

# Određivanje čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje

---

**Kamenar, Nika**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:558162>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Nika Kamenar**

**Određivanje čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski sveučilišni studij  
Mehanika tla i stijena**

**Nika Kamenar  
0114035262**

**Određivanje čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

## **IZJAVA**

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Nika Kamenar

U Rijeci, 14.09.2023.

## IZJAVA

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

### **Istraživanje klizišta korištenjem uređaja za prstenasto smicanje**

Voditelj projekta	doc. dr. sc. Martina Vivoda Prodan
Šifra projekta	ZIP-UNIRI-1500-1-22
Financijer projekta	<u>Sveučilište u Rijeci</u>
Pravna nadležnost	<u>Republika Hrvatska</u>

U Rijeci, 28.08.2023.

Mentor:



## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Martini Vivodi Prodan na dopuštenju i mogućnosti rada u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta Rijeka te na korištenju uređaja za prstenasto smicanje i na pomoći pri obradi rezultata. Također, zahvaljujem se i laborantu Juraju Stelli na pomoći pri radu s uređajem.

## Sažetak

Tema ovog završnog rada određivanje je čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje. Prilikom izrade rada provedeno je više pokusa u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci u uređaju za prstenasto smicanje modela ICL-1. Za sve pokuse koristili su se uzorci jednoliko graduiranog pijeska korištenog u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja“ (ModLandRemSSU). Uzorak je ispitivan u dreniranim uvjetima pri različitim vrijednostima efektivnih normalnih naprezanja od 32, 60, 120 i 200 kPa. U sklopu ispitivanja izvršena je konsolidacija, a kasnije se uzorak smicao uz povratni pritisak i konstantni prirast posmičnog pomaka u uređaju za prstenasto smicanje.

U radu je opisan povijesni razvoj, koncept, građa uređaja i postupak ispitivanja u uređaju, te opis uzorka tla. Rezultati ispitivanja su prikazani u krajnjem poglavlju u kojem su dani vršni i rezidualni parametri Mohr – Coulombovog kriterija čvrstoće pijeska.

Ključne riječi: uređaj za prstenasto smicanje, efektivno normalno naprezanje, posmična čvrstoća, vršna čvrstoća, rezidualna čvrstoća

## **Abstract**

The topic of this final paper is the determination of the sand strength parameters using ring shear apparatus. During the preparation of the thesis, several tests were made in the Geotechnics Laboratory of the Faculty of Civil Engineering Rijeka in the ICL-1 ring shear apparatus. For all tests, samples of uniformly graded sand were used as part of the scientific research project of the Croatian Science Foundation "Physical modeling of the behavior of structures for landslide rehabilitation under static and seismic conditions" (ModLandRemSSU). The sample was tested in drained conditions at different values of effective normal stresses of 32, 60, 120 and 200 kPa. As part of the test, consolidation was carried out, and later the sample was sheared with return pressure and constant increase in shear displacement in the ring shear apparatus.

The paper describes the historical development, concept, structure of the apparatus and the test procedure in the apparatus, as well as a description of the soil sample. The results are presented in the final chapter where the peak and residual parameters of the Mohr – Coulomb sand strength criterion are given.

Key words: ring shear apparatus, effective normal stress, shear strength, peak strength, residual strength



## **SADRŽAJ:**

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. POVIJESNI RAZVOJ UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE</b> .....	2
<b>3. KONCEPT UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE</b> .....	4
<b>4. GRAĐA I SASTAVNI DIJELOVI UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE</b> .....	8
<b>5. POSTUPAK ISPITIVANJA U UREĐAJU ZA PRSTENASTO SMICANJE</b> .....	17
5.1. Pripremanje uzorka .....	17
5.2. Prilagođavanje razmaka .....	18
5.3. Saturacija posmične ćelije/uzorka .....	18
5.4. Konsolidacija uzorka.....	20
5.5. Smicanje uzorka .....	20
<b>6. OPIS UZORKA TLA</b> .....	22
6.1. Posmična čvrstoća tla .....	22
6.2. Značajke uzorka tla .....	24
<b>7. REZULTATI ISPITIVANJA PIJESKA U UREĐAJU ZA PRSTENASTO SMICANJE</b> .....	28
7.1 Rezultati inicijalnih ispitivanja .....	28
7.2. Rezultati konsolidacije uzoraka pijeska .....	29
7.3. Rezultati prstenastog smicanja uzorka pijeska .....	30
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	35

## **POPIS SLIKA**

Slika 1.: Koncept uređaja za prstenasto smicanje

Slika 2.: Uvjeti naprezanja na kosini i u uređaju za posmično smicanje

Slika 3.: Tipični graf pravca efektivnog naprezanja za nedrenirani postupak ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje

Slika 4.: Dijelovi uređaja za prstenasto smicanje

Slika 5.: Mehanička struktura uređaja

Slika 6.: Prstenasti oblik uzorka

Slika 7.: Poprečni presjek posmične ćelije i uvećani prikaz rubova

Slika 8.: Prikaz ventila, drenaže i mjerača pornih pritisaka

Slika 9.: Postupak ugrađivanja uzorka

Slika 10.: Postupak izravnavanja uzorka nožićem

Slika 11.: Prikaz gornjeg ventila

Slika 12.: Prikaz software-ske aplikacije uređaja za prstenasto smicanje

Slika 13.: Mohr – Coulombov zakon posmične čvrstoće

Slika 14.: Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće

Slika 15.: Granulometrijska krivulja jednoliko graduiranog pijeska

Slika 16.: Posmično naprezanje – posmični pomak pri inicijalnom ispitivanju na vodi

Slika 17.: Vertikalni pomak u vremenu tijekom konsolidacije

Slika 18.: Posmično naprezanje – posmični pomak za različite vrijednosti efektivnog normalnog naprezanja

Slika 19.: Trag efektivnih naprezanja

Slika 20.: Vršna i rezidualna čvrstoća pri efektivnim normalnim naprezanjima od 32, 60, 120 i 200 kPa

Slika 21.: Mohr – Coulombovi pravci vršne i rezidualne čvrstoće

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1.: Značajke prijašnjih uređaja za prstenasto smicanje u usporedbi sa ICL-1 i ICL-2

Tablica 2.: Parametri ispitivanog pijeska

Tablica 3.: Rezidualna čvrstoća pri inicijalnom ispitivanju

Tablica 4.: Vrijednosti normalnog naprezanja, efektivnog normalnog naprezanja, vertikalnog otpora brtve i povratnog pritiska

Tablica 5.: Vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće pijeska

Tablica 6.: Vrijednosti vršnih i rezidualnih parametara čvrstoće

## 1. UVOD

Prilikom gradnje iznimno je važno na kakvom tlu gradimo objekt ili pak postavljamo temelje. Uvelike nam u tome pomažu značajke tla na kojem se određeni objekt gradi. Tlo kao površinski sloj Zemlje ima različit sastav. Tla se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine: krupnozrnata i sitnozrnata te se dalje klasificiraju prema veličini zrna kao šljunak, pijesak, prah i glina. [1] Za svaki određeni sastav tla svakako je važno odrediti njegovu nosivost te parametre čvrstoće kako bi se moglo prepoznati hoće li i kada doći do potencijalnog sloma tla. Osim sloma tla, može se pojaviti i klizište. Ono je opisano kao dio padine na kojem je došlo do klizanja tla zbog poremećaja u stabilnosti. [2] Određivanje parametara čvrstoće tla stoga se provodi na različitim uređajima koji nam omogućuju provjeru i određivanje spomenutih parametara različitih vrsta tla.

Uređaji koji se koriste za određivanje čvrstoće tla u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci su uređaj za izravno smicanje, uređaj za triaksijalno smicanje te uređaj za prstenasto smicanje. [3] Upravo će se u ovom završnom radu ispitivati značajke čvrstoće pijeska u uređaju za prstenasto smicanje.

Uređajem za prstenasto smicanje simulira se nastajanje i formiranje posmične površine klizišta i kretanje nakon sloma. Promatraju se posljedice koje se javljaju zbog mobiliziranog posmičnog otpora kao i posmični pomak nakon sloma te generirani porni pritisak vode. [4] Zbog navedenih svojstava uređaj ima velike prednosti u određivanju parametara čvrstoće.

Ovaj završni rad podijeljen je u osam poglavlja te će se u njima nastojati pobliže objasniti građa i koncept uređaja, postupak ispitivanja uzorka pijeska i dobiveni rezultati ispitivanja. Prilikom izrade rada ispitivanjima u laboratoriju dobili smo određene podatke koji će nam služiti kao podloga za određivanje čvrstoće pijeska što je ujedno i cilj ovoga rada. Dijagrami dobiveni konsolidacijom i smicanjem iznijeti će se na kraju te će se na temelju rezultata donijeti zaključak o parametrima čvrstoće ispitanog uzorka.

## 2. POVIJESNI RAZVOJ UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE

Uređaj za prstenasto smicanje prvotno je dizajniran kako bi služio za proučavanje i ispitivanje rezidualne posmične čvrstoće tla koja se nalazi duž klizne plohe pri velikim posmičnim pomacima klizišta, zbog toga što omogućuje neograničenu deformaciju uzorka tla. [4]

Prvo predstavljanje uređaja i konfiguracija ispitivanja bila je uvedena od strane Hvorsleva 1939. godine. Njegovim uređajem je uzorak smaknut na predefiniranoj plohi na razmaku između gornjeg i donjeg ograničavajućeg prstena. [4]

Uređaj za prstenasto smicanje koji su razvili znanstvenici i inženjeri Imperial College of Technology i norveškog geotehničkog instituta, tj. Bishopov tip široko je prihvaćeni i najpoznatiji je tip uređaja. Ima sposobnost mjeriti trenje između uzorka i bočnih stijenki te je takva prednost vrlo važna kako bi se osiguralo precizno mjerenje ukupnog normalnog naprezanja koje djeluje na uzorak tla prilikom ispitivanja. Osmišljen je za proučavanje intervala nakon vrha krivulje posmične čvrstoće i pomaka krivulje s naglaskom na rezidualnu čvrstoću koja se javlja u sporim glinovitim klizištima. Iako, Bishopov tip uređaja nije mogao provoditi nedrenirana i ciklička ispitivanja. [4] [5]

Od 1984. godine, Sassa je zajedno sa svojim kolegama razvio sedam modela uređaja za prstenasto smicanje. [4] Izvorni brzi uređaj za prstenasto smicanje (DPRI-1) koristio je konvencionalni motor za kontrolu brzine smicanja i nije omogućavao nanošenje cikličkog posmičnog naprezanja. Prvi uređaj za prstenasto smicanje s dinamičkim opterećenjem (DPRI-3) razvijen je za reprodukciju seizmičkog opterećenja. [4] Nakon DPRI-3 razvijena je serija uređaja za prstenasto smicanje s mogućnošću nanošenja dinamičkog opterećenja koji uključivao različite značajke (DPRI-4, DPRI-5, DPRI-6 i DPRI-7) i omogućio simulaciju oba, statička i dinamička, opterećenja u nedreniranim uvjetima. [4]

Uređaj za prstenasto smicanje ima dvije namjene i može se koristiti kod:

- osnovnog ispitivanja tla (kako bi se dobili mehanički parametri)
- simulacije klizišta

Noviji, ICL-1, prenosivi uređaj za prstenasto smicanje, izrađen je 2010. godine kao dio projekta SATREPS – a i JICA/JST – a „ Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta radi smanjivanja posljedica klizišta i poplava u Hrvatskoj “. U usporedbi s prethodnim uređajima, od DPRI 1 – 7, novi uređaj ima manje dimenzije, ali bolje značajke. Može zadržavati nedrenirane uvjete do 1 MPa pornog pritiska (skoro dva puta više nego prethodni uređaji) i nanositi opterećenje normalnog naprezanja do 1 MPa. Navedene karakteristike ga čine pogodnim za ispitivanje velikih i dubokih klizišta. Cilj je bio izraditi mnogo jeftiniji i lakše prenosivi uređaj za prstenasto smicanje koji bi se koristio u različitim partnerskim organizacijama, te koristio standardnu električnu energiju koja je dostupna svugdje. [4]

Još jedan od modela ICL-1, model ICL-2, izrađen je 2014. godine. Jedna od njegovih najznačajnijih karakteristika je kapacitet normalnog opterećenja i nedrenirani kapacitet koji seže do 3000 kPa. [6] Značajke prijašnjih uređaja u usporedbi s novima prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Značajke prijašnjih uređaja za prstenasto smicanje u usporedbi sa ICL-1 i ICL-2 [6]

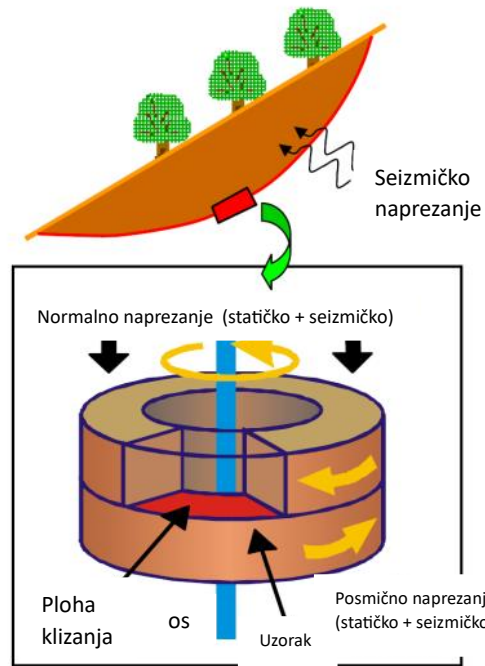
Značajke i parametri	Bishop i drugi (1971)	Hungr i Morgenstern (1984)	Tika (1989)	Garga i Infante Sedano (2002)	DPRI-3 (Sassa 1992)	DPRI-5 (Sassa 1997)	DPRI-6 (Sassa 1997)	DPRI-7 (Sassa i drugi 2004)	ICL-1 (Sassa i drugi 2012)	ICL-2 (Sassa i drugi 2014)
Unutarnji promjer (mm)	101.6	220	101.6	92	210	120	250	270	100	100
Vanjski promjer (mm)	152.4	300	152.4	133	310	180	350	350	140	142
Maks. visina uzorka (mm)	19	20	19	20	90	115	150	115	52	52
Posmična površina (cm <sup>2</sup> )	101.34	326.73	101.34	72.45	408.41	141.37	471.24	389.56	75.36	79.79
Maks. normalno naprezanje (kPa)	980	200	980	660	500	2000	3000	500	1000	3000
Maks. porni pritisak (kPa)	nije dostupno	nije dostupno	nije dostupno	nije dostupno	nije dostupno	400-600	400-600	400-600	1000	3000
Maks. posmična brzina (cm/s)	nije dostupno	100	9.33	nije dostupno	30.0	10.0	224	300	5.4	50
Testiranje cikličke kontrole momenta	Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Da	Da	Da	Da
Mogućnost nedreniranog ispitivanja	Ne	Ne	Ne	Ne		Da	Da	Da	Da	Da
Mogućnost kontrole pornog pritiska vode	Ne	Ne	Ne	Ne		Da	Da	Da	Da	Da

### 3. KONCEPT UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE

Uređaj simulira nastajanje i formiranje posmične površine klizišta i kretanje nakon sloma, tj. simulira klizište s fokusom na kliznu plohu. Promatra posljedice koje se javljaju zbog mobiliziranog posmičnog otpora kao i posmični pomak nakon sloma te generirani porni pritisak vode. [4]

Uzorci koji se ugrade uzeti su sa klizišta koje se prije već dogodilo ili se uzima uzorak s pretpostavljene klizišne plohe koja bi se mogla dogoditi u budućnosti. [4] Osim uzoraka s klizišta, u uređaj se mogu ugraditi i različiti uzorci tla koji ne moraju direktno potjecati sa klizišnih ploha. Uzeti uzorak postavlja se u posmičnu ćeliju koji je podijeljen na statični gornji dio i rotirajući, pomični donji dio. [4] Tijekom ispitivanja, uzorak se normalno opterećuje preko posmične ćelije koja je spojena na uljni klip. Donji dio jedinice uređaja se rotira dok je gornji dio pridržan pomoću dvije ćelije za posmični otpor koje ga ujedno i mjere. [7] Sva naprezanja koja se javljaju na potencijalnoj kliznoj plohi (normalno i posmično naprezanje uzrokovano gravitacijom, seizmičko naprezanje uzrokovano potresom te porni pritisak) mogu se mjeriti u jedinici uređaja. Kada su naprezanja dovoljno velika da potaknu uzorak na smicanje, posmična ploha će se formirati unutar jedinice uređaja i rotirajući donji dio početi će se okretati. [8] Nastanak navedenih naprezanja prikazan je Slikom 1. na kojoj je ujedno i objašnjen koncept uređaja.

Tijekom procesa nastanka posmičnog sloma kao i naknadnog pomaka nakon sloma, koji rezultira povećanjem pornog pritiska, mobiliziranog posmičnog otpora i posmičnog pomaka od seizmičkih ili cikličkih opterećenja prate se pomoću ćelija opterećenja i senzora za pomak. [4]



Slika 1.: Koncept uređaja za prstenasto smicanje [4]

Uzimajući u obzir stupac tla po jedinici širine duž kosine, normalno naprezanje koje djeluje na kosini računa se množenjem mase tla ( $m$ ) i gravitacijske sile ( $g$ ). Normalno naprezanje računa se formulom:

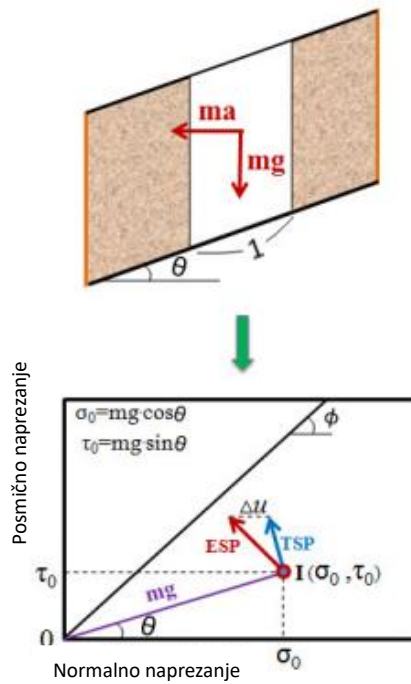
$$\sigma_0 = m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Dok se posmično naprezanje računa kao:

$$\tau_0 = m \cdot g \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

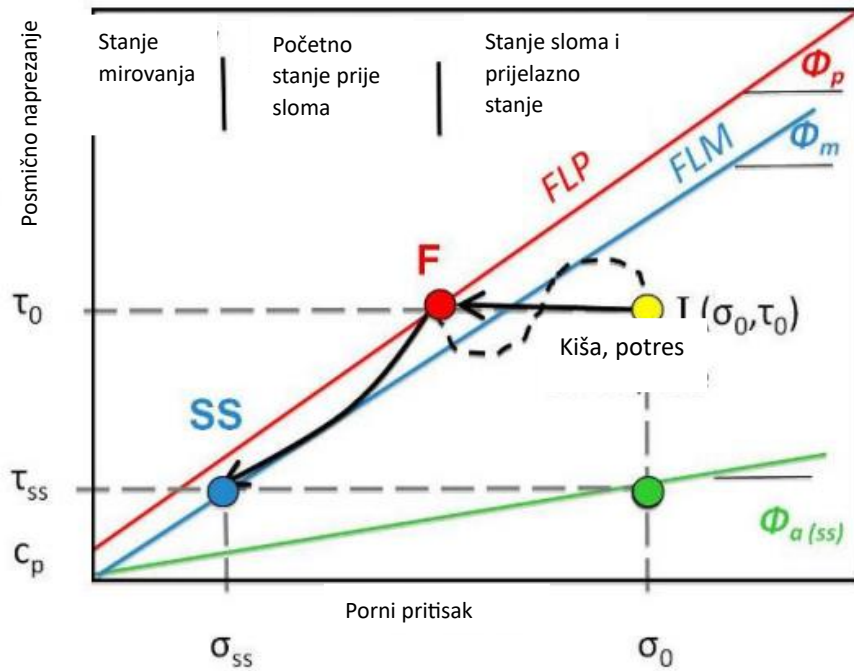
gdje je  $m = \gamma \cdot Z \cdot \cos \theta$  ( $\gamma$  – zapreminska težina tla,  $Z$  – dubina,  $\theta$  – kut kosine ). [6]





Slika 2.: Uvjeti naprezanja na kosini i u uređaju za prstenasto smicanje [4]

Inicijalna točka naprezanja na kosini prije kiše ili potresa je točka I ( $\sigma_0, \tau_0$ ). Tijekom seizmičkog opterećenja, pravac naprezanja može biti predstavljen kao pravac ukupnog naprezanja (TSP), kada nema purnog pritiska ili kao pravac efektivnog naprezanja (ESP), kada se purni pritisak javlja (Slika 2.). Ako dolazi do horizontalnog nanošenja posmičnog naprezanja, tada je pravac ukupnog naprezanja okomit. [6] Kada je stvoren posmičnim opterećenjem, višak purnog pritiska pomiče efektivno naprezanje koje time dolazi do granice sloma, a prelaskom granice događa se slom. [4] Također, Slikom 3. prikazan je pravac efektivnog naprezanja za različita stanja (stanje mirovanja, stanje sloma i stanje prije sloma).



Slika 3.: Tipični graf pravca efektivnog naprezanja za nedrenirani postupak ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje [4]

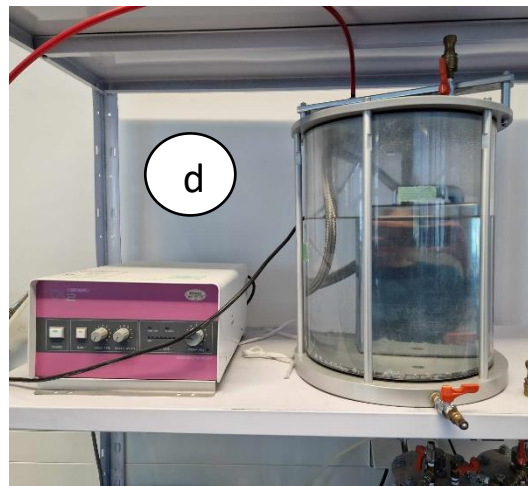
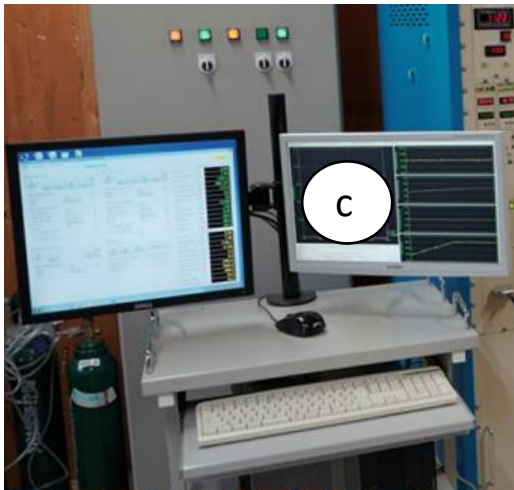
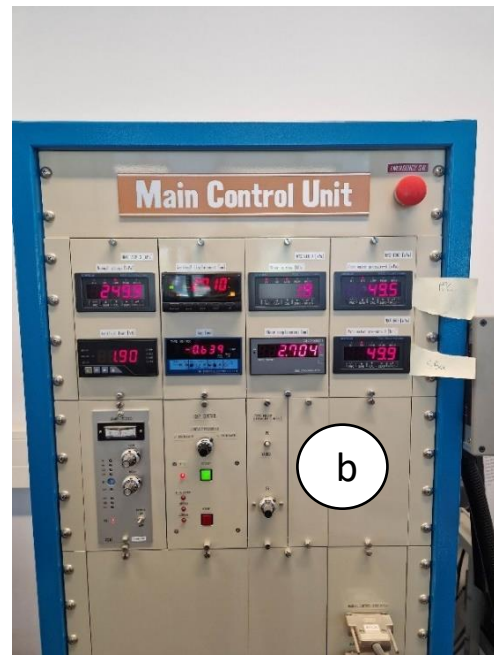
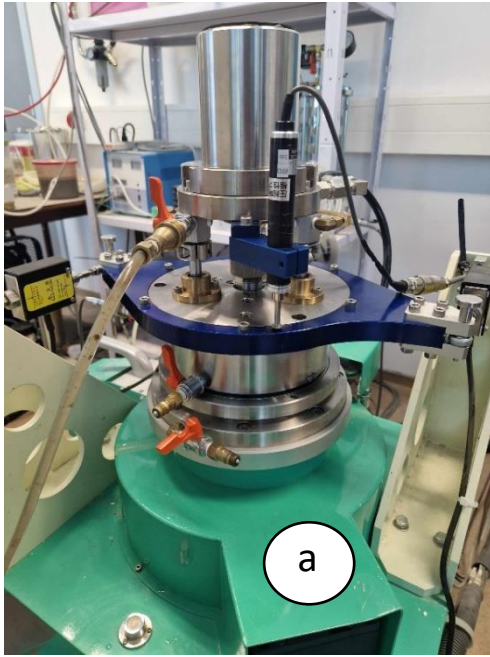
#### 4. GRAĐA I SASTAVNI DIJELOVI UREĐAJA ZA PRSTENASTO SMICANJE

Model ICL-1, koji je smješten na ručnim kolicima, teži do 100 kilograma, tlocrtna dimenzija je 50x50 cm, a maksimalna visina mu je 95 cm. [9] Dimenzije uređaja za prstenasto smicanje uvelike su reducirane u odnosu na prijašnje DPRI modele. Takva redukcija dimenzija bila je moguća zbog manje brzine smicanja i novog sustava opterećenja kod kojeg se normalno naprezanje nanosi povlačenjem središnje osi uređaja. U prijašnjim uređajima opterećenje se nanosilo pomoću velikih okvira koji su vertikalnu silu prenosili na uzorak. [9] Uz redukciju dimenzija novi model može nanositi i veće normalno naprezanje te veći porni pritisak. [4]

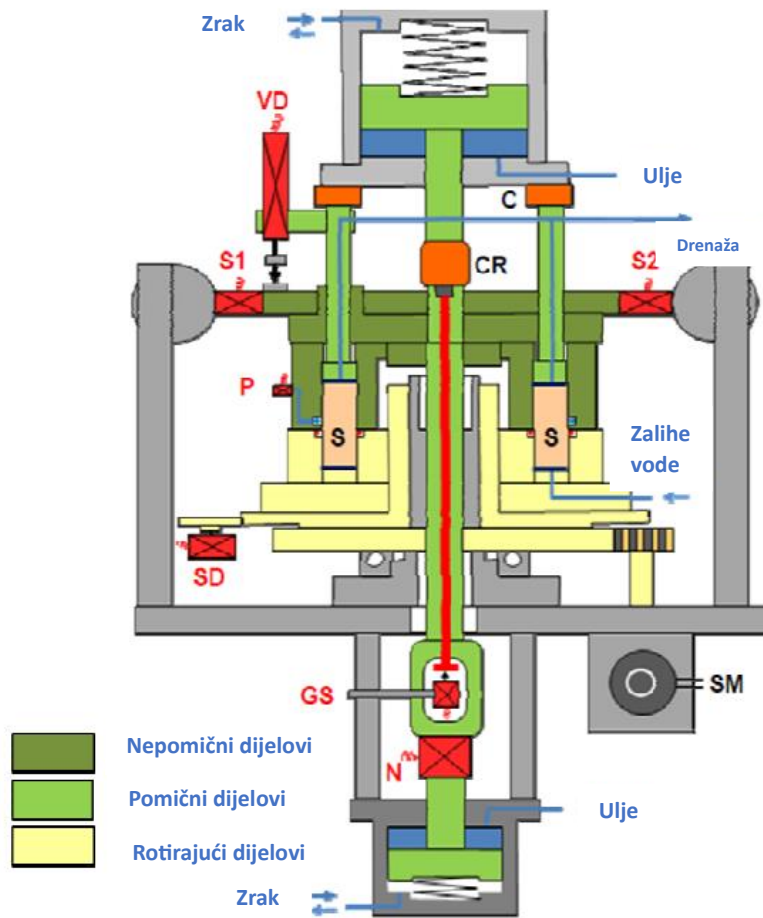
Kako bi uređaj mogao smicati uzorke pri velikoj brzini, potreban je servo-motor koji ima veliki kapacitet i visoko električno napajanje. Međutim, rezultati testiranja pokazali su da generirani porni pritisak i mobilizirani posmični otpor u stanju mirovanja ne ovise o brzini, već o posmičnom pomaku. Prema tome, maksimalna brzina smicanja u uređaju iznosi 5,4 cm/s. Zbog manje brzine smicanja mogu se koristiti manji servo-motori koji koriste normalnu električnu energiju te time ujedno i omogućuju smanjenje dimenzija. Servo-motor od 200 W koristi se za opterećenje normalnim naprezanjem, a servo-motor od 400 W za opterećenje posmičnim naprezanjem. [4]

Prijenosni uređaj za prstenasto smicanje sastoji se od nekoliko odvojenih dijelova koji su lako prenosivi:

- Instrumentalna jedinica (Slika 4a) – sastavljena je od posmične ćelije koja sadrži tri servo-motora koji nanose normalno i posmično naprezanje te kontrolu razmaka; senzora za vertikalne pomake, posmične pomake i razmake, mjerača pornih pritisaka, ćelije za nanošenje normalnog naprezanja te dvije ćelije za nanošenje posmičnog otpora
- Nadzorna jedinica (Slika 4b)
- Kontrolna jedinica – za praćenje i prikupljanje podataka pomoću software aplikacije (Slika 4c)
- Sustav za deaeriranje vode, uzorka i kontrolu pornih pritisaka (Slika 4d) [4]



Slika 4.: Dijelovi uređaja za prstenasto smicanje: a – instrumentalna jedinica, b – nadzorna jedinica, c – kontrolna jedinica, d – sustav za deaeriranje vode [6]



Slika 5.: Mehanička struktura uređaja (S – uzorak, CR – prsten za povezivanje, C – spoj, N – ćelija za opterećenje normalnim naprezanjem; S1,S2 – ćelija za opterećenje posmičnim naprezanjem, P – mjerac pornog pritiska, GS – senzor za razmak između gornjeg i donjeg dijela posmične ćelije, VD – mjerac vertikalnog pomaka, SD – mjerac posmičnog pomaka) [9]

## Posmična ćelija

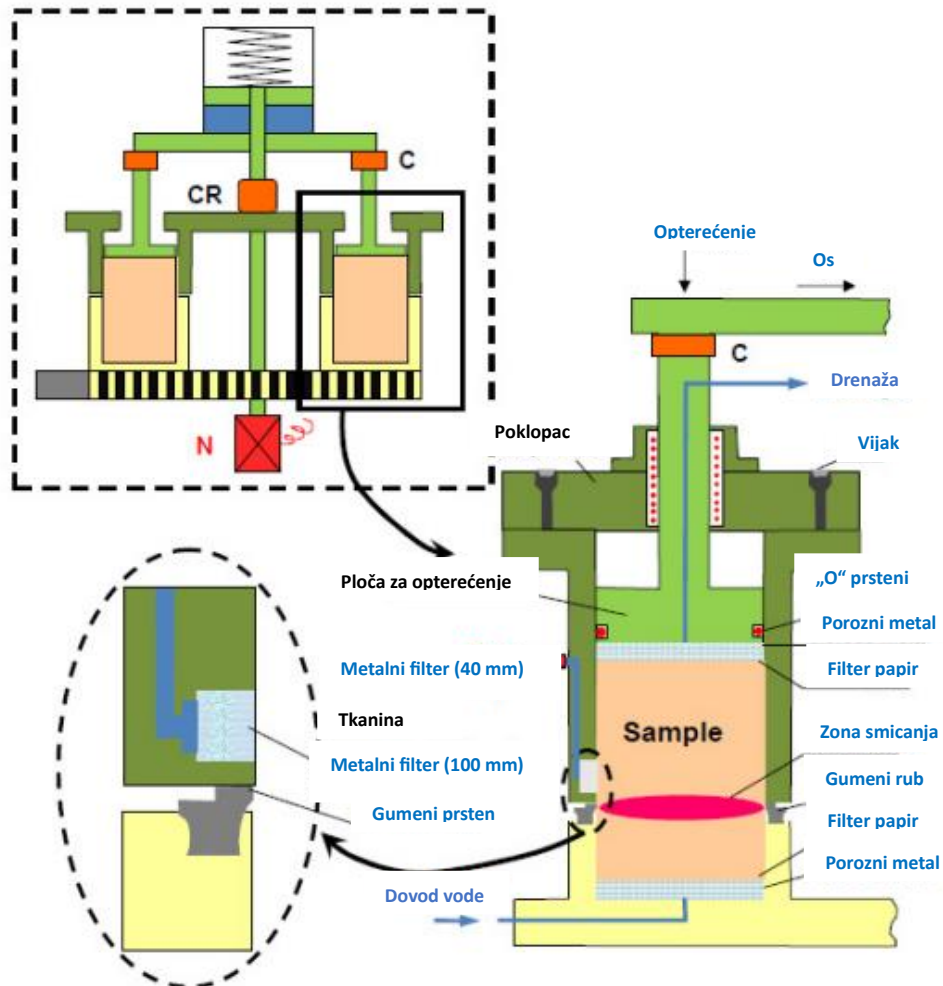
Najznačajniji dio uređaja za prstenasto smicanje je njegova posmična ćelija. Uzorak koji se nalazi u posmičnoj ćeliji ugrađen je u donji prsten uređaja, te zbog prstenaste građe i uzorak poprima oblik prstena (Slika 6.). Tijekom ispitivanja, kao što je navedeno i u poglavlju „Koncept uređaja“, uzorak je opterećen preko prstenaste ploče koja je spojena na uljni klip. Donji dio jedinice uređaja se rotira dok je gornji dio pridržan pomoću dvije ćelije za posmični otpor koje ga ujedno i mjere. Kada nastupi slom, prstenasti uzorak se smiče relativnim rotacijskim pokretom, a donji dio se rotira zajedno sa rotacijskom jedinicom. [4]



Slika 6.: Prstenasti oblik uzorka

Unutarnji promjer posmične ćelije je 10 cm, dok je vanjski 14 cm. Sveukupna posmična površina iznosi 75,36 cm<sup>2</sup>. Visina posmične ćelije sastoji se od dva dijela. Donji dio posmične ćelije, visina  $h_1$ , sastavljena je od poroznog metala i gumenog prstena. Ona može varirati od 16,3 do 10,3 cm visine, ovisno o broju poroznih metala.

Gornji dio posmične ćelije, visina  $h_2$ , ovisi o promjeni volumena tijekom konsolidacije, prema kojoj bi minimalna visina uzorka trebala iznositi od 33 do 40 mm (2 cm iznad gumenog ruba). Visina ugrađenog uzorka ovisi o njegovim karakteristikama, a ako uzorak nije dovoljno visok, ploča kojom se nanosi opterećenje neće opteretiti uzorak i normalno naprezanje neće biti nanoseno na uzorak. [4]



Slika 7.: Poprečni presjek posmične ćelije i uvećani prikaz rubova [4]

Kako bi se omogućila drenaža, osam poroznih diskova i metalnih filtera učvršćeno je na ploču za opterećenje i na bazu posmične ćelije. Osam noževa je također smješteno u ploči za opterećenje i u bazi posmične ćelije kako bi se osigurala prevencija klizanja između dviju polovica uzorka koji se nalaze ugrađeni u posmičnu ćeliju. Uz to, drenaža je omogućena ako su ventili (gornji i donji) otvoreni tijekom konsolidacije i dreniranih uvjeta. U suprotnom, ako su ventili zatvoreni, postižu se nedrenirani uvjeti. [4]

## Prevenција propuštanja vode i mjerenje pornih pritisaka

Jedan od problema tijekom konsolidacije i smicanja kod uređaja je sprječavanje propuštanja vode i uzorka kroz praznine između gornjeg dijela i donjeg dijela posmične ćelije. Taj problem riješen je postavljanjem gumenih rubova na donji par rotacijskih prstenova posmične ćelije. [4] Gumeni rubovi su pričvršćeni teflonom i prstenovima od nehrđajućeg čelika. Ako dođe do oštećenja ili ako su istrošeni, gumeni rubovi mogu se lako zamijeniti novima odvijanjem teflonskih i nehrđajućih prstenova. [9] Postoje dvije vrste gumeni rubova koji se mogu ugraditi. Prvi ima širinu od 2 mm i indeks tvrdoće od 90°, drugi ima širinu od 3 mm i indeks tvrdoće od 65°. [4]

Prije postavljanja posmične ćelije, gumeni rubovi moraju se pošpricati teflonskim sprejom i premazati vakuumskom silikonskom masti kako bi se smanjilo trenje te spriječilo propuštanje vode. Osim na gumenim rubovima, mašču se također moraju premazati i unutarnji i vanjski prsten gornje posmične ćelije. [4]

Početna kontaktna sila se nanosi kako bi se postigao kontaktni pritisak između gornjeg para prstenova i gumenih rubova. Takva kontaktna sila cijelo vrijeme se održava tijekom ispitivanja preko sustava za kontrolu razmaka, a rangira od 0,8 do 1,5 kN. U ispitivanjima je korištena sila od 1,0 kN. [4]

Uz gumene rubove, nepropusnost vode osiguravaju i O-prstenovi na gornjoj ploči za opterećenje koji su prikazani na Slici 7. . Osim O-prstenova, nepropusnost vode je također osigurana pomoću gumenih rubova koji se nalaze na donjim prstenima uređaja. [9]

Prilikom ispitivanja uzorka mjere se i porni pritisci. Njihovu vrijednost možemo pratiti pomoću dva mjerača pornih pritisaka (PPT1 i PPT2) koji su spojeni na ventile postavljene na žlijebu. Žlijeb, dimenzija 4x4 mm, proteže se po cijelom opsegu unutarnje stijenke gornjeg vanjskog prstena posmične ćelije. [4] Postavljen je 3 mm iznad posmične plohe i prekriven je s dva metalna filtera. Kako se u vanjskom filteru ne bi nakupljale čestice gline i začepile ga, između metalnih filtera nalazi se još jedan papirnati filter koji to sprječava što se jasno vidi na detalju Slike 7. [7]

Kako je i prije navedeno, dva mjerača pornih pritisaka mjere porne pritiske u zoni smicanja. Mjerači pornih pritisaka, ventili i drenaža prikazani su na Slici 8.





Slika 8.: Prikaz ventila, drenaže i mjerača pornih pritisaka

## Nadzorni sustav

Nadzorni sustav sastoji se od dva računala. Svi senzori i ćelije za opterećenje smješteni su na instrumentalnoj jedinici te su povezani s nadzornom jedinicom koja prikazuje senzorne vrijednosti. Te vrijednosti su stvarne i izmjerene su direktno sa uzorka u posmičnoj ćeliji. Nadzorna jedinica ujedno je povezana i sa kontrolnom jedinicom na kojoj se prikazuju testne vrijednosti. Testne vrijednosti i senzorne vrijednosti se razlikuju. [4]

Uzorak je opterećen pločom za opterećenje koju pritišće cilindar vertikalnog opterećenja. [4] Vertikalno opterećenje mjeri se ćelijom za normalno opterećenje čiji je kapacitet 10 kN. Izmjereno vertikalno opterećenje je zbroj opterećenja na gumenom

rubu (kontaktni pritisak), trenja između uzorka i bočnih strana gornje posmične ćelije te težine gornjeg dijela posmične ćelije. [9] Normalno naprezanje koje se javlja na posmičnoj površini, nadzire se preko ćelije opterećenja putem zadržavanja gornje posmične ćelije vertikalno. [4]

Posmično opterećenje koje djeluje na posmičnoj površini nadzire se parom ćelija za posmično opterećenje, od kojih svaka ima kapacitet od 1 kN. Otpor koji djeluje na posmičnoj ravnini izračunava se iz izmjerenih vrijednosti u ćelijama za opterećenje (koje su na Slici 5. označene slovima S1 i S2) zadržavanjem gornje polovice od rotacije u odnosu na naneseo posmično naprezanje na posmičnoj ravnini. Prava posmična čvrstoća uzorka tla izmjerena je vrijednost u ćelijama opterećenja od koje oduzimamo trenje koje se javlja na gumenim rubovima. [6]

Horizontalan posmični pomak prati se pomoću rotacijskog mjerača, a vertikalni pomak uzorka mjeri se pomoću linearnog mjerača koji prati pomak ploče za opterećenje. Ovaj senzor ugrađen je na vertikalni cilindar opterećenja te bi se tijekom smicanja i rotacije morao zaštititi kako ne bi došlo do oštećenja. Maksimalni vertikalni pomak iznosi 25 mm. [4]

Podaci koji uključuju normalno naprezanje  $\sigma$ , posmično naprezanje  $\tau$ , porni pritisak  $u$ , varijacije visine uzorka i posmičnog pomaka, kao i vrijednost razmaka i kontrolnog signala koji je dan servo-motorom, pohranjuju se u osobno računalo. Za praćenje i pohranu podataka koristi se software-ska aplikacija koja je razvijena od Marui & Co., Ltd. Osaka. [6] Izlazna datoteka se kasnije koristi za daljnje analize. [4]

## **Sustav opterećenja**

Statičko, cikličko normalno naprezanje i posmično naprezanje izazvano je klipovima za ulje koji su kontrolirani servo-motorima. Servo pojačalo prima električni signal koji je napajan osobnim računalom. Servo-motor vraća određeni pritisak klipu za ulje odgovaranjem na dani kontrolni signal servo pojačala. Povratni signal od praćenog normalnog opterećenja na potencijalnoj posmičnoj plohi isporučuje se servo

pojačalu. Posmično naprezanje se nanosi putem servo kontrolnog motora preko kontrole posmičnog naprezanja, kontrole brzine ili kontrole pomaka. [4]

### **Sustav kontrole razmaka**

Tijekom ispitivanja, vrijednost razmaka je automatski održana konstantnom preko klipa za ulje koji je kontroliran pomoću trećeg servo-motora. Sustav kontrole razmaka omogućuje sprječavanje propuštanja vode i uzorka tijekom smicanja pri velikoj brzini. [4]

## **5. POSTUPAK ISPITIVANJA U UREĐAJU ZA PRSTENASTO SMICANJE**

Uzorak koji se koristi za ispitivanje može biti suh ili potpuno saturiran, stoga se primjenjuju drugačije metode ovisno o saturaciji uzorka. Obje procedure opisane su u priručniku, te su sažete u nekoliko glavnih koraka. [8]

Procedura ispitivanja sastoji se od koraka navedenih u narednim poglavljima. Inicijalni korak je pripremanje uzorka, zatim slijedi prilagođavanje razmaka, saturacija posmične ćelije/uzorka, konsolidacija i kao posljednji korak slijedi smicanje. Potrebno je navesti kako su ova ispitivanja provedena u dreniranim uvjetima s povratnim pritiskom s konstantnim prirastom posmičnog pomaka.

### **5.1. Pripremanje uzorka**

Prije ispitivanja uzorci trebaju biti pažljivo pripremljeni kako bi se mogla postići potpuna saturacija. Potrebno je navesti kako je prilikom ispitivanja procedura bila modificirana te se nisu slijedili koraci koji su navedeni u priručniku. Uzorku kojeg se ugrađuje u posmičnu ćeliju najprije treba odrediti masu te odrediti koliki volumen stane u posmičnu ćeliju. Izvagani uzorak se zatim postavlja u posudu te se dodavanjem vode određene mase, dva materijala miješaju zajedno. Izračun je pokazao da je potrebno 440,1 g suhe mase pijeska i 8,8 g mase vode. Takav pijesak imao je vlažnost (w) 2% upravo zato jer se pri toj vlažnosti ispitivao pijesak u fizičkom modelu projekta ModLand. Osim navedenog, njegov relativni porozitet (n) iznosio je 0,437. Nakon njihovog dobrog povezivanja uzorak je spreman za ugradnju u posmičnu ćeliju uređaja.

## 5.2. Prilagođavanje razmaka

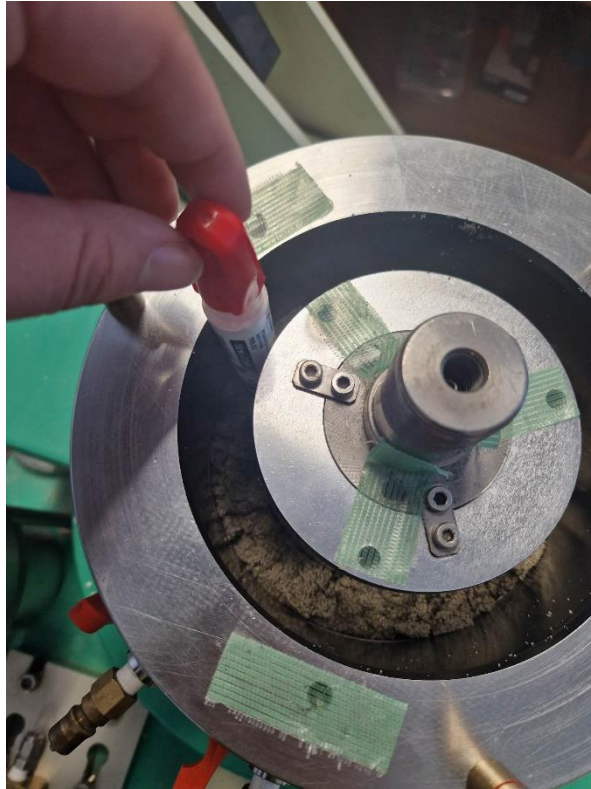
Prvo, vrijednost razmaka trebala bi biti prilagođena tako da se izbjegne propuštanje vode i uzorka. Vrijednost razmaka se prilagođava nanošenjem vertikalnog opterećenja od 0,8 do 1,5 kN na unutarnje i vanjske gumene rubove kako bi se kontaktni pritisak na gumenim rubovima održavao većim nego generirani porni pritisak u posmičnoj ćeliji. [7]

Kada je razmak između gornje i donje posmične ćelije prilagođen, treba ga održavati konstantnim tijekom cijelog ispitivanja. [8] Također, prije svakog postavljanja uzorka i ispitivanja, treba se provesti provjera na propuštanje vode i provjera na trenje gumenog ruba. [4]

## 5.3. Saturacija posmične ćelije/uzorka

Prilikom ispitivanja za potrebe ovog završnog rada, saturacija ćelije provedena je drugačije nego kako je navedeno u priručniku. Najprije je uzorak ugrađen u ćeliju. Prilikom ugrađivanja uzorak je bilo potrebno dobro zbiti kako bi se postigla izračunata visina uzorka koja stane u posmičnu ćeliju (Slika 9.) te je uzorak nakon toga izravnat nožićem određene visine (Slika 10.).

Nakon ugrađivanja uzorka u posmičnu ćeliju, vrši se kontakt između ploče za opterećenje i uzorka nanošenjem vertikalnog opterećenja. Potom se kroz uzorak u posmičnoj ćeliji propušta ugljični dioksid. Dovod ugljičnog dioksida vrši se donjom drenažnom cijevi, a odvodi se gornjom drenažnom cijevi. Kada je posmična ćelija ispunjena ugljičnim dioksidom, drenažnu cijev spajamo na spremnik s deaeriranom vodom te ju na isti način propuštamo kroz posmičnu ćeliju. Prilikom cirkulacije vode, deaerirana voda dovodi se putem donje drenažne cijevi, a gornjom drenažnom cijevi odvodi sve dok se ne prestanu pojavljivati mjehurići zraka. [4] Prolaskom vode uzorak je potpuno saturiran te se ispitivanje može nastaviti.



Slika 9. Postupak ugrađivanja uzorka



Slika 10. Postupak izravnavanja uzorka nožićem

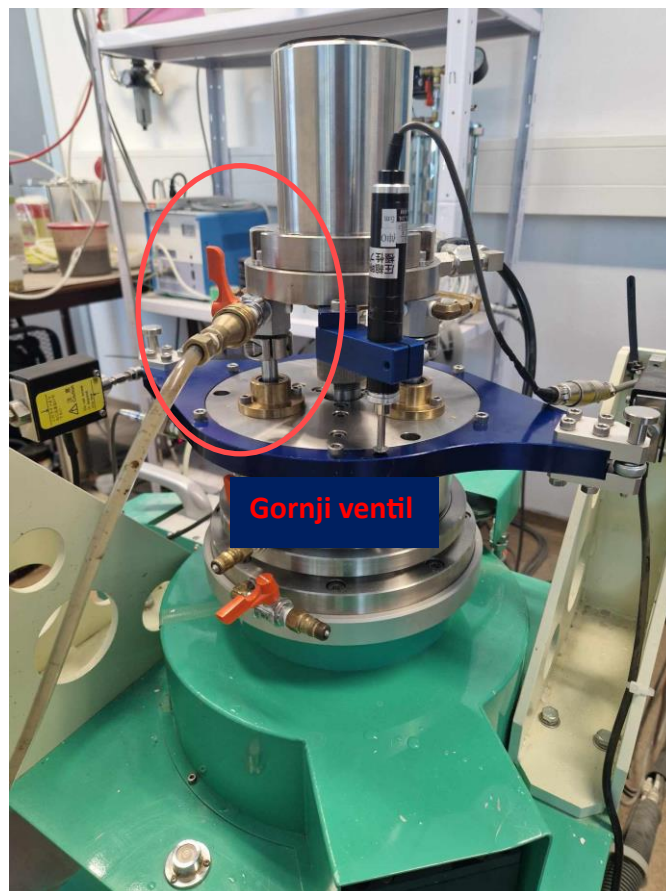
#### 5.4. Konsolidacija uzorka

Nakon što je uzorak potpuno saturiran, opterećuje se početnim stanjem napreznja samo pomoću gravitacije. Uzorak se normalno konsolidira pod utjecajem izračunatog normalnog i posmičnog napreznja. [7]

Uzorak pijeska je prilikom konsolidacije ispitivan pri efektivnim normalnim napreznjima od 32, 60, 120 i 200 kPa uz nanošen povratni pritisak.

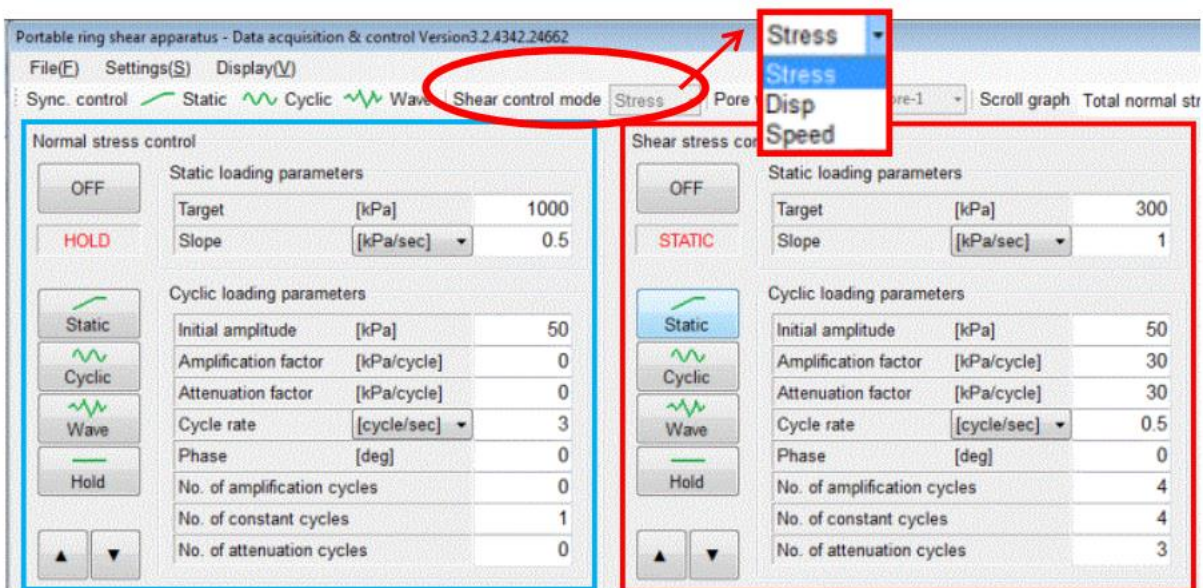
#### 5.5. Smicanje uzorka

Smicanje uzorka može se odvijati u dreniranim, nedreniranim ili djelomično dreniranim uvjetima. [8] U sklopu završnog rada, ispitivanja su provedena u dreniranim uvjetima gdje je to omogućeno na način da gornji ventil (Slika 11.) držimo otvorenim.



Slika 11.: Prikaz gornjeg ventila

Posmično naprezanje, kao što je prije navedeno, nanosi se putem servo-motora na tri načina: kontrolom posmičnog naprezanja, kontrolom brzine ili kontrolom pomaka. [4] Slikom 12. prikazana je software - ska aplikacija kojom se koristimo prilikom smicanja uzorka. Na lijevoj strani, u plavom okviru prikazane su kontrole normalnog naprezanja, a na desnoj strani, u crvenom okviru kontrole posmičnog naprezanja (različiti načini upravljanja). Test kojeg smo mi provodili na uzorku bio je test kontrole brzine smicanja.



Slika 12.: Prikaz software-ske aplikacije uređaja za prstenasto smicanje [4]

## Ispitivanje kontrolom brzine smicanja

Test kontrole brzine koristi se kao osnovno ispitivanje tla kako bi se odredili njegovi parametri. Kod nedreniranog ispitivanja, prilikom stanja mirovanja, mogu se odrediti normalno i posmično naprezanje te mobilizirani i vršni kut trenja. Za sitnozrnaste materijale kod kojih je propusnost mala i porni pritisak se generira polako, brzina smicanja trebala bi biti sporija. Brzina smicanja dana je u cm/s i konstantna je tijekom ispitivanja. [4]



## 6. OPIS UZORKA TLA

Prilikom izrade pokusa prethodno je pripremljen uzorak pijeska za ugradnju u uređaj za prstenasto smicanje. U ovom poglavlju opisana je posmična čvrstoća tla te opis značajki ispitanog uzorka tla.

### 6.1. Posmična čvrstoća tla

Naprezanja i deformacije u tlu dovode do sloma tla. On se očituje kao klizanje jedne mase tla po drugoj preko klizne plohe, pri čemu je naprezanje u kliznoj plohi prekoračilo posmičnu čvrstoću tla, odnosno prekoračilo maksimalno posmično naprezanje koje tlo može podnijeti prije pojave sloma. [10] Posmična čvrstoća tla najčešće se definira Mohr-Coulomb-ovim zakonom posmične čvrstoće tla koji je prikazan Slikom 18. .

Slom u tlu nastaje kada kružnica prikazana Slikom 18. tangira graničnu liniju otpornosti. Tada se plohe na kojima je prekoračena otpornost tangencijalno deformiraju. Odnos između normalnog naprezanja  $\sigma$  i posmične čvrstoće  $\tau$  definiran je prema Mohrovoj teoriji sloma graničnom linijom čvrstoće na ravninu  $\sigma/\tau$ . Granična linija čvrstoće tla blago je zakrivljena, ali se u praksi ona zamjenjuje pravcem koji se prilagođuje graničnoj liniji u području normalnih naprezanja te je na Slici 18. prikazana slovom (a). [11]

Prilikom računanja graničnih stanja, osnovu čine parametri čvrstoće. Parametre koje razmatramo prilikom ispitivanja čvrstoće tla su: kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) i kohezija ( $c$ ). Kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) predstavlja kut trenja koji se javlja među česticama materijala, dok kohezija ( $c$ ) predstavlja privlačnu silu između istovrsnih čestica, te je karakteristična za sitnozrnaste materijale. Dva navedena parametra ovisna su o veličini čestica, mineraloškom sastavu, međusobnom razmaku čestica (koeficijentu pora) i elektrokemijskom sastavu porne vode. [3]

Mohr-Coulomb-ov zakon posmične čvrstoće tla izražava se formulom (3)

$$\tau = c + \sigma * \tan \phi \quad (3)$$

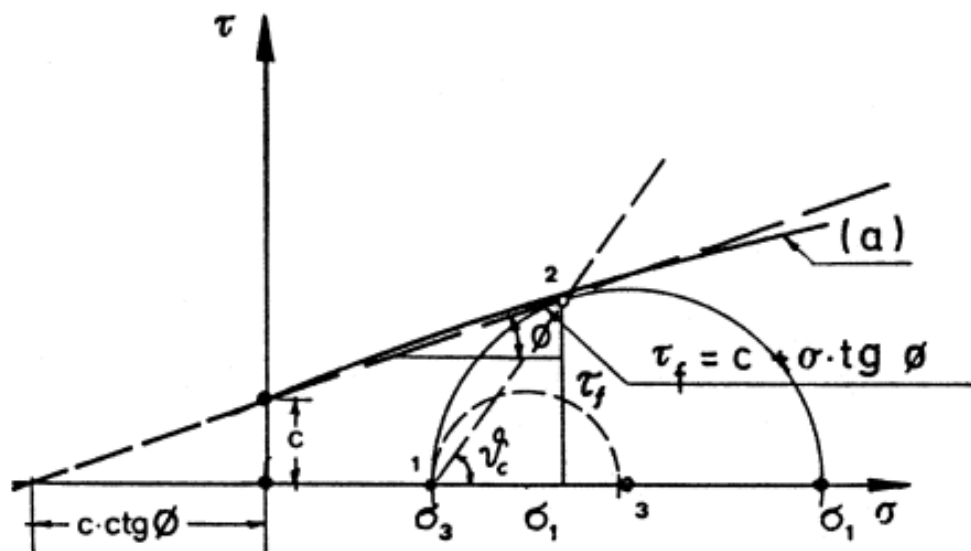
gdje simboli, koji su prethodno i navedeni, predstavljaju:

$\tau$  – posmičnu čvrstoću tla

$c$  – koheziju

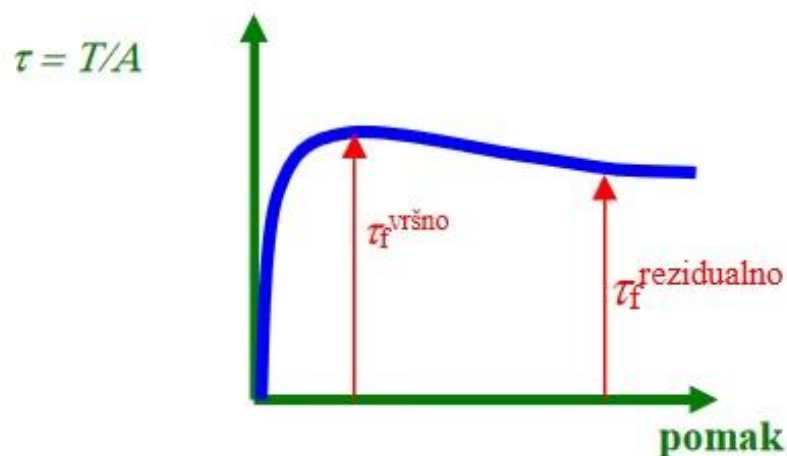
$\sigma$  – normalno naprezanje u tlu

$\phi$  – kut unutarnjeg trenja u tlu



Slika 13.: Mohr-Coulombov zakon posmične čvrstoće [11]

Prilikom ispitivanja čvrstoće tla potrebno je spomenuti i vršnu i rezidualnu čvrstoću. Vršna čvrstoća je maksimalna čvrstoća koju pijesak postiže uslijed smicanja pri određenoj zbijenosti i određenom izotropnom naprezanju. [12] Rezidualna čvrstoća je posmični otpor kojeg materijal pruža pri beskonačnoj deformaciji, tj. prolaskom vremena deformacija raste, ali se posmična čvrstoća materijala ne mijenja. Vršna i rezidualna čvrstoća prikazane su na Slici 14.

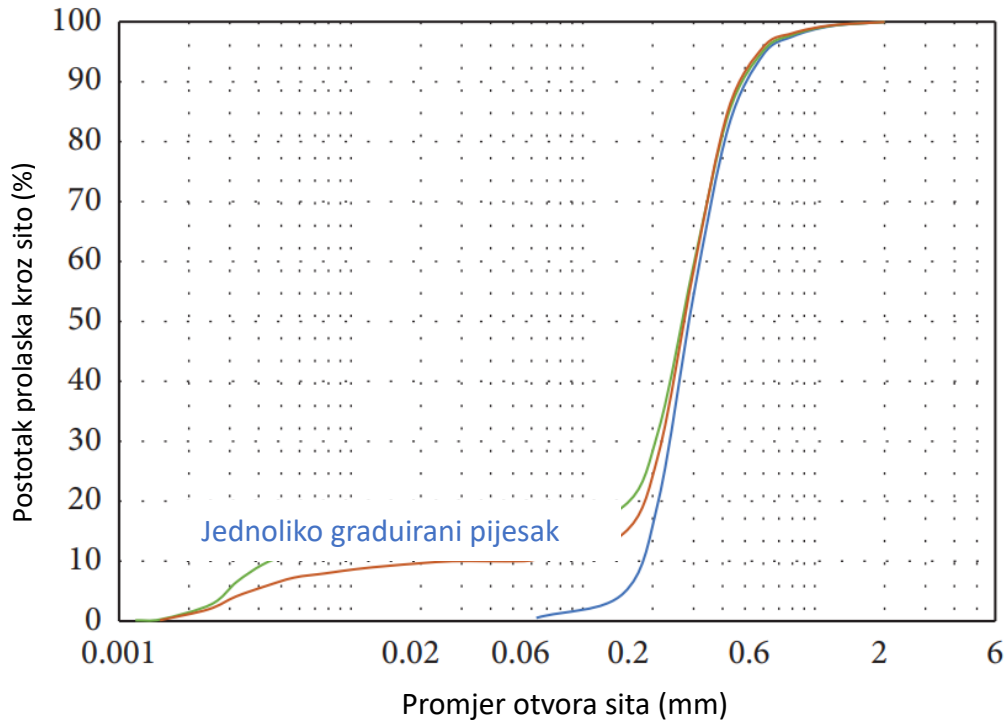


Slika 14.: Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće [10]

## 6.2. Značajke uzorka tla

Uzorak tla koji smo koristili prilikom izrade pokusa je uzorak jednoliko graduiranog pijeska korištenog u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja“ (ModLandRemSSU).

Prema veličini zrna materijal možemo svrstati u pet grupa: šljunak, pijesak, prah, glina i organsko tlo. [1] Pijesak spada u krupnozrnata tla u kojima su pretežno zastupljena zrna pijeska. Njegova klasifikacijska oznaka je S. [13] Prema granulometrijskom sastavu, koji se vidi iz granulometrijske krivulje, tla mogu biti: dobro graduirana, dobro graduirana s dovoljno glinovitog veziva, slabo graduirana, slabo graduirana s mnogo prašinastih čestica, slabo graduirana s mnogo glinovitih čestica i jednoliko graduirana. [1] Kao što je prije navedeno, pri našem ispitivanju korišten je pijesak koji je jednoliko graduiran te je prikazan plavom granulometrijskom krivuljom na Slici 15..



Slika 15. Granulometrijska krivulja jednoliko graduiranog pijeska [14]

Osim navedenih karakteristika krupnozrnatih tla, važna karakteristika je i vlažnost tla ( $w$ ). Ona prikazuje odnos težine vode  $W_w$  u uzorku i težine suhog uzorka  $W_D$ , a izražava se formulom:

$$w = 100 * W_w / W_D \quad (4)$$

Porozitet je također važna karakteristika tla. Relativni porozitet ( $n$ ) označava odnos volumena pora i volumena uzorka tla, te njegova formula glasi: [10]

$$n = V_v / (V_v + V_s) \quad (5)$$

Pijesak koji se koristio u svrhu ispitivanja je sitnozrnati pijesak, veličine zrna 0-1 mm, uzet iz rijeke Drave. [14] Određeni su njegovi parametri prilikom ispitivanja i dani su u Tablici 2.

Tablica 2.: Parametri ispitivanog pijeska [14]

Parametri	Vrijednosti
Specifična gravitacija $G_s$	2,70
Suha gustoća $\rho_d$ , (g/cm <sup>3</sup> )	1,52
Ukupna gustoća $\rho_t$ , (g/cm <sup>3</sup> )	1,55
Efektivna veličina zrna	
$D_{10}$ (mm)	0,19
$D_{60}$ (mm)	0,37
Koeficijent uniformnosti, $c_u$	1,947
Minimalni omjer praznina, $e_{min}$	0,641
Maksimalni omjer praznina $e_{max}$	0,911
Hidraulička vodljivost $\kappa_s$ (m/s)	1,00E-05
Kut trenja, $\varphi$ (°)	33,5
Kohezija, $c$ (kPa)	0
Inicijalna poroznost, $n_i$	0,44
Inicijalni omjer praznina, $e_i$	0,78
Inicijalna relativna gustoća, $D_{ri}$	0,5
Inicijalna vlažnost, $w_i$ (%)	2

Volumen pijeska koji je ugrađen u posmičnu ćeliju iznosi 289,55 cm<sup>3</sup> te služi za daljnje proračunavanje mase suhog uzorka i mase vode. Također je poznata i poroznost, vlažnost i visina uzorka. Proračun masa prikazan je u nastavku.

$$h = (80,4 - 42) = 38,4 \text{ mm} = 3,84 \text{ cm}$$

$$V_{TOT} = (A_1 - A_2) * h \quad (6)$$

$$V_{TOT} = (7^2\Pi - 5^2\Pi) * 3,84$$

$$V_{TOT} = 75,4 * 3,84$$

$$V_{TOT} = 289,54 \text{ cm}^3$$

$$n = V_V / V_{TOT} \quad (7)$$

$$V_V = n * V_{TOT} = 0,437 * 289,54$$

$$V_V = 126,5 \text{ cm}^3$$

$$V_S = V_{TOT} - V_V \quad (8)$$

$$V_S = 289,5 - 126,5$$

$$V_S = 163 \text{ cm}^3$$

$$\rho_S = m_S / V_S \quad (9)$$

$$m_S = V_S * \rho_S$$

$$m_S = 163 * 2,7$$

$$m_S = 440,1 \text{ g}$$

$$m_w = w * m_S \quad (10)$$

$$m_w = 0,02 * 440,1$$

$$m_w = 8,8 \text{ g}$$

Kako je i u Tablici 2. navedeno, pjeskovita tla i šljunci nemaju koheziju, stoga pijesci mogu biti stabilni i pri velikim nagibima kada su vlažni. Njihova čvrstoća, stabilnost kosina i kapacitet nosivosti faktori su kuta unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ). Raspon kuta varira od 30 do 45° te se povećava s graduiranošću, gustoćom i uglatosti zrna. [15]

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA PIJESKA U UREĐAJU ZA PRSTENASTO SMICANJE

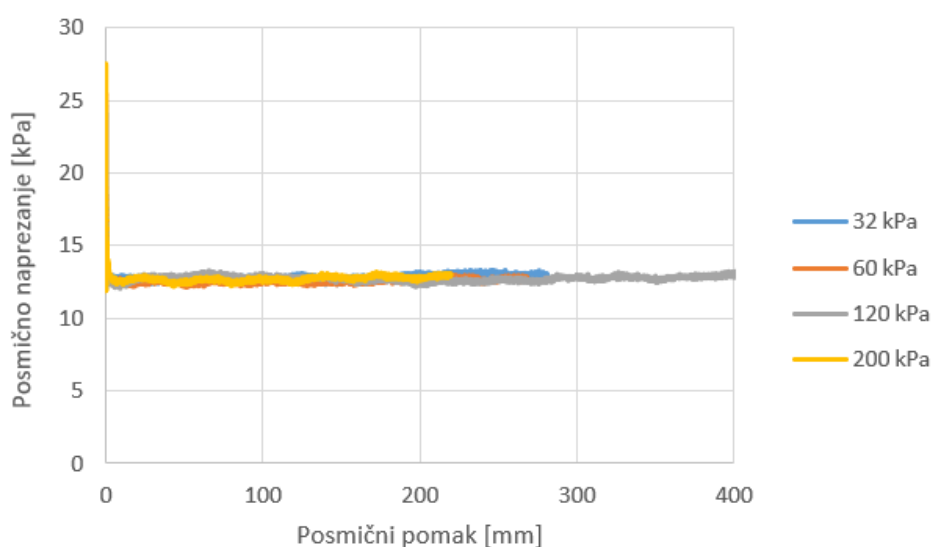
U ovom poglavlju prikazani su rezultati konsolidacije na različita efektivna normalna naprezanja te smicanja uz povratni pritisak i konstantan prirast brzine smicanja uzorka pijeska u uređaju za prstenasto smicanje. Uz grafove priložene su i tablice gdje su dane vrijednosti: normalnog naprezanja, efektivnog normalnog naprezanja, vertikalnog otpora brtve i povratnog pritiska.

Efektivno normalno naprezanje izračunato je prema formuli (11):

$$\sigma' = \sigma - (\text{vertikalni otpor brtve} + \text{pwp}) \quad (11)$$

### 7.1 Rezultati inicijalnih ispitivanja

Najprije treba provesti inicijalna ispitivanja samo s vodom kako bismo znali vrijednosti posmičnog otpora brtve. Stoga su provedena inicijalna ispitivanja na vodi za normalna naprezanja od 32 do 200 kPa pri konstantnoj brzini smicanja. Na Slici 16. prikazani su dijagrami posmično naprezanje - posmični pomak, za različita normalna naprezanja, a rezultati rezidualne čvrstoće, odnosno otpora brtve, za različita normalna naprezanja dani su u Tablici 3.



Slika 16.: Posmično naprezanje – posmični pomak pri inicijalnom ispitivanju na vodi

Tablica 3.: Rezidualna čvrstoća pri inicijalnom ispitivanju

Normalno naprezanje ( $\sigma$ ) [kPa]	32	60	120	200
Rezidualna čvrstoća ( $\tau_{r,i}$ ) [kPa]	12,88	12,58	12,79	12,77

## 7.2. Rezultati konsolidacije uzoraka pijeska

U priloženim dijagramima možemo vidjeti početnu fazu pokusa, gdje je nanošenjem vertikalnog opterećenja konsolidiran uzorak tla. Proračunom koji je dan u uvodu 7. poglavlja određeno je normalno naprezanje kojim smo konsolidirali uzorak. Podatke smo iščitali iz nadzornog sustava prstenastog uređaja. Podaci kojima smo se koristili zadani su u Tablici 4. za svako efektivno normalno naprezanje. Potrebno je navesti kako kod smicanja pri efektivnom normalnom naprezanju od 200 kPa nije bilo vertikalnog otpora brtve te on nije uzet u obzir.

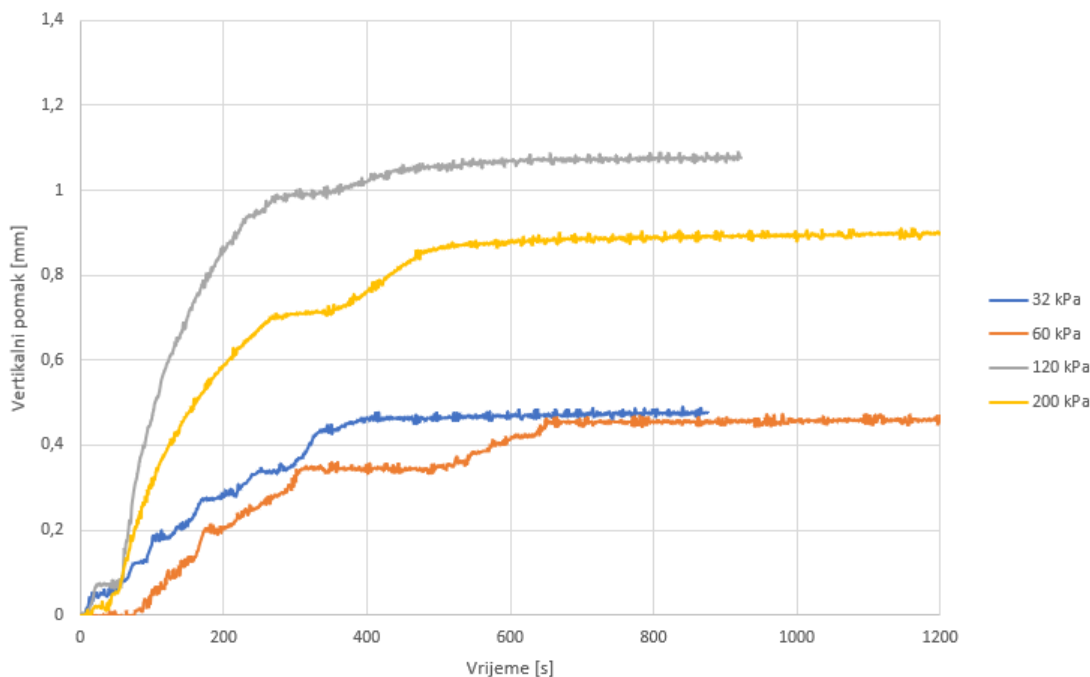
Tablica 4.: Vrijednosti normalnog naprezanja, efektivnog normalnog naprezanja, vertikalnog otpora brtve i povratnog pritiska

Normalno naprezanje ( $\sigma$ ) [kPa]	55,5	90	147,5	250
Efektivno normalno naprezanje ( $\sigma'$ ) [kPa]	32	60	120	200
Vertikalni otpor brtve [kPa]	8,5	10	7,5	nije bilo otpora brtve
Povratni pritisak (pwp) [kPa]	15	20	20	50

Prilikom početka nanošenja normalnog opterećenja, svaki uzorak ima svoju početnu visinu koja se postepenim nanošenjem opterećenja smanjivala te je potpuna konsolidacija postignuta kada nije bilo prirasta vertikalnog pomaka. Slikom 17. prikazan je vertikalni pomak uzorka u vremenu. Iako bismo očekivali da će najveći vertikalni pomak biti postignut za uzorak kojeg smo ispitivali efektivnim normalnim naprezanjem od 200 kPa, to se ipak dogodilo kod uzorka ispitivanog efektivnim normalnim naprezanjem od 120 kPa. On je iznosio 1,09 mm, dok je najmanji vertikalni



pomak bio kod uzorka kojeg smo ispitivali efektivnim normalnim naprežanjem od 32 kPa te je iznosio 0,482 mm.



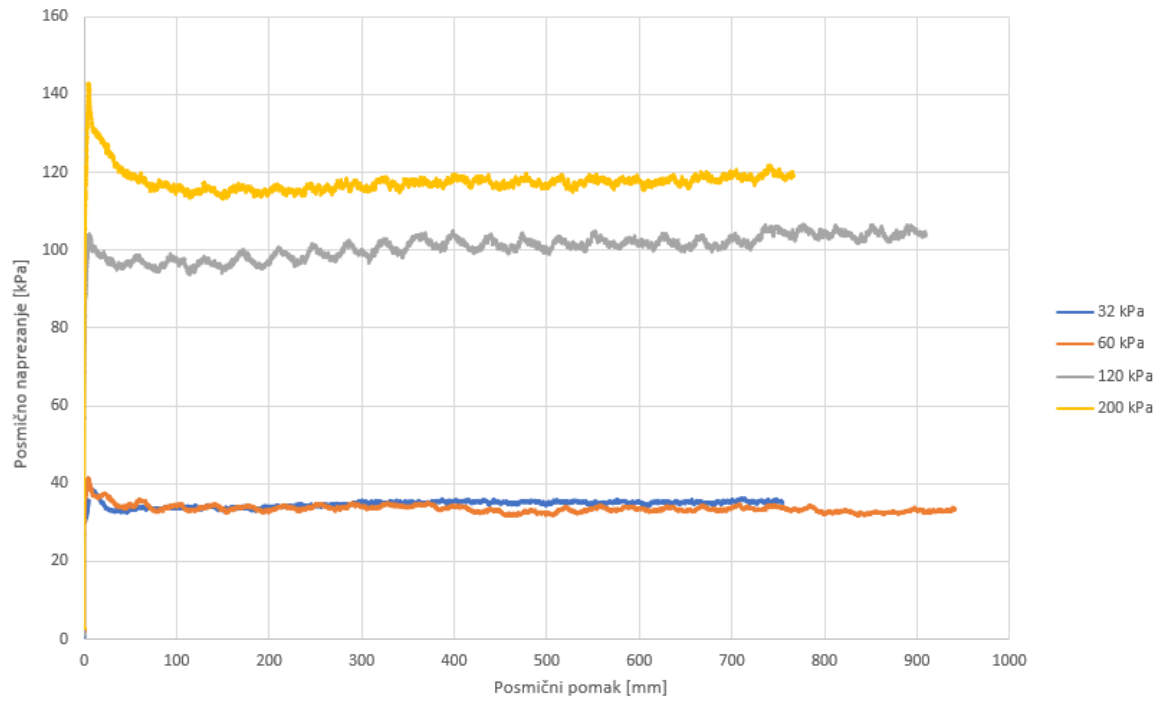
Slika 17.: Vertikalni pomak u vremenu tijekom konsolidacije

### 7.3. Rezultati prstenastog smicanja uzorka pijeska

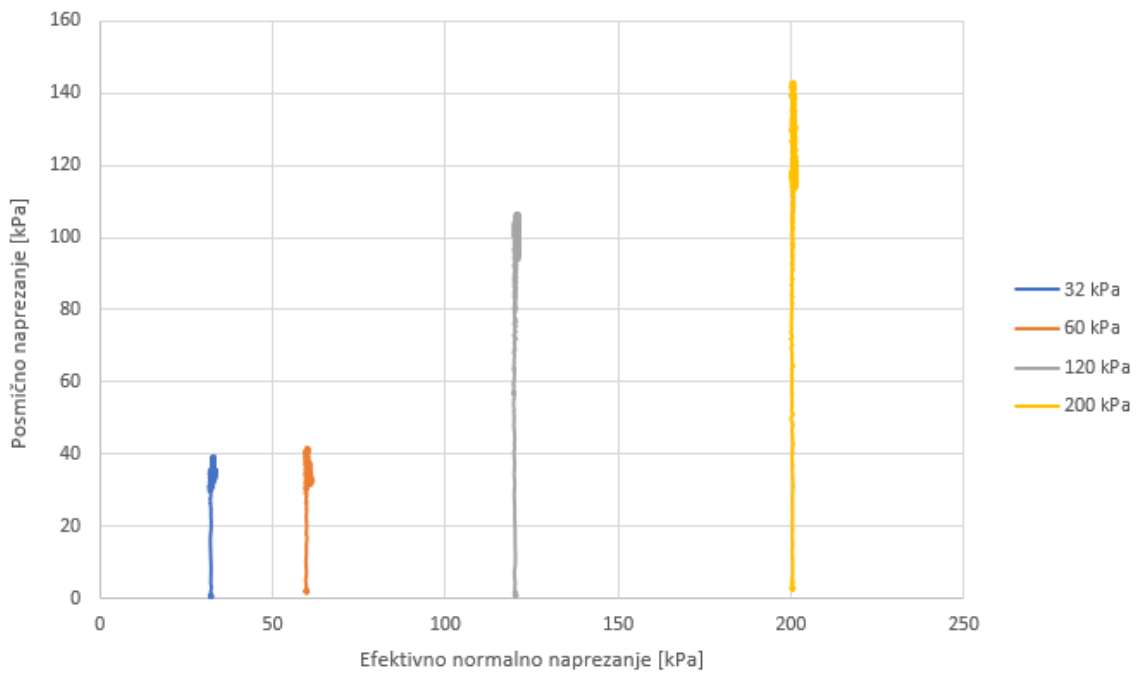
Nakon provedbe konsolidacije na određeno normalno naprežanje, uzorci su bili spremni za smicanje uz povratni pritisak i konstantan prirast brzine smicanja. Brzina kojom su uzorci smaknuti iznosila je 0,1 mm/s.

Slikom 18. dan je grafički prikaz posmičnog naprežanja obzirom na posmični pomak gdje možemo primijetiti kako na početku smicanja vrijednost posmičnog naprežanja doseže svoju maksimalnu, vršnu vrijednost. Osim vršne vrijednosti, iz dijagrama možemo također očitati rezidualnu vrijednost posmične čvrstoće.

Slika 19. prikazuje odnos posmičnog naprežanja i efektivnog normalnog naprežanja gdje se točno može vidjeti do koje vrijednosti posmično naprežanje raste (vršna vrijednost) te se zatim spušta i stabilizira (rezidualna vrijednost).



Slika 18.: Posmično naprezanje – posmični pomak za različite vrijednosti efektivnog normalnog naprezanja



Slika 19.: Trag efektivnih naprezanja

Sa Slike 18. moguće je iščitati vršne i rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće pijeska za različita efektivna normalna naprezanja te su one dane u Tablici 5. .

Tablica 5.: Vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće pijeska

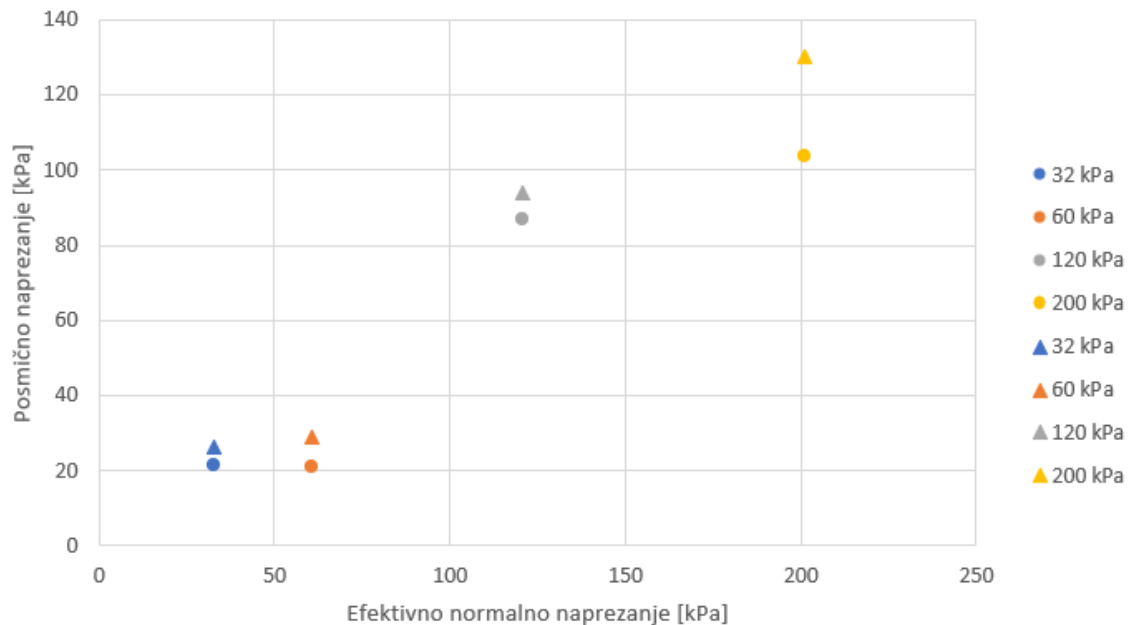
Normalno naprezanje ( $\sigma$ ) [kPa]	32	60	120	200
Ukupni vršna posmična čvrstoća pijeska ( $\tau_{p,u}$ ) [kPa]	39,33	41,58	106,73	143,01
Ukupni rezidualna posmična čvrstoća pijeska ( $\tau_{r,u}$ ) [kPa]	34,34	33,75	99,58	116,53
Vršna čvrstoća pijeska ( $\tau_p'$ )	26,45	29	93,94	130,24
Rezidualna čvrstoća pijeska ( $\tau_r'$ )	21,46	21,17	86,79	103,76

Formule kojom je određena vršna i rezidualna čvrstoća pijeska glase:

$$\tau_p = \tau_{p,u} - \tau_{r,i} \quad (12)$$

$$\tau_r = \tau_{r,u} - \tau_{r,i} \quad (13)$$

Slikom 20. prikazane su vršne (trokut) i rezidualne (krug) vrijednosti čvrstoće. Najveća vršna čvrstoća, kako bi se i pretpostavilo, javlja se prilikom efektivnog normalnog naprezanja od 200 kPa. Ta vrijednost iznosi 143,01 kPa, dok najmanja vrijednost, pri efektivnom normalnom naprezanju od 32 kPa, iznosi 39,33 kPa. Također, i rezidualna čvrstoća prikazana je Slikom 20. Kod rezidualne čvrstoće vrijednost je također najveća pri 200 kPa i iznosi 116,53 kPa, međutim najmanju rezidualnu vrijednost ima uzorak pri naprezanju od 60 kPa koja iznosi 33,75 kPa. Ukupne vrijednosti rezultata prikazane su u Tablici 5.



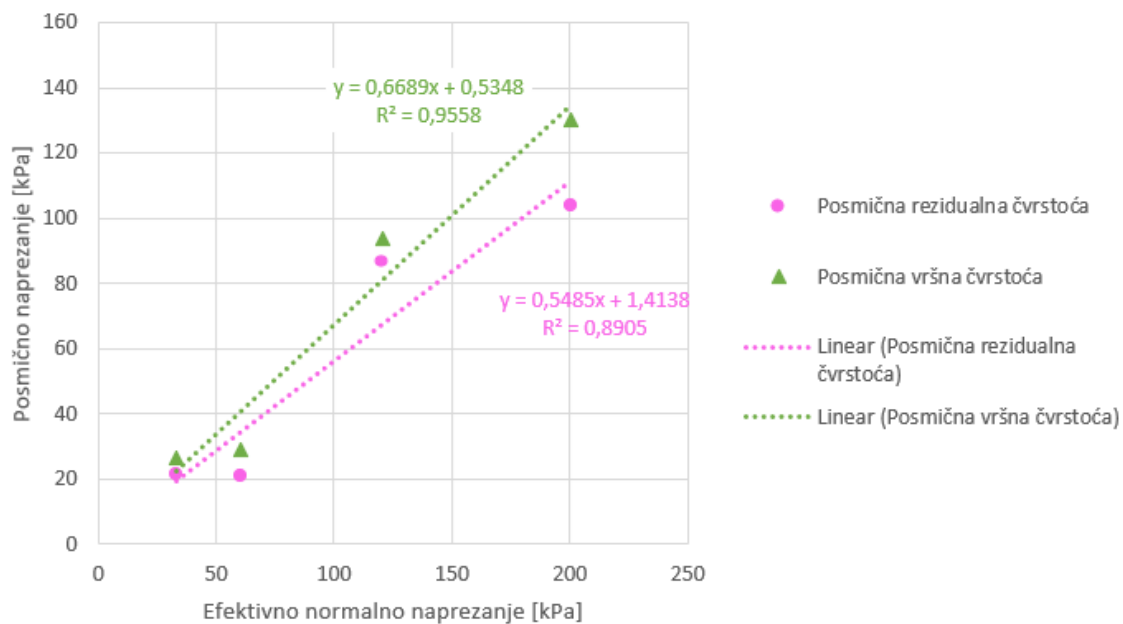
Slika 20.: Vršna (trokut) i rezidualna (krug) čvrstoća pri efektivnim normalnim naprezanjima od 32, 60, 120 i 200 kPa

Povlačenjem linije linearne aproksimacije kroz točke vršne i rezidualne čvrstoće dobiva se Mohr - Coulombov pravac čvrstoće. Rezultati su prikazani dijagramom na Slici 21. na kojoj linija označena zelenom bojom predstavlja vršni pravac, a linija označena ružičastom bojom rezidualni pravac. Dobivene jednadžbe daju kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) i koheziju ( $c$ ). Vršni kut unutarnjeg trenja iznosi  $31,70^\circ$ , a rezidualni  $26,09^\circ$ . Dobivena je vrlo mala vrijednost kohezije, te ju pridodajemo greškama tijekom ispitivanja. Navedene vrijednosti dane su u Tablici 6. .

Također, linije sa Slike 21. prikazuju Mohr - Coulombov pravac vršne, odnosno rezidualne čvrstoće kao što je prikazano sljedećim formulama:

$$\text{Vršna čvrstoća:} \quad \tau_p = 0,6689 \sigma' + 0,5348 \quad (14)$$

$$\text{Rezidualna čvrstoća:} \quad \tau_r = 0,5485 \sigma' + 1,4138 \quad (15)$$



Slika 21.: Mohr-Coulombovi pravci vršne i rezidualne čvrstoće

Tablica 6.: Vrijednosti vršnog i rezidualnog kuta unutarnjeg trenja

	Vršna vrijednost	Rezidualna vrijednost
Kut unutarnjeg trenja $\varphi$ [°]	31,70	26,09
Kohezija $c$ [kPa]	0,53	1,41

## 8. ZAKLJUČAK

Uređaj za prstenasto smicanje pokazao se vrlo efikasnim prilikom određivanja čvrstoće ispitivanih uzoraka pijeska. Osim određivanja čvrstoće, uređajem se mogu odrediti brojni parametri koji pomažu prilikom projektiranja i građenja na tlu na kojem može doći do pojave klizišta ili nekakvog sloma tla. Upravo zbog njegovih načina rada, gdje uređaj može simulirati dinamičko, cikličko opterećenje ili pak seizmičko opterećenje, čini ga pogodnim za provedbu ispitivanja na različitim uzorcima tla.

Iako efikasan, uređaj posjeduje jedan nedostatak. U njega nije moguće ugraditi neporemećeni uzorak, stoga se koristi za ispitivanje parametara čvrstoće poremećenih materijala. Međutim, kao što je i prije navedeno, prednost uređaja je da se pomoću njega može odrediti vršna i rezidualna čvrstoća ispitivanog uzorka tla odnosno vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja i kohezija.

Prilikom izrade završnog rada provedena su četiri ispitivanja uzoraka jednoliko graduiranog pijeska i četiri inicijalna ispitivanja na vodi za istu veličinu efektivnih normalnih naprezanja. Smicanja uzorka su provedena u dreniranim uvjetima za efektivna normalna naprezanja od 32, 60, 120 i 200 kPa pri povratnom pritisku. Kod inicijalnih ispitivanja s vodom utvrdio se otpor brtve koji je bio ključan za daljnju obradu rezultata.

Nakon provedenih ispitivanja rezultati su obrađeni te su prikazani kao grafovi posmično naprezanje – posmični pomak, vertikalni pomak u vremenu tijekom konsolidacije i tragovi efektivnog normalnog naprezanja. Nadalje, određena je vršna i rezidualna čvrstoća uzorka pijeska za različita efektivna normalna naprezanja te je također određen i vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja.

Ovim radom prikazano je koliko je uređaj za prstenasto smicanje ključan dio geotehničkog inženjerstva te kako njegove karakteristike, rezultati i njihova obrada mogu predvidjeti nepovoljno tlo i njegov slom, uz to potaknuti provođenje sanacije klizišta i sprječavanje ponovnog ili budućeg klizanja tla.

## LITERATURA:

- [1] Peranić J., Mehanika tla i stijena - predavanja, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2022.
- [2] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, klizište, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=31944>, pristup 24. 8. 2023.
- [3] Arbanas Ž., Mehanika tla - predavanja, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2006.
- [4] Oštrić M., Vivoda M., Ljutić, K., Portable ring shear apparatus – ICL 1 Manual, Kyoto, 2012.
- [5] Setiawan H., Sassa K., Fukoka H., Wang G., Ishikawa N., Undrained Dynamic -Loading Ring - Shear Apparatus and Its Application to Landslide Dynamics, 2018., str. 1- 5
- [6] Huy Loi D., Jayakody S. H. S., Sassa K., Teaching Tool “Undrained Dynamic Loading Ring Shear Testing with Video”, Progress in Landslide Research and Technology, Volume 1 Issue 2, Kyoto, 2022., str. 326 – 350
- [7] Oštrić M., Ljutić K., Krkač M., Sassa K., Bin H., Takara K., Yamashiki Y., Portable Ring Shear Apparatus and its Application on Croatian Landslides, Kyoto, 2012., str. 3 – 6
- [8] Oštrić M., Sassa K., Ljutić K., Vivoda M., He B., Takara K., Manual of Transportable Ring Shear Apparatus ICL-1, Proc of the 1st Reg Symp on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, 2013. str. 1 – 5
- [9] Oštrić M., Development of Portable Undrained Ring Shear Apparatus and Its Application, Sveučilište u Kyotu, Kyoto, 2013.
- [10] Geotech d.o.o., istražni radovi, izravno smicanje, <https://www.geotech.hr/izravno-smicanje/>, pristup 31.07.2023.
- [11] Nonveiller E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Zagreb, 1979., str. 237 - 238

[12] Mihalić, S., Inženjerska svojstva tla, [https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids snjezanamihalic/06 poglavlje.pdf](https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/06_poglavlje.pdf) , pristup 05.09.2023.

[13] Zlatović S., Uvod u mehaniku tla, Udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.

[14] Vivoda Prodan M., Peranić J., Pajalić S., Arbanas Ž., istraživački članak „Physical Modelling of Rainfall-Induced Sandy and Clay-Like Slope Failures“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2023.

[15] I. Sokolić, Primijenjena mehanika tla, interna skript