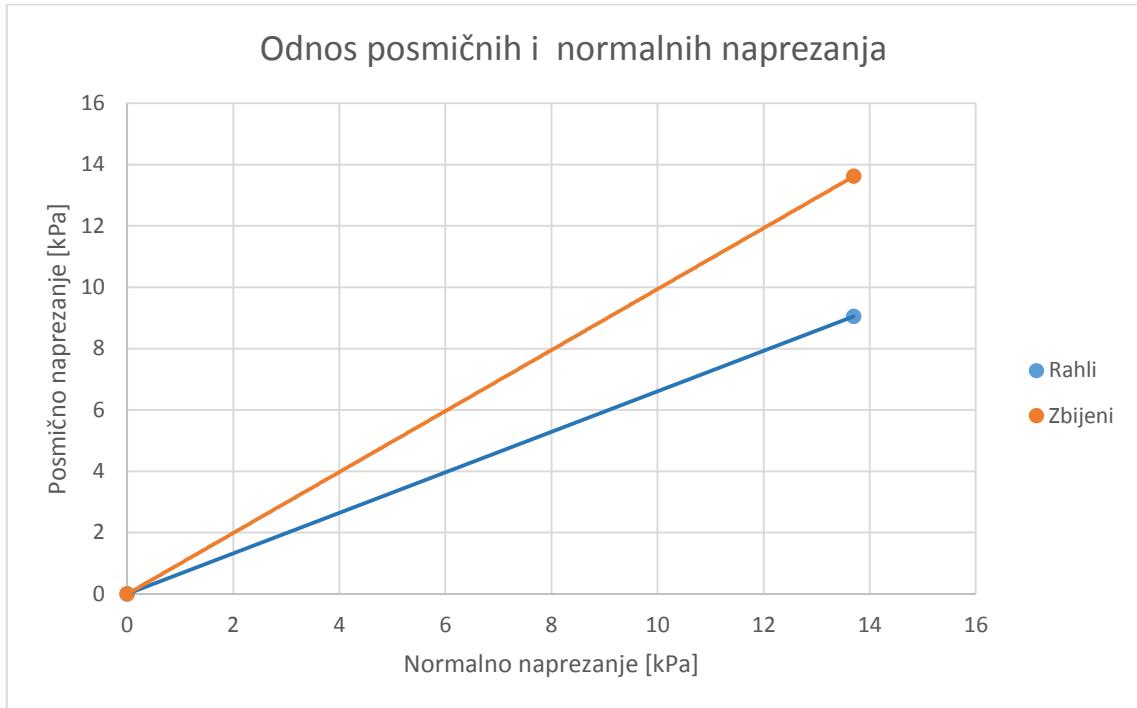


Slika 3.7. Odnos posmičnog naprežanja i horizontalne deformacije za uzorke smicane pod vertikalnim naprežanjem od 13,7 kPa



Slika 3.8. Odnos promjene visine uzorka i horizontalne deformacije za uzorke smicane pod vertikalnim naprežanjem od 13,7 kPa

Slika 3.9. prikazuje odnos posmičnih i normalnih naprezanja te su pomoću jednadžbi (3.9) i (3.10) dobivene vrijednosti kuta unutarnjeg trenja za vršno ( $\varphi'_p$ ) i kritično stanje ( $\varphi'_{cs}$ ) te iznos kuta unutrašnjeg trenja izračunat prema jednadžbi (3.12) čiji iznosi su prikazani u *Tablica 3.1.*



Slika 3.9. Odnos posmičnih i normalnih naprezanja

Tablica 3.1. Izračunate vrijednosti kuta unutarnjeg trenja za vršno ( $\varphi'_p$ ) i kritično stanje ( $\varphi'_{cs}$ ) te iznos kuta dilatacije za smicanje pod različitim vrijednostima vertikalnih naprezanja

Normalno Naprezanje [kPa]	Kut unutarnjeg trenja za vršno stanje ( $\varphi'_p$ ) [°]	Kut unutarnjeg trenja za kritično stanje ( $\varphi'_{cs}$ ) [°]	Kut dilatacije ( $\alpha_p$ ) [°]
13,7	44,39203	32,98026	11,41177

## 4. ZAKLJUČAK

Kut dilatacije kontrolira količinu plastičnih volumetrijskih deformacija razvijenih tokom posmika. Ispitivanja pokazuju da uzorci pijeska različite zbijenosti, koji se smiču pri jednakom vertikalnom naprezanju, dolaze u slom približno pri jednakom koeficijentu pora. Pri velikim deformacijama koeficijent pora ostaje isti sa daljnjim smicanjem, uz isto posmično naprezanje, te kažemo da se pijesak nalazi u kritičnom stanju. Ispitivanja također pokazuju da prilikom smicanja pijeska dolazi do značajne promjene volumena ugrađenih uzoraka, pri čemu se početno zbijeni uzorci razrahljuju, a rahli uzorci zbijaju. Do promjene volumena dolazi zbog zrnate strukture pijeska za koju je karakteristično da prilikom smicanja nužno dolazi do preraspodjele zrna u zoni smicanja, čime se mijenja volumen početne strukture. Zbog djelovanja dilatacije zbijeni uzorci pijeska postižu veću čvrstoću nego rahli uzorci pri istom srednjem efektivnom naprezanju. Kada se govori o čvrstoći pijeska treba imati na umu da ona ovisi o uvjetima naprezanjima i deformacijama u kojem se nalazi pijesak. Ovisno o veličini deformacije razlikujemo čvrstoću za kritično stanje koja se javlja pri velikim posmičnim deformacijama te vršnu čvrstoću koja se za zbijenije pijeske javlja pri znatno manjim posmičnim deformacijama. Za kritično stanje karakteristično je da se pijesak smiče pri konstantnom posmičnom naprezanju bez daljnje promjene volumena. Vršna čvrstoća kod zbijenog pijeska veća je od čvrstoće za kritično stanje, a rezultat je različitih utjecaja koji se javljaju prilikom smicanja zrnatog materijala pijeska među koje spadaju kontaktno trenje među česticama pijeska, preraspodjela čestica, drobljenje zrna te dilatacija. S obzirom da se trenje među česticama i kut unutarnjeg trenja za kritično stanje mogu smatrati konstantnim za dani pijesak, glavni utjecaj na pojavu vršne čvrstoće ima dilatacija pijeska. Ispitivanja pokazuju da taj doprinos ovisi o zbijenosti pijeska te o srednjem efektivnom naprezanju.

## 5. POPIS LITERATURE

1. Budhu, M.: Soil Mechanics & Foundations, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2000.
2. Maksimović, M. M.: Mehanika tla, 4. izdanje, AGM knjiga, Beograd, 2008.
3. Grediček, D.: Odaziv nekoherentnog tla na djelovanje posmičnih sila s obzirom na stanje zbijenosti, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin, 2011.
4. Strelec, S.: Podpovršinski istražni radovi, Interna skripta, Geotehnički fakultet, Varaždin, 2012.
5. Strelec, S., Štuhec, D.: Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Geotehnički fakultet, Varaždin, 2011.
6. Roje – Bonacci, T.: Mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2003.
7. Vlasta Szavits – Nossan, V.: Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. preuzeto (10.6.2017) sa [www.grad.unizg.hr](http://www.grad.unizg.hr)
8. Kvasnička, P.: Mehanika tla, Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007. preuzeto (10.06.2017.) sa [www.rgn.hr](http://www.rgn.hr)
9. Nonveiller, E.: Mehanika tla i temeljenje građevina, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
10. Perić, M.; Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, INA - Industrija nafte, Zagreb, 2007

## 6. POPIS SLIKA

Slika 2.1. *Fazni dijagram tla i oznake volumena i masa*

Slika 2.2. *Rahla ili kubična (a) i zbijena ili heksagonalna struktura (b)*

Slika 2.3. *Granulometrijski dijagram*

Slika 2.4. *Mohr – Coulomb-ov zakon sloma (Szavits-Nossan)*

Slika 2.5. *Ponašanje tla pri smicanju (Maksimović, 2008)*

Slika 2.6. *Posmična deformacija Tip I i Tip II tla (Budhu, 2000)*

Slika 2.7. *Odziv tala na smicanje (Budhu, 2000)*

Slika 2.8. *Efekti povećanja normalnih efektivnih naprežanja na odziv tala*

Slika 2.9. *a) Klizanje drvenog bloka. b) Klizna ploha u tlu (Budhu, 2000)*

Slika 2.10. *Raspored kuglica koje predstavljaju rahli i zbijeni pijesak (Budhu, 2000)*

Slika 2.11. *Simulacija sloma u zbijenom pijesku (Budhu, 2000)*

Slika 2.12. *Efekti dilatacije na Coulomb-ovu anvelopu sloma (Budhu, 2000)*

Slika 2.13. *Mohr-ova kružnica deformacija i kut dilatacije (Budhu, 2000)*

Slika 3.1. *Sijanje uzorka*

Slika 3.2. *Granulometrijska krivulja*

Slika 3.2. *Postupak određivanja specifične gustoće tla*

Slika 3.3. *Određivanje minimalnog i maksimalnog koeficijenta pora*

Slika 3.4. *Uređaj za izravni posmik*

Slika 3.5. *Ugradnja uzoraka u uređahj za izravni posmik*

Slika 3.6. *Rezultati testa izravnog posmika na zbijeni i rahli pijesak (Budhu, 2000)*

Slika 3.7. *Odnos posmičnog naprežanja i horizontalne deformacije za uzorke smicane pod vertikalnim naprežanjem od 13,7 kPa*

Slika 3.8. *Odnos promjene visine uzorka i horizontalne deformacije za uzorke smicane pod vertikalnim naprežanjem od 13,7 kPa*

Slika 3.9. *Odnos posmičnih i normalnih naprežanja*

## 7. POPIS TABLICA

Tablica 2.1. *Volumenski i maseni odnosi*

Tablica 2.2. *Opis zrnatih tala na temelju relativne gustoće i poroznosti (Budhu, 2000)*

Tablica 2.3. *USCS klasifikacija tla*

Tablica 3.1. *Izračunate vrijednosti kuta unutarnjeg trenja za vršno ( $\varphi'_p$ ) i kritično stanje ( $\varphi'_{cs}$ ) te iznos kuta dilatacije za smicanje pod različitim vrijednostima vertikalnih naprezanja*