

Određivanje parametara čvrstoće pijeska uređajem za izravno smicanje

Štiberc, Dora

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:157:335377>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**



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**

Dora Štiberc

Određivanje parametara čvrstoće pijeska uređajem za izravno smicanje

Završni rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni prijediplomski studij
Mehanika tla i stijena**

**Dora Štiberc
JMBAG: 0114033887**

Određivanje parametara čvrstoće pijeska uređajem za izravno smicanje

Završni rad

Rijeka, srpanj 2023.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom 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.

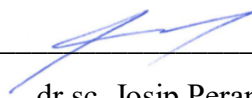


Dora Štiberc

U Rijeci, 5. srpnja 2023.

IZJAVA

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta **Istraživanje klizišta uzrokovanih infiltracijom oborina korištenjem fizikalnih i numeričkih modela** (voditelj dr.sc. Josip Peranić) koji se realizira uz potporu **Sveučilišta u Rijeci** (uniri-mladi-tehnic-22-62), znanstvenog projekta **Landslide Initiation, Evolution and Remediation: Physical and Numerical Modeling (LIEREM)** (voditelj dr.sc. Željko Arbanas) podržanog od strane **Međunarodnog konzorcija za klizišta** i znanstvenog projekta **Investigation of landslide initiation caused by rainfall infiltration using small-scale physical and numerical modeling (ILIRIM)** (voditelj dr.sc. Josip Peranić) podržanog od strane **Međunarodnog konzorcija za klizišta (IPL-256)**.



dr.sc. Josip Peranić

U Rijeci, 5. srpnja 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru i profesoru Doc. dr. sc. Josipu Peraniću na razumijevanju i pomoći i volji tijekom izrade ovoga rada, kao i tijekom studiranja.

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je određivanje parametara posmične čvrstoće pijeska pomoću uređaja za izravno smicanje. Pokusi su provedeni na uzorcima jednolično 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“ (ModLandRemSS). Ispitivanja su provedena pri normalnim naprezanjima u rasponu od 4 do 120 kPa, te su na temelju rezultata utvrđeni parametri čvrstoće materijala reprezentativni za 1g umanjene fizičke modele kosina ispitivane u laboratorijskim uvjetima, gdje su iznosi geostatičkih efektivnih naprezanja ograničeni dimenzijama modela, kao i za uvjete realnih kosina.

Pokusi su provedeni na uzorcima gustoće jednake onoj u umanjenim fizičkim modelima kosina i potpuno saturiranim uvjetima. S obzirom na male vrijednosti normalnih naprezanja pri kojima su uzorci smicani, pri interpretaciji rezultata pokusa, odnosno određivanju parametara Mohr-Columb-ovog kriterija čvrstoće, u obzir je uzet utjecaj otpora koji se događa unutar samog uređaja, kao i utjecaj hidrostatskog pritiska na plohi smicanja uslijed potapanja uzorka pod vodu tijekom ispitivanja.

U radu je prikazana teorijska osnova posmične čvrstoće tla i utjecaja efektivnih naprezanja na čvrstoću tla, s naglaskom na nekoherentna tla. Zatim je prikazan uređaj za izravno smicanje koji je korišten u radu (GDS Instruments), osnovne značajke ispitivanog materijala, te opis ugradnje uzoraka i tijek ispitivanja. Rezultati su prikazani i interpretirani u posljednjem poglavlju te su dani zaključci s naglaskom na značajke posmične čvrstoće pijeska pri malim vrijednostima naprezanja.

Ključne riječi: posmična čvrstoća pijeska, Mohr-Coulomb-ov kriterij čvrstoće, uređaj za izravno smicanje, fizički modeli kosina, mala naprezanja

SUMMARY

The topic of this final thesis is the determination of the shear strength parameters of sand using a direct shear apparatus. The experiments were carried out on samples of uniformly graded sand used as a part of scientific research project "Physical modelling of landslide remediation constructions behavior under static and seismic actions" (ModLandRemSS). The tests were carried out at normal stresses ranging from 4 to 120 kPa to determine the shear strength parameters of the material representative of the small-scale 1g slope models tested under laboratory conditions, where the maximum geostatic effective stresses are limited by the dimensions of the downscaled models, as well as for the conditions relevant for real-size slopes.

The experiments were carried out on fully saturated samples whose density corresponded to the conditions of the small-scale physical slope models. In the interpretation of the results, i.e. in the determination of the parameters of the Mohr-Coulomb strength criterion, given the low values of the confining stresses at which the samples were sheared, the influence of the resistance occurring in the device itself was taken into account, as well as the influence of the hydrostatic pressure existing on the shear surface of submerged samples.

The thesis presents the theoretical basis of soil shear strength and the influence of effective stresses on soil shear strength, focusing on non-cohesive soils. The direct shear apparatus used in the study (GDS Instruments) and the basic characteristics of the material tested are then presented, and the installation of the samples and the testing procedures are described. The results are presented and interpreted in the last chapter and conclusions are drawn, focusing on the shear strength properties of sand under low confining stresses.

Key words: shear strength of sand, Mohr-Coulomb failure envelope, direct shear apparatus, physical slope models, low stresses

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POSMIČNA ČVRSTOĆA TLA	2
2.1. Utjecaj efektivnih naprezanja na čvrstoću (parametri čvrstoće).....	3
2.2. Čvrstoća nekoherentnog tla	5
3. UREĐAJ ZA IZRAVNO SMICANJE.....	11
3.1. GDSBPS – uređaj za izravno smicanje tvrtke GDS Instruments	12
4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE I REZULTATI.....	14
4.1. Osnovne značajke ispitivanog pijeska.....	14
4.2. Opis ugradnje i tijek ispitivanja	15
4.3. Prikaz rezultata	17
4.4. Interpretacija rezultata.....	21
5. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI	24
LITERATURA	25

POPIS SLIKA

Slika 1: Mohr-Coulombov zakon sloma (Nonveiller, 1979)

Slika 2: Dijagram čvrstoće trenja čestica po ravnini klizanja (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Slika 3: Rezultati pokusa smicanja s visokim normalnim napreznjima (Nonveiller, 1979)

Slika 4: Karakteristike posmične čvrstoće krupnozrnatih tala: (a) posmično naprezanje – posmična deformacija; (b) posmično naprezanje – efektivno naprezanje; (c) volumne deformacije – posmične deformacije (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Slika 5: Mehanizam dilatacije u krupnozrnatim tlima: (a) inicijalno gusto zbijeno tlo koje dilatira; (b) inicijalno rahlo tlo koje pokazuje kontrakciju (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Slika 6: Određivanje vršnih čvrstoća iz podataka prikupljenih izravnim smicanjem (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Slika 7: Interpretacija rezultata određivanja vršnih čvrstoća (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Slika 8: Uređaj za izravno smicanje (modificirano prema <https://www.vjtech.co.uk/blog/an-introduction-to-direct-shear-testing>)

Slika 9: Uređaj za izravno smicanje (GDSBPS) (modificirano prema https://www.gdsinstruments.com/__assets__/Products/00029/GDSBPS_Datasheet.pdf)

Slika 10: Granulometrijska krivulja pijeska (Špoljarić, 2021)

Slika 11: Postupak ugradnje uzorka: (a) zbijanje uzorka u slojevima; (b) postavljanje poroznog kamena; (c) potapanje uzorka pod vodu; (d) zatvaranje uređaja

Slika 12: Dijagram vertikalnog napreznja u vremenu

Slika 13: Visine uzoraka tijekom konsolidacije

Slika 14: Visine uzoraka tijekom smicanja

Slika 15: Promjene visina uzoraka tijekom smicanja

Slika 16: Posmično naprezanje s obzirom na horizontalni pomak pri 4, 8, 16 kPa

Slika 17: Posmično naprezanje s obzirom na horizontalni pomak

Slika 18: Vršna i rezidualna vrijednost posmičnog napreznja

Slika 19: Vršne vrijednosti posmične čvrstoće pri malim napreznjima od 4, 8 i 16 kPa

Slika 20: Rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće pri malim napreznjima od 4, 8 i 16 kPa

POPIS TABLICA

Tablica 1: Osnovne značajke ispitivanog pijeska

Tablica 2: Vrijednosti vršnih i rezidualnih kutova trenja

1. UVOD

Pri izvođenju građevinskih zahvata na željenoj lokaciji potrebno je postići sigurnost njenih budućih korisnika, kao i same građevine. Kako bi se to postiglo, nastoji se predvidjeti ponašanje građevine. Ovo podrazumijeva i određivanje nosivosti, odnosno parametara čvrstoće temeljnog tla, budući da njezinim prekoračenjem dolazi do sloma tla. Određivanje značajki čvrstoće tla provodi se na uzorcima tla u laboratoriju ili direktno na terenu. Pri predviđanju ponašanja tla pri različitim uvjetima opterećenja važno je poznavati raspone efektivnih napreznja kojima će tlo biti izloženo uslijed određenog inženjerskog zahvata ili pojave.

U ovom radu će se ispitati značajke čvrstoće pijeska korištenog u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja“ (ModLandRemSS) i drugih istraživačkih projekata, a koji je korišten pri izradi umanjenih fizičkih modela kosina, sa i bez mjera sanacije, čiji je osnovni cilj istražiti ponašanje i pokretanje klizišta uzrokovanih potresima i oborinama. Pritom je za analiziranje uvjeta stabilnosti umanjenih modela kosina, kao i kosina realnih dimenzija, neophodno poznavati parametre čvrstoće tla – koheziju i kut unutarnjeg trenja tla.

Cilj rada je određivanje značajki čvrstoće pri vrijednostima efektivnih napreznja u rasponu od nekoliko kPa do nekoliko desetaka ili stotina kPa, odnosno pri malim napreznjima kakva se tipično pojavljuju kod umanjenih fizičkih modela u 1g uvjetima opterećenja, kao i rasponu napreznja s kojim se inženjeri geotehnike susreću pri rješavanju svakodnevnih problema. Nakon provedbe pokusa prikazat će se i interpretirati rezultati smicanja dobiveni u uređaju za izravno smicanje pri različitim normalnim napreznjima. Provedena ispitivanja sastojala su se od dvije osnovne faze. Prva faza predstavlja konsolidaciju ugrađenog uzorka pri odabranom vertikalnom opterećenju. Druga faza predstavlja smicanje po definiranoj horizontalnoj ravnini konstantnom brzinom, odnosno pomicanje donje polovice kutije u odnosu na, fiksnu, gornju polovicu kutije.

Na kraju rada će biti prikazani zaključci na temelju dobivenih rezultata.

2. POSMIČNA ČVRSTOĆA TLA

Slom tla nastaje kada naprezanja u području zone sloma prekorače posmičnu čvrstoću tla, odnosno maksimalno posmično naprezanje koje tlo može preuzeti prije nastupanja sloma tla. Prekoračenje čvrstoće tla popraćeno je pojavom velikih posmičnih deformacija, odnosno relativnih pomaka tla u području zone smicanja. Posmična čvrstoća tla najčešće se definira Mohr-Coulomb-ovim zakonom čvrstoće prikazanim na Slici 1.

Za određivanje vrijednosti posmične čvrstoće potrebno je znati dva međusobno nezavisna parametra, koji su ujedno i najosnovniji parametri čvrstoće tla – kohezija i kut unutarnjeg trenja. Uz parametre čvrstoće, potrebno je poznavati i vrijednost efektivnog naprezanja koja djeluje na kontaktu između čestica tla, a ne ukupnog naprezanje koje djeluje na tlo. Razlog zašto se ukupno naprezanje ne uzima u obzir je zbog toga što dio tog naprezanja preuzima voda u porama, a ona ne pridonosi otporu na smicanje. Prema Mohr-Coulomb-ovu zakonu, posmična čvrstoća tla se definira prema izrazu:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (1)$$

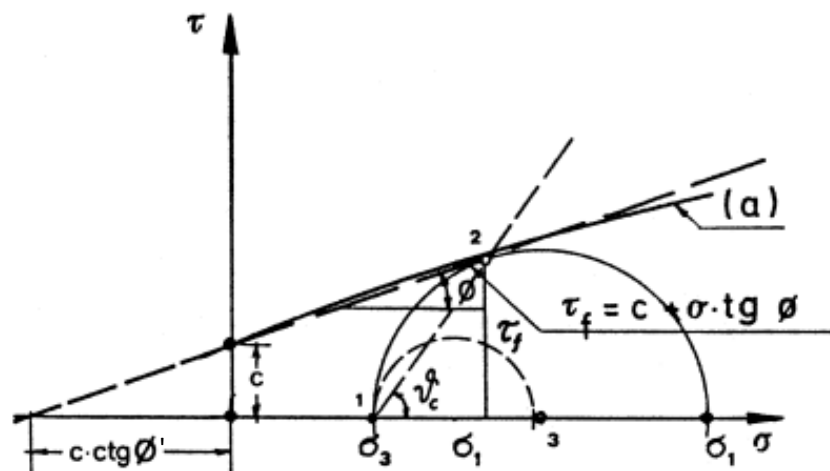
gdje je:

τ_f – posmična čvrstoća tla [kPa];

c' – kohezija [kPa];

φ' – kut unutarnjeg trenja tla [°];

σ'_n – normalno efektivno naprezanje na plohi sloma u tlu [kPa].



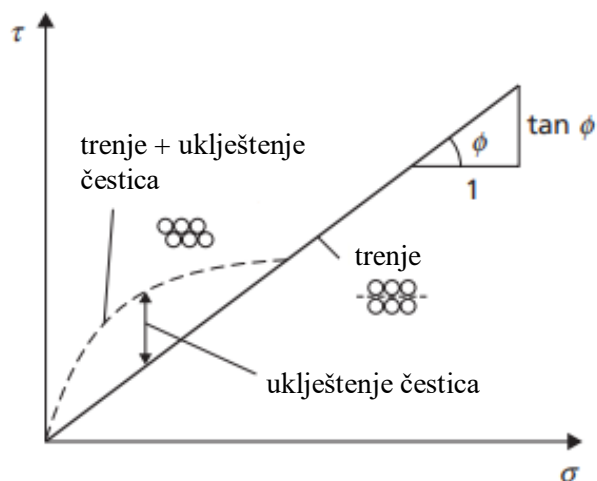
Slika 1: Mohr-Coulomb-ov zakon sloma (Nonveiller, 1979)

Coulomb je definirao zakon čvrstoće izražen s jednažbom (1) koja definira pravac, odnosno anvelopu sloma. Pravac je određen kohezijom na ordinati za normalno efektivno naprezanje jednako nuli i nagibom pravca, s obzirom na apscisu, koji odgovara kutu unutarnjeg trenja materijala. Na apscisi koordinatnog sustava zakona sloma nalazi se normalno efektivno naprezanje, a na ordinati posmična čvrstoća (Slika 1). Mohr-ova kružnica predstavlja stanja naprezanja na svim mogućim ravninama unutar elementa tla. Ona prolazi kroz točke na apscisi koje predstavljaju veće i manje glavno efektivno naprezanje, σ'_1 i σ'_3 . Veće glavno efektivno naprezanje (σ'_1) djeluje na horizontalnoj površini uzorka, dok manje efektivno naprezanje (σ'_3) djeluje na vertikalnoj površini uzorka tla. Do sloma tla dolazi kada anvelopa sloma tangira Mohr-ovu kružnicu naprezanja u točki 2, kao što je prikazano na Slici 1 (Szavits-Nossan, 2013).

2.1. Utjecaj efektivnih naprezanja na čvrstoću (parametri čvrstoće)

Vrijednost posmične čvrstoće tla ovisi o parametrima čvrstoće – koheziji i kutu unutarnjeg trenja. Ta dva parametra čvrstoće ovise o vrsti tla, mineraloškom sastavu, granulometrijskom sastavu te koeficijentu pora (Nonveiller, 1979.).

Kut unutarnjeg trenja, φ predstavlja trenje između čestica materijala koje nastaje uslijed klizanja na kontaktnim plohama, odnosno smicanja. Kod zbijenih materijala s gustim rasporedom čestica, dolazi do početnog uklještenja između čestica što može uzrokovati veću čvrstoću od one koja postoji uslijed čistog trenja. Ukoliko dođe do povećanja normalnog naprezanja, ono može postati dovoljno veliko da kontaktne sile između čestica uzrokuju njihovo lomljenje, čime se smanjuje stupanj uklještenja i omogućava razvoj trenja između čestica (Slika 2) (Knappett & Craig, 2012). Oblik zrna utječe na pokretljivost čestica te kut unutarnjeg trenja raste ukoliko su zrna uglasta, a smanjuje se ako su zaobljena (Nonveiller, 1979). Parametar čvrstoće φ za krupnozrnata tla, u koja spadaju šljunak i pijesak, kreće se od 30° do 45° ovisno o zbijenosti tla, i općenito je veći nego kut unutarnjeg trenja za sitnozrnata tla. Razlog tome je gustoća pakiranja čestica materijala, uglatosti zrna, malen koeficijent pora i bolja graduiranost (Nonveiller, 1979).

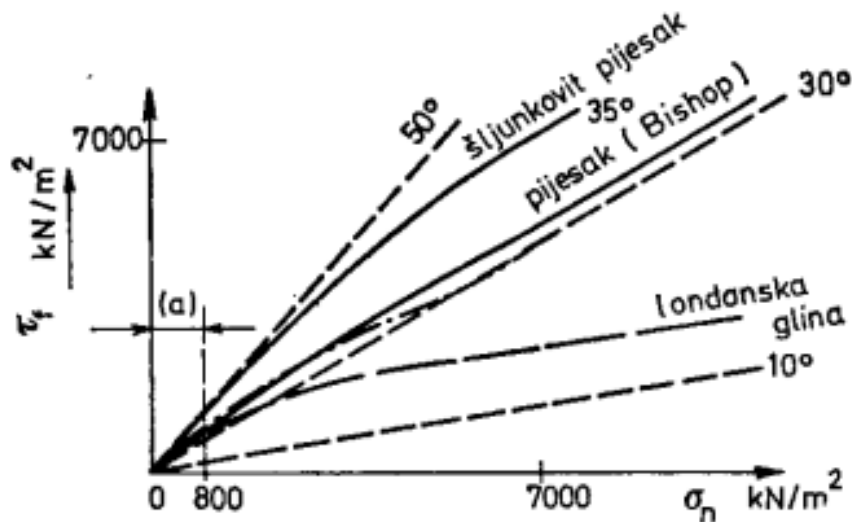


Slika 2: Čvrstoća ovisno o rasporedu čestica duž ravnine klizanja (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Drugi parametar čvrstoće je kohezija, c i ona predstavlja privlačnu silu između istovrsnih čestica. Ovisi o veličini čestica i mineraloškom sastavu, međusobnoj udaljenosti susjednih čestica te elektrokemijskom sastavu porne vode (Arbanas, 2006). Kohezija je značajna za sitnozrnata tla (glina, prah) jer postoji manji razmak između njihovih čestica što povećava intenzitet privlačnih sila. Te su sile rezultat privlačenja molekula susjednih čestica koje su apsorbirane u vodi. Osobine apsorbirane vode oko čestica ovise o veličini čestica, temperaturi te količini i vrsti otopljenih minerala (Nonveiller, 1979). Zapravo, u sitnozrnatom tlu ne prevlada dodir između samih čestica, nego privlačenje apsorbiranih molekula vode oko čestice. Do kohezije dolazi jer međusobni položaj čestica tla pričvršćuju sile koje djeluju na njihovim dodirnim točkama, a nisu uzrokovane djelovanjem vanjskih sila. Iako je jedan od glavnih parametara čvrstoće, kod krupnozrnatog tla ova komponenta čvrstoće ne postoji.

U praksi je moguća pojava velikih vrijednosti naprezanja koja mogu uzorkovati slom tla, a time i kolaps građevina. U tom slučaju, laboratorijskim pokusima je važno odrediti parametre čvrstoće pri takvim velikim naprezanjima. Na Slici 3 je vidljivo da povećavanjem normalnih naprezanja (σ_n) dolazi do smanjenja vrijednosti kuta unutarnjeg trenja za različite vrste tla, u usporedbi s manjim iznosima normalnih naprezanja. Razlog tome je koncentracija naprezanja u dodirnim točkama čestica pri velikim vrijednostima naprezanja na tlu. Pritom u kontaktnom području čestica nastaje lokalni slom i raste pokretljivost između čestica, što isto tako utječe na povećanje poroziteta tla, odnosno

smanjenja kuta unutarnjeg trenja. Uz tu pojavu, na smanjenje φ ima utjecaj i smanjenje dilatiranja pri velikim naprezanjima. Što je dilatiranje jače izraženo, to se mora utrošiti više energije na smicanje (Nonveiller, 1979).



Slika 3: Pokusi smicanja s visokim normalnim naprezanjima
(Nonveiller, 1979)

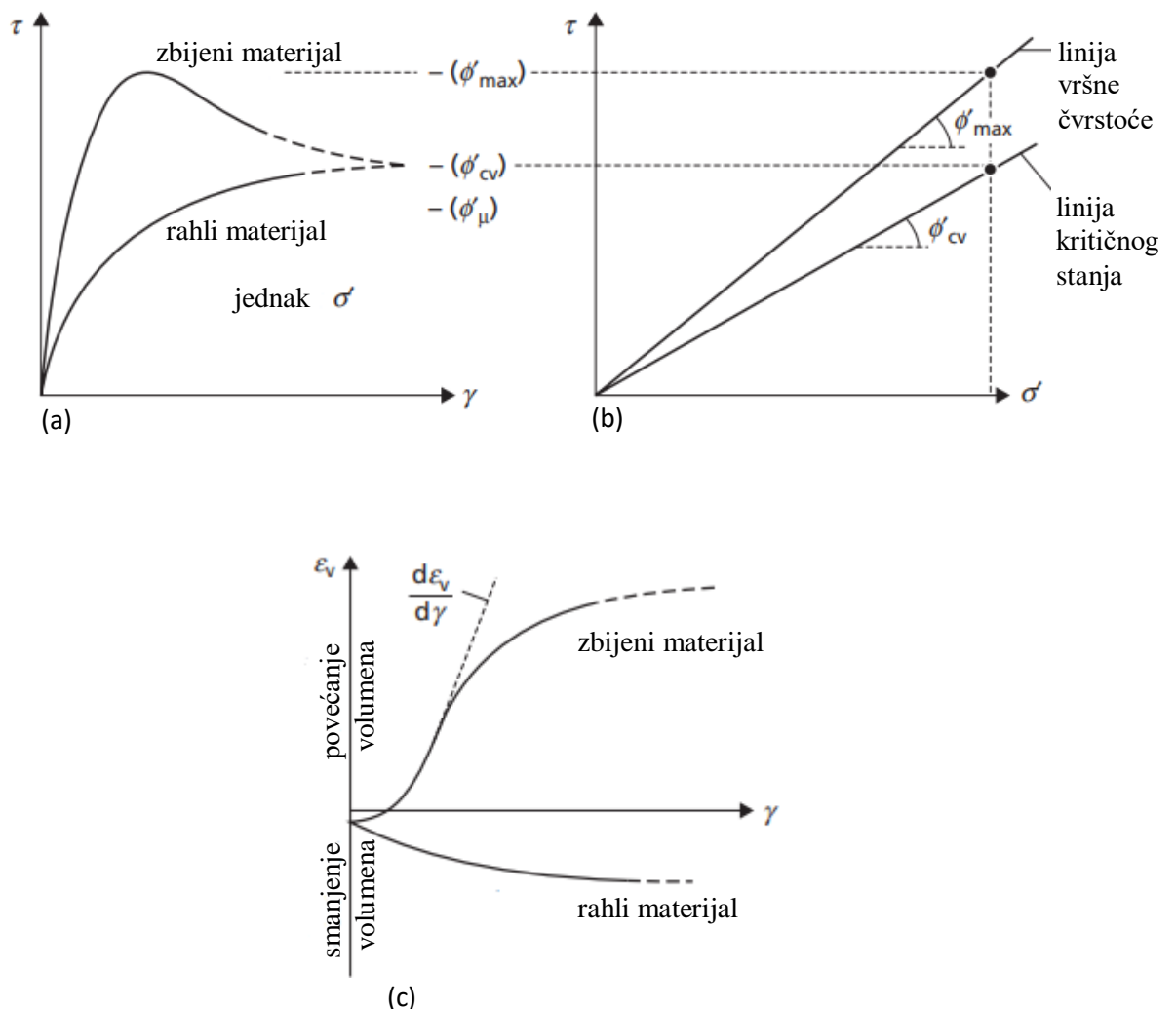
Uzevši u obzir spomenute posljedice uzrokovane djelovanjem velikih naprezanja na različite vrste tla (Slika 3), vidljivo je da za takve uvjete najbolje odgovara materijal dobro graduiranog granulometrijskog sastava (šljunak i pijesak). Pod time se podrazumijeva da su u materijalu dobro zastupljene sve veličine čestica: od najmanjih do najvećih, što rezultira gustom i kompaktnom strukturom tla. Takav materijal je najoptimalniji jer se na dodirnim točkama zrna koncentriraju manje sile i ne dolazi do lomljenja materijala te se vrijednost kuta unutarnjeg trenja materijala ne smanjuje (Nonveiller, 1979).

2.2. Čvrstoća nekoherentnog tla

Karakteristike posmične čvrstoće krupnozrnatog tla (pijesak i šljunak) određuju se najčešće pomoću uređaja za izravno smicanje ili triaksijalnog uređaja. S obzirom da čvrstoća i krutost ovise o efektivnom naprezanju, osobine suhog i potpuno saturiranog

pijeska ili šljunka su iste, pod uvjetom da su uvjeti drenirani, odnosno da se ne razvija porni nadtlak prilikom smicanja (Knappett & Craig, 2012).

Posmična čvrstoća nekoherentnog tla ovisi o geometriji i gustoći rasporeda čvrstih čestica, odnosno o koeficijentu pora. Zbijen i dobro graduiran pijesak ima karakterističnu krivulju u dijagramu posmično naprezanje – posmična deformacija kako je prikazano na Slici 4. Takav materijal pokazuje vršno naprezanje pri relativno maloj deformaciji (Slika 4 (a)). Poznato je da je ovakvo ponašanje posljedica međusobnog uklještenja pojedinačnih zrnaca tla i smanjene pokretljivosti. Svladavanjem ovog mehanizma pri većim deformacijama dolazi do smanjenja naprezanja.



Slika 4: Karakteristike posmične čvrstoće krupnozrnatih tala: (a) posmično naprezanje – posmična deformacija; (b) posmično naprezanje – efektivno naprezanje; (c) volumne deformacije – posmične deformacije (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Brzina nanošenja opterećenja i njegova veličina znatno utječu na volumne promjene tla. Za zbijena tla, s gustim rasporedom čestica, uz pojavu vršne čvrstoće, dolazi i do povećavanja volumena materijala, odnosno dilatiranja (Slika 4 (c)). Pojam dilatiranja tla se koristi za opisivanje povećanja volumena krupnozrnatog materijala tijekom smicanja. Brzina dilatiranja može se prikazati gradijentom $d\varepsilon_v/d\gamma$ (Slika 4(c)) i doseže maksimalnu vrijednost pri maksimalnom posmičnom naprezanju. Za nekoherentna tla čiji je kut trenja veći od 30° , vrijednost kuta dilatacije se može pretpostaviti prema izrazu:

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \quad (2)$$

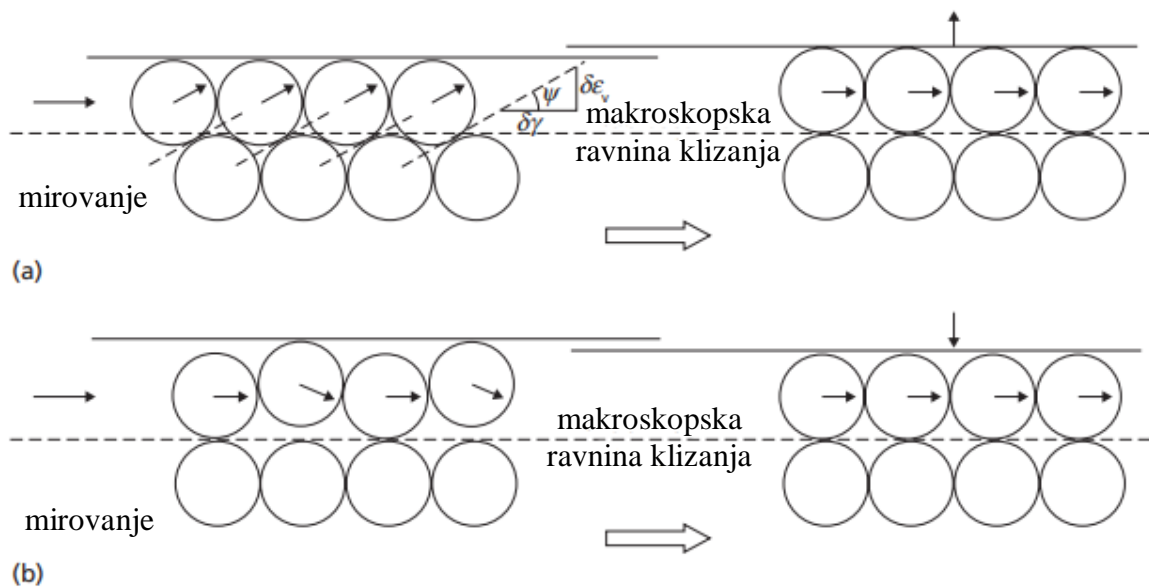
gdje je:

Ψ – kut dilatacije [$^\circ$];

φ – kut unutarnjeg kuta trenja [$^\circ$].

Makroskopska ravnina klizanja je horizontalna tijekom smicanja gusto zbijenog tla, a klizanje između čestica se odvija na brojnim mikroskopskim ravninama nagnutim pod različitim kutovima, kao što je prikazano na Slici 5 (a). Čestice se preko tih ravnina pomiču prema gore i preko susjednih čestica te dolazi do povećanja volumena (Knappett & Craig, 2012). U slučaju rahlog materijala, nema uklještenja između čestica koje treba svladati i posmično naprezanje postupno raste do određene vrijednosti, bez dosezanja prethodnog vrhunca (Slika 4 (a)). Za takav materijal je karakteristično smanjenje volumena, odnosno zbijanja čestica kao što je vidljivo na Slici 5 (b).

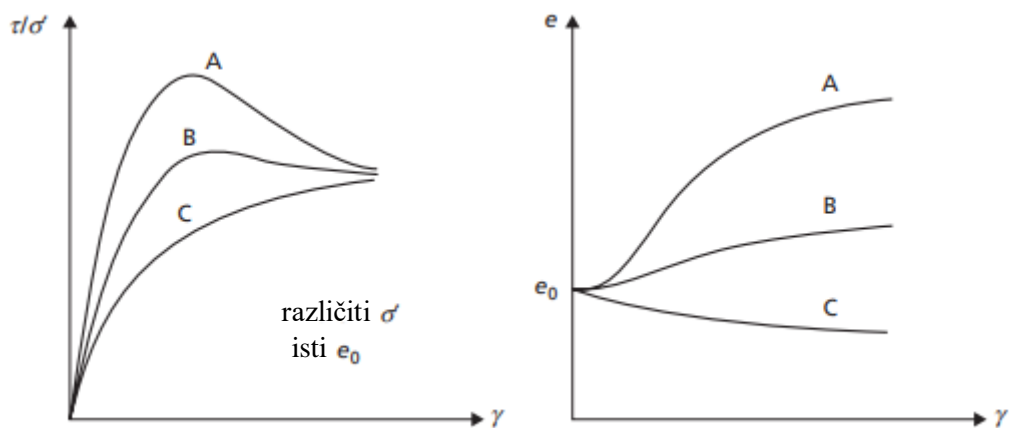
Laboratorijskim ispitivanjima je utvrđeno da se pri manjem koeficijentu pora volumen povećava, što dovodi do porasta efektivnog naprezanja i otpornosti na smicanje. Ukoliko je koeficijent pora veći, onda se efektivno naprezanje smanjuje kao i otpornost na smicanje. Volumen tla se smanjuje (zbijanje, kontrakcija) pri velikom početnom koeficijentu pora, a pri manjem koeficijentu pora se povećava (dilatacija). Poznavajući kritičnu vrijednost poroziteta nekog tla, moguće je predvidjeti promjenu volumena tla i spriječiti nastanak sloma tla (Nonveiller, 1979).



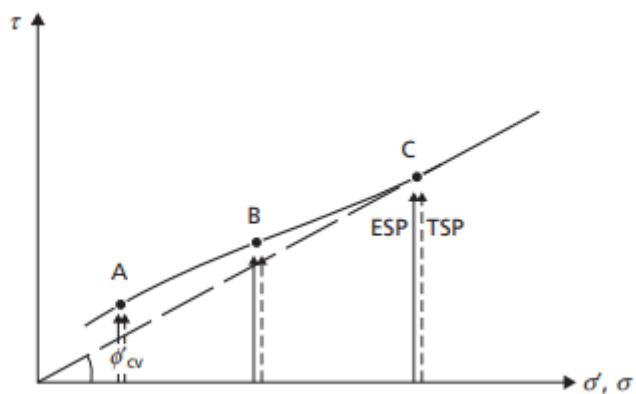
Slika 5: Mehanizam dilatacije u krupnozrnatim tlima: (a) inicijalno gusto zbijeno tlo koje dilatira; (b) inicijalno rahlo tlo koje pokazuje kontrakciju (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Za zbijeno tlo s gustim rasporedom čestica, maksimalni otpor na smicanje je određen iz vršnog naprezanja, φ_{max} te je veći od pravog kuta trenja, φ_{μ} između površina čestica. Razlika između ta dva kuta predstavlja potreban rad za svladavanje uklještenja među česticama i preraspodjelu čestica (Knappett & Craig, 2012). Krajnje vrijednosti posmičnog naprezanja zbijenog i rahlog materijala pri većim posmičnim deformacijama su jednake, kao što je prikazano na Slici 4 (a). S prestankom promjene volumena ili posmičnog naprezanja javlja se otpor konstantnog iznosa (Slika 4 (a) i (c)), što je poznato kao kritično stanje. Anvelopa sloma u Mohr-Coulomb-ovom zakonu je poznata kao linija kritičnog stanja (CSL – *critical state line*) pod kutom otpora na smicanje, φ_{cv} (Slika 4 (b)).

Laboratorijskim pokusima smicanja moguće je dobiti rezultate omjera naprezanja (τ/σ' kod pokusa izravnog smicanja) s obzirom na posmičnu deformaciju ili horizontalni pomak, kako je prikazano na Slici 6. Ispitivanju se podvrgavaju uzorci pijeska pod različitim efektivnim normalnim napreznjima, ali s istim početnim koeficijentom pora (e_0). Uzorci su označeni slovima A, B i C, s time da je uzorak A smican pri najmanjem efektivnom napreznju, a uzorak C najvećem. Rezultati pokazuju da se omjeri napreznja, τ/σ' i omjer šupljina, e smanjuju s povećanjem napreznja (Knappett & Craig, 2012), ali su konačne vrijednosti omjera napreznja iste.



Slika 6: Određivanje vršne čvrstoće iz podataka prikupljenih izravnim smicanjem (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)



Slika 7: Interpretacija rezultata određivanja vršne čvrstoća (modificirano prema Knappett & Craig, 2012)

Vršno posmično naprezanje u odnosu na efektivno normalno naprezanje prikazano je na Slici 7. Linija ucrtanih točaka nije ravna nego blago zakrivljena. Na grafu su prikazana dva traga naprezanja – efektivnog naprezanja (ESP – *effective stress path*) i ukupnog naprezanja (TSP – *total stress path*). Udaljenost između dvije vertikalne linije ESP i TSP predstavlja porni pritisak. Budući da je u ovom slučaju pritisak vode u porama približno nula, linije ESP i TSP se preklapaju. Povećanjem normalnog naprezanja dolazi do smanjenja razlike između vršne vrijednosti i vrijednosti posmičnog naprezanja pri kritičnom stanju, a to je posljedica smanjenja konačnog poroziteta tla. Što je konačni porozitet manji, to je i prostor za dilatiranje tla manji. Uz to, može doći i do drobljenja čestica pri velikim naprezanjima čime se smanjuje efekt dilatiranja na čvrstoću tla. Ukoliko nema cementacije ili bilo kakve druge veze između čestica krupnozrnatog tla,

zakrivljena linija vršne čvrstoće bi pokazivala nulu za posmičnu čvrstoću pri nultom efektivnom naprezanju. Takvo ponašanje nije kompatibilno s definiranjem čvrstoće tla kao ravne linije u Mohr-Coulomb-ovom modelu. Zbog toga se u praksi nelinearni dio zanemaruje i povlači se ravna linija vršnih naprezanja kako bi se odredila vršna čvrstoća tla, odnosno kut trenja i kohezija (Knappett & Craig, 2012).

3. UREĐAJ ZA IZRAVNO SMICANJE

Jedan od jednostavnijih uređaja za određivanje parametara čvrstoće tla u laboratoriju je uređaj za izravno smicanje (direktan posmik). Ispituje se uzorak sitnozrnatog ili krupnozrnatog tla ugrađen u aluminijsku kutiju za smicanje koja se sastoji od gornjeg i donjeg dijela. Uzorak se konsolidira na određenom vertikalnom opterećenju, a zatim se provodi prisilno smicanje po horizontalnoj ravnini, pri čemu se donji dio kutije najčešće pomiče dok gornji ostaje na svom mjestu. Pokus se provodi u dvije faze – konsolidacija i smicanje. Osnovne karakteristike uređaja za direktan posmik su prikazane na Slici 8.

Uzorak tla se ugrađuje u kutiju na čijem se dnu nalazi porozni kamen koji svojom hrapavošću sprječava klizanje uzorka po dnu kutije i omogućava slobodno dreniranje vode. Nakon ugradnje, postavlja se porozna pločica na vrh uzorka s istom funkcijom te se cijela kutija potopi vodom. Nakon saturacije uzorka nanosi se vertikalno opterećenje koje uzrokuje konsolidaciju. Pri tome uzorak mijenja svoj volumen, brzinom i iznosom ovisno o vrsti tla koja se ispituje. Po završetku konsolidacije uzorak se smiče kontroliranim prirastom deformacije ili naprezanja. U prvom slučaju, brzina smicanja bira se dovoljno sporom da se osiguraju drenirani uvjeti na plohi smicanja. Tijekom smicanja bilježi se vrijednost vertikalnog i horizontalnog pomaka, te horizontalne sile u određenim vremenskim intervalima.



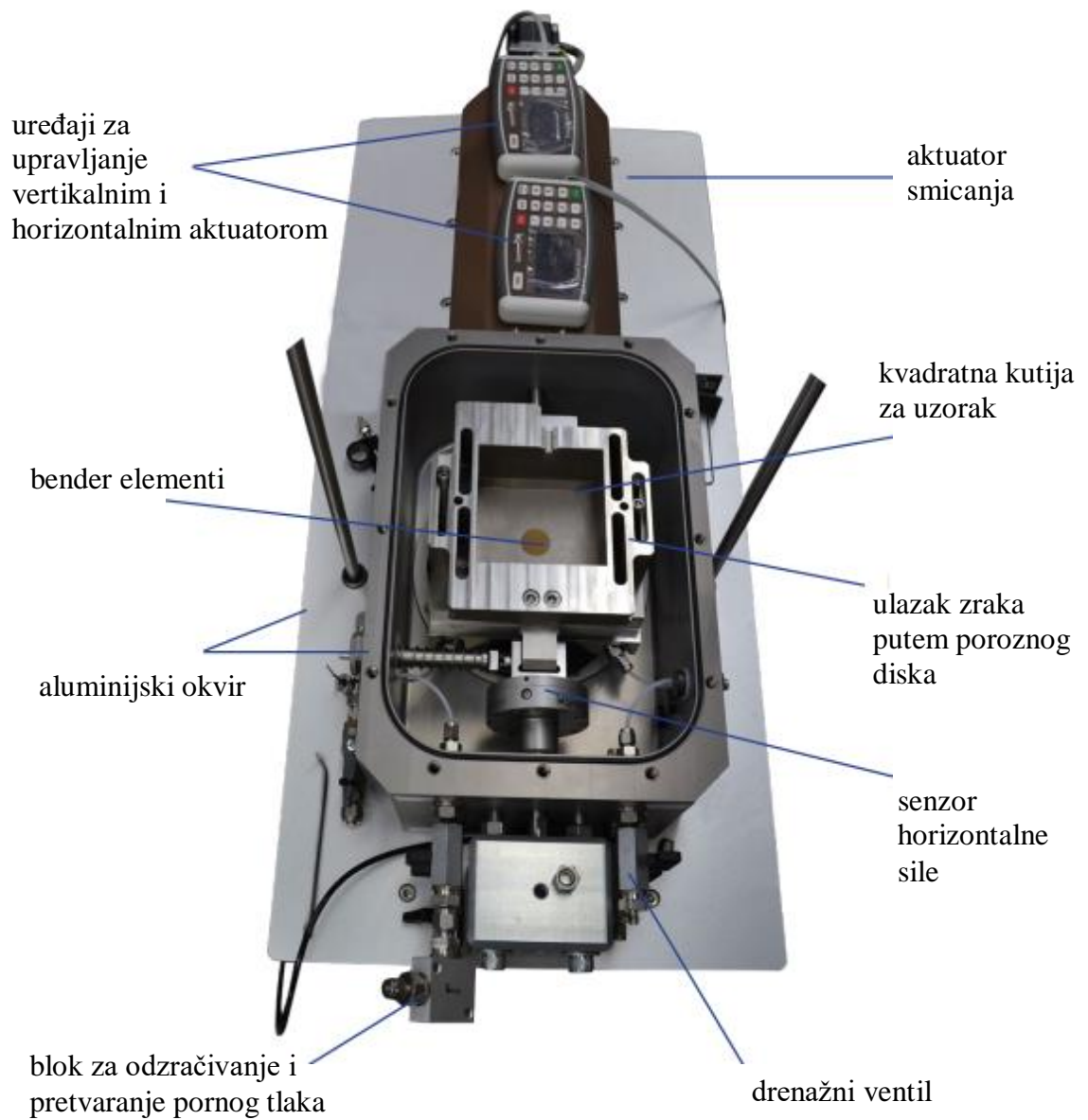
Slika 8: Uređaj za izravno smicanje (modificirano prema <https://www.vjtech.co.uk/blog/an-introduction-to-direct-shear-testing>)

Unatoč jednostavnosti uređaja i jeftinijoj varijanti ispitivanja čvrstoće nekoherentnog tla zbog pripreme uzoraka, uređaj ima nekoliko bitnih nedostataka. Neki od njih su: i) nemogućnost mjerenja pornog tlaka; ii) smanjenje površine smicanja porastom posmične deformacije; iii) nehomogenost stanja naprezanja na plohi smicanja (Arbanas, 2006). Isto tako, tijekom smicanja uzorka pojavljuje se trenje između gornjeg i donjeg dijela kutije koje se ne mjeri, ali može uzrokovati pogreške rezultata.

3.1. GDSBPS – uređaj za izravno smicanje tvrtke GDS Instruments

Za određivanje čvrstoće uzorka tla u ovom radu se koristio uređaj za direktno smicanje s mogućnošću kontroliranja pozadinskog tlaka (eng. *back pressure*) tvrtke GDS Instruments. Pomoću njega se može kontrolirati porni tlak u uzorku što omogućuje modeliranje stvarnih situacija u laboratoriju poput stvaranja uvjeta aktivnih klizišta. Također, uređaj implementira metodu transliranih osi za ispitivanje uzoraka tla u uvjetima parcijalne saturacije. Međutim, za potrebe ovog rada uređaj je korišten kao konvencionalni aparat za direktno smicanje uzoraka tla u saturiranim uvjetima otvoren prema atmosferi, s pornim pritiskom jednakim hidrostatskom pritisku vode koji je bio, kako će se kasnije potvrditi, dovoljno malen da se može zanemariti pri interpretaciji rezultata. U nastavku je kratko opisana procedura ugradnje i ispitivanja uzoraka.

Uzorak se stavlja u kutiju za smicanje standardne veličine 100 mm x 100 mm. Ona je smještena unutar uređaja (Slika 9) te je spojena na aktuator i ćeliju. Na uređaj se postavlja poklopac koji se pričvrsti vijcima i čeličnom gredom. Nakon toga, klip za nanošenje aksijalnog opterećenja se dovodi u kontakt s uzorkom i uzorak je spreman za ispitivanje te započinje konsolidacija preko vertikalnog senzora koji nanosi opterećenje. Jednom kada je uzorak konsolidiran, definiraju se uvjeti ispitivanja – brzina smicanja i iznos horizontalnog pomaka. Definira se maksimalno dopušten horizontalan pomak i provodi se smicanje. Tijekom ispitivanja bilježe se vrijednosti vertikalnih i horizontalnih pomaka uzorka, odnosno vertikalne i horizontalne sile pomoću kojih se interpretiraju rezultati pokusa i određuju parametri čvrstoće ispitivanog materijala. Rad uređaja i pokusi koji se provode su kontrolirani putem GDSLAB softvera. Pomoću njega se definiraju svi uvjeti pokusa – iznos vertikalnog opterećenja, brzine smicanja, maksimalno dopuštene vrijednosti pomaka i sila, kao i učestalost snimanja rezultata.



Slika 9: Uređaj za izravno smicanje (GDSBPS) (modificirano prema https://www.gdsinstruments.com/__assets__/Products/00029/GDSBPS_Datasheet.pdf)

4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE I REZULTATI

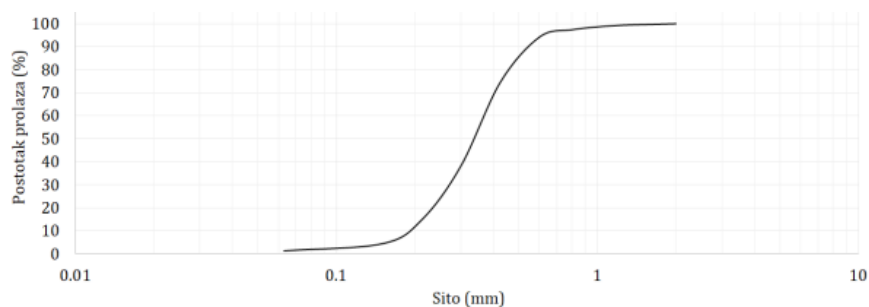
Materijal pijeska ispitivan u okviru ovog rada korišten je i koristi se u sklopu nekoliko znanstveno-istraživačkih projekata, uključujući i „ModLandRemSS“ projekt Hrvatske zaklade za znanost. U ovom dijelu rada prikazane su osnovne značajke ispitivanog pijeska, opis ugradnje i tijek ispitivanja. Zatim su prikazani rezultati pokusa te njihova interpretacija.

4.1. Osnovne značajke ispitivanog pijeska

U Tablici 1 su navedene osnovne značajke korištenog pijeska. Granulometrijski sastav tla predstavlja sadržaj zrna različite veličine, određen u postotku težine tla. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava tla, u ovom slučaju pijeska, se prikazuju granulometrijskim dijagramom, odnosno granulometrijskom krivuljom (Slika 10).

Tablica 1: Osnovne značajke ispitivanog pijeska

e_{max}	0,919
e_{min}	0,641
G_s	2,7
D_{10} [mm]	0,195
D_{30} [mm]	0,27
D_{60} [mm]	0,368
P_{200} [%]	1,2429
C_u	1,8947
C_c	1,0657



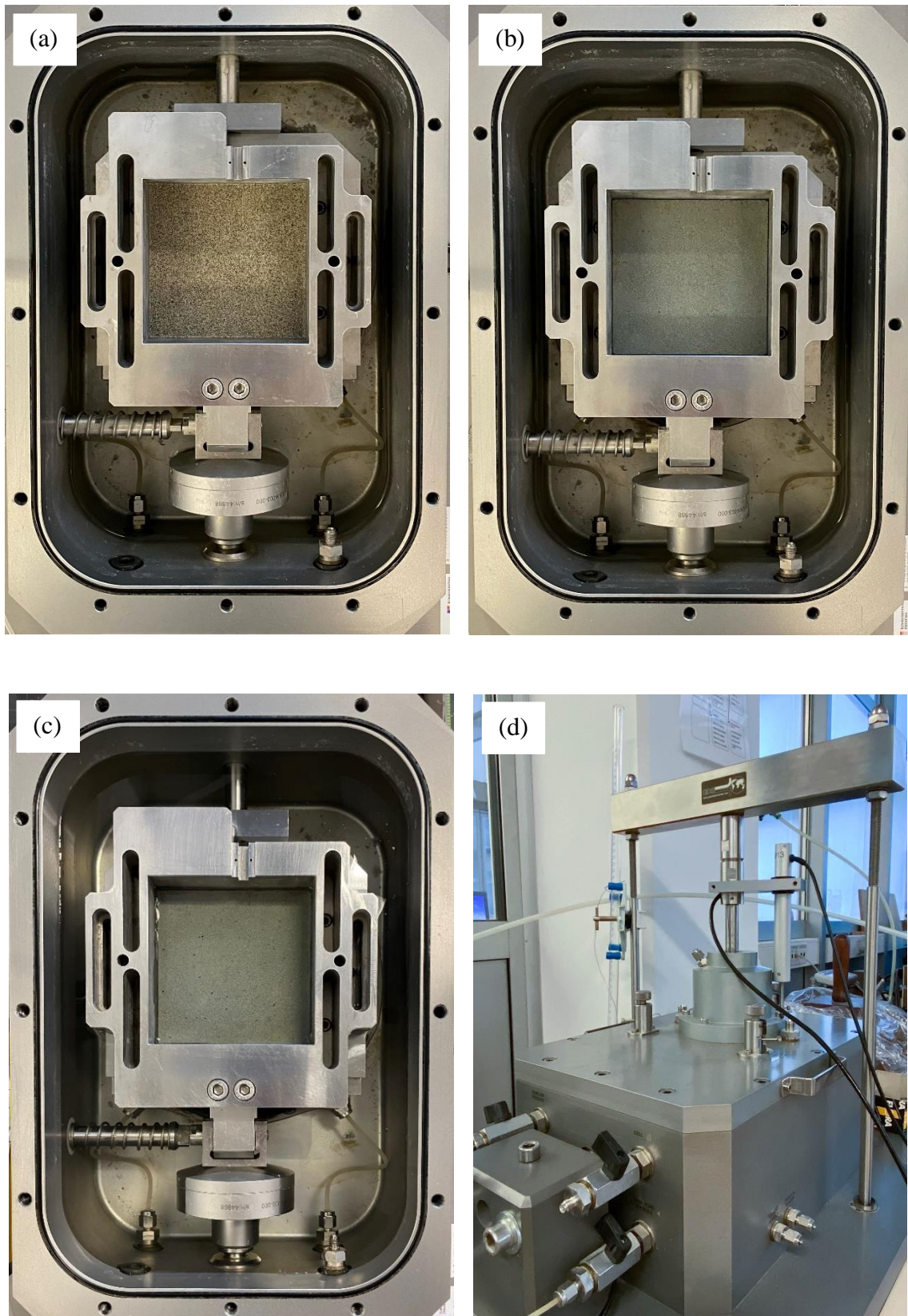
Slika 10: Granulometrijska krivulja pijeska (Špoljarić, 2021)

4.2. Opis ugradnje i tijek ispitivanja

Provedena su ispitivanja finog pijeska za šest različitih vertikalnih naprezanja: 4, 8, 16, 30, 60 i 120 kPa. Svako opterećenje je nanoseno na novo ugrađeni uzorak visine 30 mm ugrađenog na relativnu zbijenost od 50%. Gustoća ispitivanih uzoraka određena je prema uvjetima ugradnje materijala u umanjenim fizičkim modelima kosina. Na temelju poznatih uvjeta u smislu željenog poroziteta i početne vlažnosti ispitivanih uzoraka, određena je masa pijeska i vode koja je zamiješana i ugrađena u uređaj. Postupak ugradnje pijeska prikazan je na Slici 11.

Pijesak se stavlja u kutiju za smicanje veličine 10 cm x 10 cm u nekoliko slojeva. Materijal se ravnomjerno rasporedi po površini kutije te se zbija sve dok konačna visina uzorka ne bude točno 30 mm. Nakon što je pijesak pravilno zbijen, na vrh se postavlja porozni kamen te se uzorak i okolni prostor uređaja potopa vodom. Pijesak se pušta potopljen pod vodu tijekom najmanje 24 sata prije ispitivanja, nakon čega se smatra da je uzorak potpuno saturiran. Razina vode u ćeliji korigira se na način da visina vode iznad plohe smicanja odgovara oznaci na čeličnoj plohi (iznosi točno 26 mm). Zatim se uređaj zatvara i pomoću GDSLAB softvera se određuju parametri pokusa.

Kao što je i ranije spomenuto, pokus se provodi u dvije faze, od kojih je prva konsolidacija. No, prije nego što dođe do konsolidacije treba uzeti u obzir „nulta“ faza koja obilježava kontakt – naslanjanje vertikalnog aktuatora na uzorak, odnosno porozni kamen. Na temelju poznate visine uzorka u trenutku kontakta ($h_i = 30 \text{ mm}$) može se proračunavati promjene visine uzorka tijekom različitih faza pokusa. Prva, odnosno „nulta“ faza pokusa traje vrlo kratko i ima visoku frekvenciju zapisa podataka kako bi se čim preciznije odredila vrijednost aksijalnog pomaka koja se uzima kao referirajuća za određivanje visine uzorka tijekom pokusa. Nakon ovoga slijedi faza konsolidacije u kojoj se uzorak podvrgava određenoj vrijednosti normalnog (vertikalnog) naprezanja. Završetkom konsolidacije slijedi faza u kojoj se uzorak podvrgava smicanju brzinom od 0,0083 mm/min. Svakih 60 s bilježi se vrijednost horizontalne sile, horizontalnog i vertikalnog pomaka, pri čemu je maksimalna vrijednost posmičnog pomaka 12,5 mm. Nakon što je ispitivanje provedeno, vijci se otpuštaju i poklopac se skida s uređaja. Potrebno je ukloniti 2/3 vode koja se nalazi u uređaju zbog lakšeg odstranjivanja poroznog kamena i pijeska u kutiji. Za sljedeće ispitivanje, pri većem naprezanju, upotrebljava se ista receptura, odnosno uzorak pijeska iste mase i vlažnosti te se zbija i ugrađuje na isti način kao prethodni uzorak.

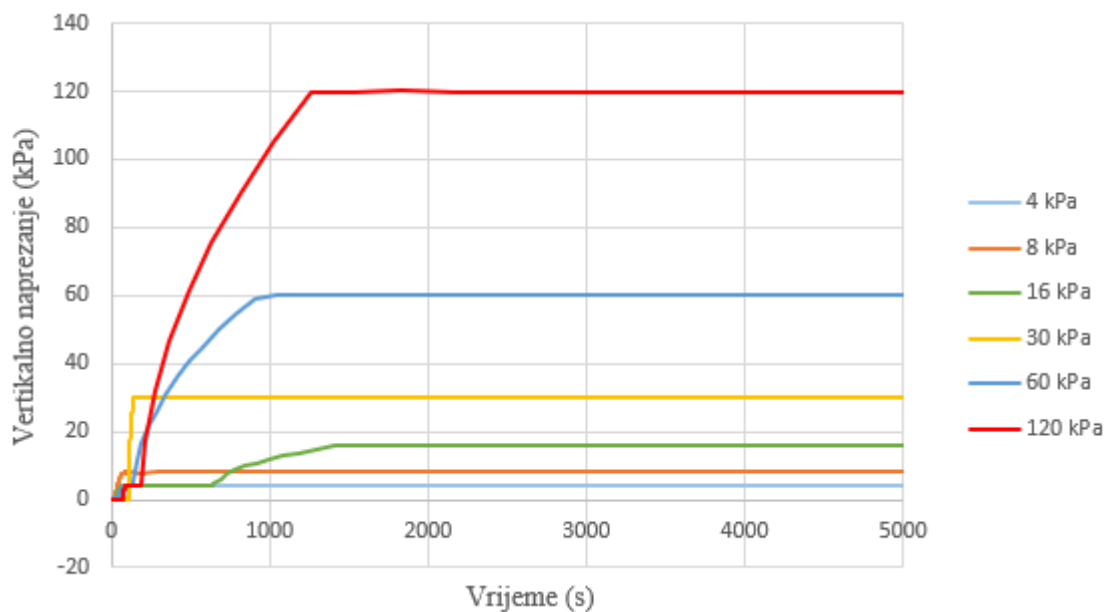


Slika 11: Postupak ugradnje uzorka: (a) zbijanje uzorka u slojevima; (b) postavljanje porznog kamena; (c) potapanje uzorka pod vodu; (d) zatvaranje uređaja

4.3. Prikaz rezultata

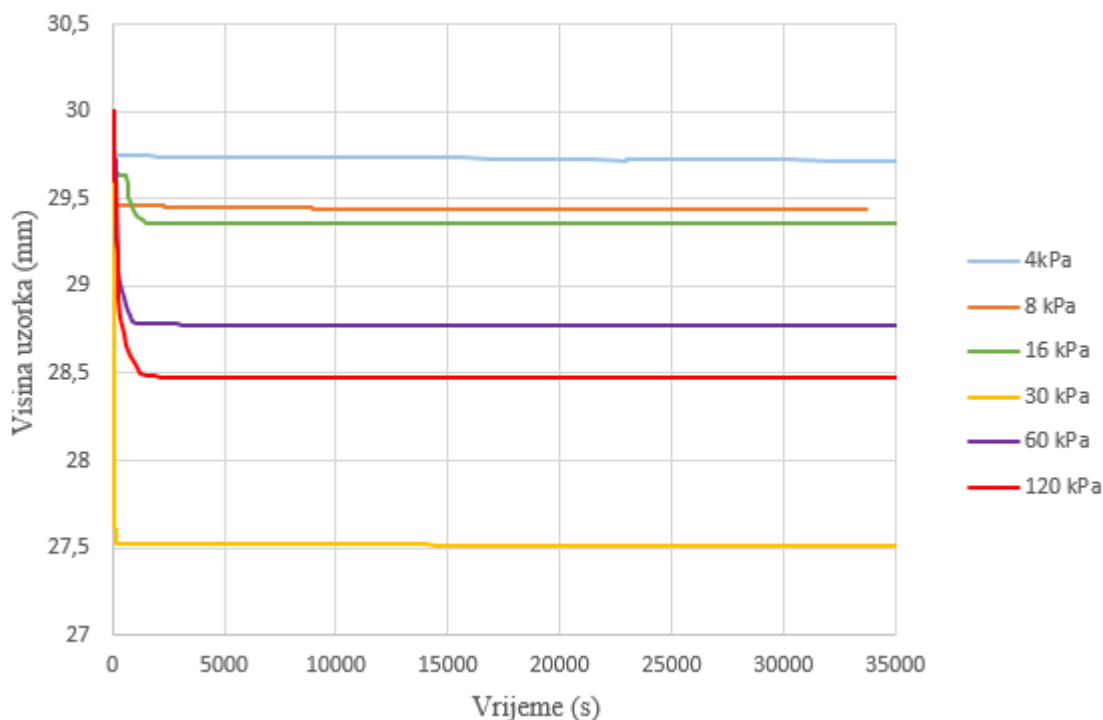
Dobiveni rezultati pokusa prikazani su u ovom poglavlju u obliku dijagrama. Ispitivanja su provedena na šest uzoraka pripremljenih na isti način, ali smicanih pri različitim normalnim efektivnim naprezanjima.

Na Slici 12 su prikazani rezultati za prvu fazu pokusa, odnosno konsolidaciju. Porast opterećenja, odnosno aksijalnog naprezanja je zadan postepeno te nakon određenog vremena postiže svoju konstantnu vrijednost.



Slika 12: Dijagram vertikalnog naprezanja u vremenu

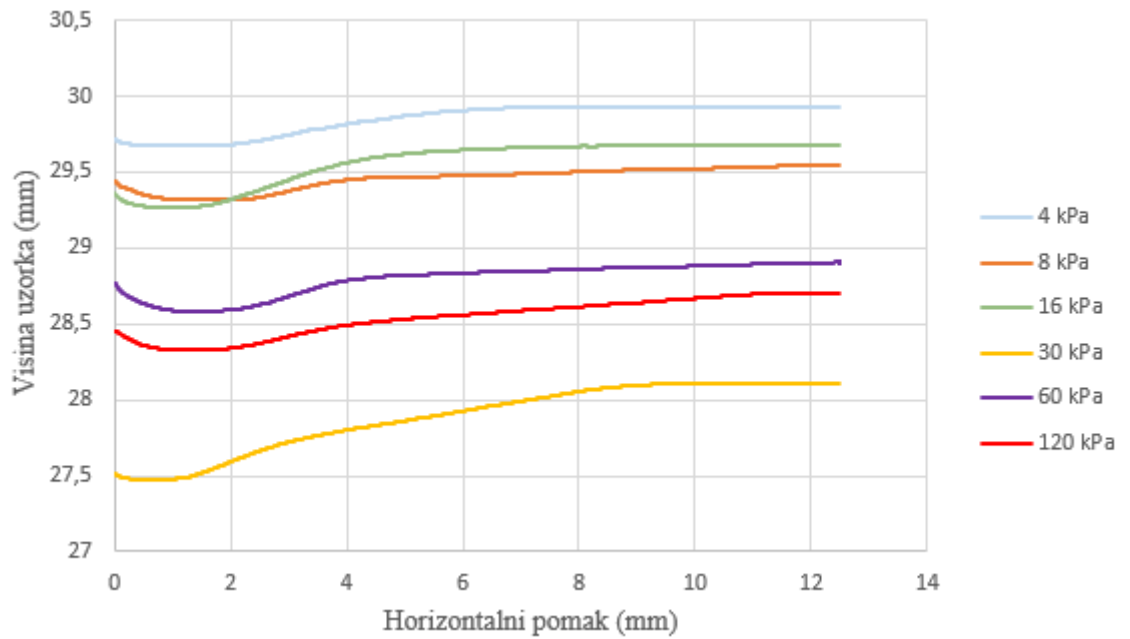
Početa visina uzorka prije nanošenja opterećenja iznosi 30 mm te se ona smanjuje povećavanjem opterećenja. Pri malim naprezanjima od 4 i 8 kPa, visina uzorka se neprimjetno smanjila za ili manje od 0,5 mm (Slika 13). Najveća promjena visine tijekom konsolidacije je pokazao uzorak naprezan s 30 kPa. Njegova visina se smanjila za 2,5 mm te je visina iznosila 27,5 mm, što je najmanja visina uzorka po završetku prve faze. Ostali uzorci naprezani s 16, 60 i 120 kPa su pokazali očekivane promjene visine.



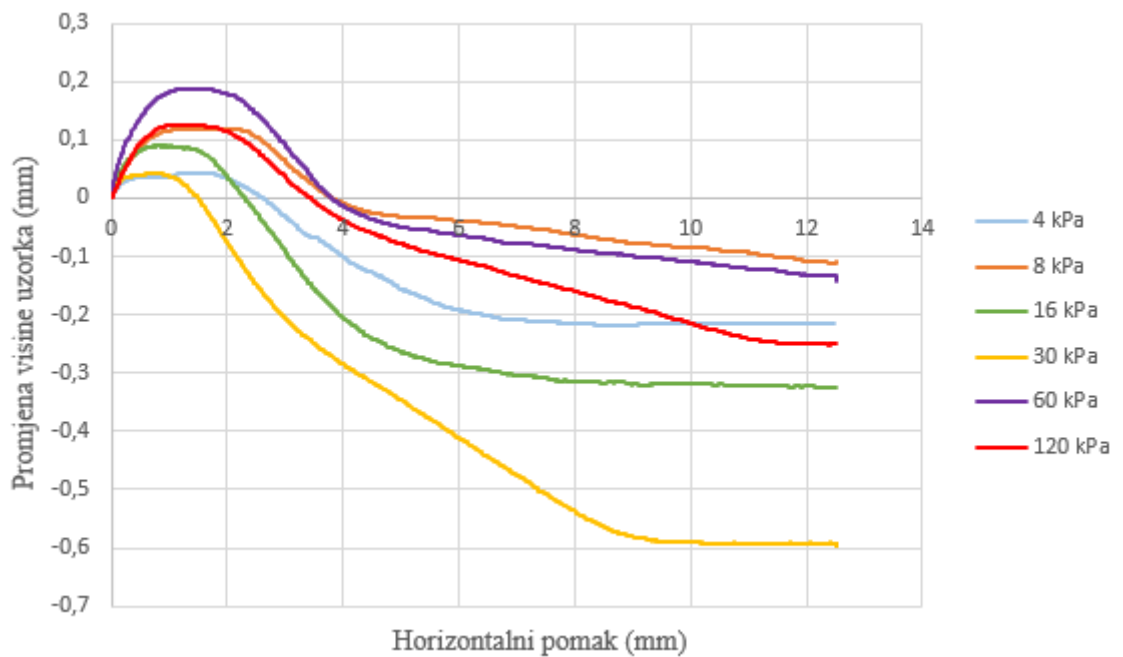
Slika 13: Visine uzorka tijekom konsolidacije

Prilikom smicanja, početne visine uzorka poprimaju vrijednosti koje su postignute završetkom konsolidacije (Slika 13). Svi uzorci pijeska smicani pri različitim vrijednostima normalih efektivnih naprežanja pokazuju slično ponašanje, ujedno i očekivano za krupnozrnata tla. Djelovanjem horizontalnog pomaka, čiji je maksimalan iznos 12,5 mm, pijesak se zbija, a nakon toga dilatira do određene vrijednosti te zadržava svoju konstantnu visinu (Slika 14). Pri najmanjim naprežanju od 4 kPa uzorak je nakon horizontalnog pomaka dilatirao skoro do početne visine od 30 mm (Slika 14).

Na Slici 15 su prikazane promjene visina uzorka pijeska, odnosno promjene početnih i konačnih visina tijekom smicanja. Dijagram na Slici 15 prikazuje dilatiranje, odnosno povećanje visine uzorka u vidu, negativnih vrijednosti. Zbijanje uzorka prikazuje se kao pozitivne vrijednosti promjene visine. Najveću promjenu visine tijekom smicanja pokazuje uzorak konsolidiran 30 kPa (za više od 0,5 mm), ali i dalje taj uzorak ima najmanju visinu po završetku druge faze, kao što je imao i kod završetka prve faze.



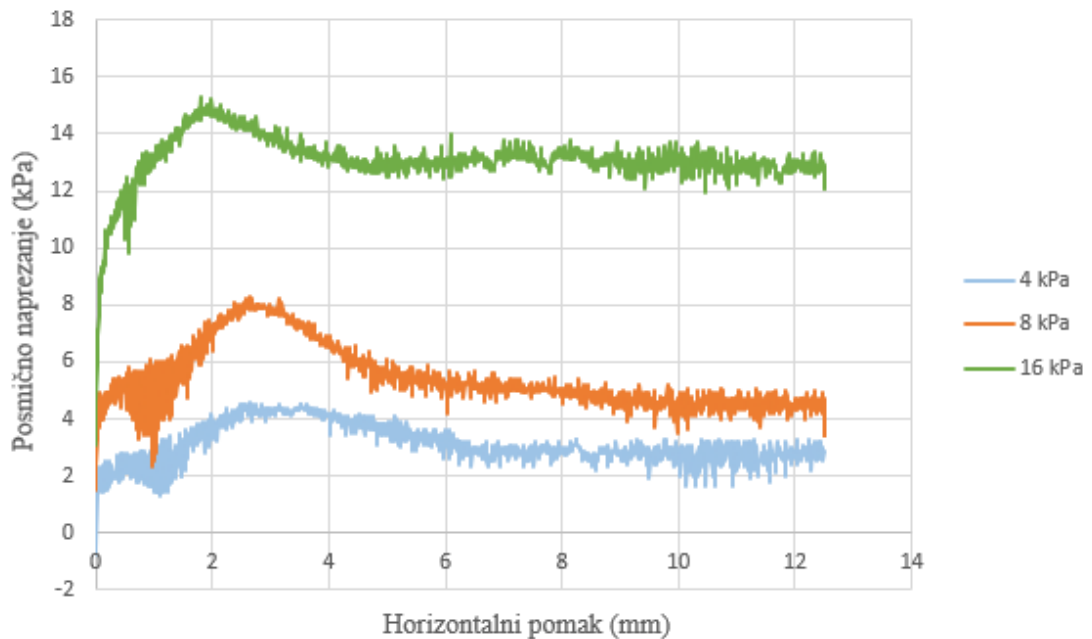
Slika 14: Visine uzoraka tijekom smicanja



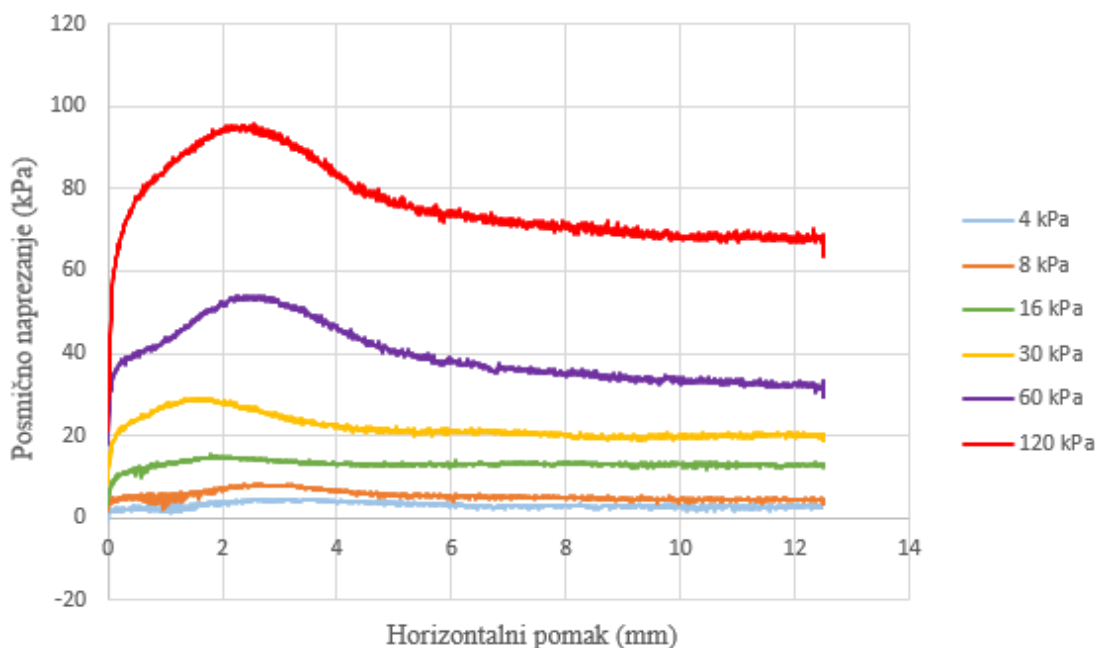
Slika 15: Promjene visina uzoraka tijekom smicanja

Uzorci ispitivani pri normalnim napreznjima od 4, 8 i 16 kPa imaju jedva primjetne vrijednosti vršnog posmičnog napreznja, kako je prikazano na Slici 16. Nakon smanjenja posmičnog napreznja s razvojem posmične deformacije zadržavaju konstantne

vrijednosti do završetka smicanja. Uzorci ispitivani pri većim napreznjima, od 30, 60 i 120 kPa, pokazuju jasno izražene vršne i rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće. Na Slici 17 su prikazana posmična napreznja pri svim normalnim efektivnim napreznjima od 4 do 120 kPa. Najveća (vršna) posmična vrijednost iznosi 95,6 kPa pri 2,54 mm te kasnije poprima vrijednosti od 63,7 kPa za uzorak smican pri normalnom efektivnom napreznju od 120 kPa. Najmanju posmičnu vrijednosti uzrokuje napreznje od 4 kPa te njezino vršno napreznje iznosi 4,6 kPa pri 2,64 mm, a rezuidualno 2,9 kPa.



Slika 16: Posmično napreznje s obzirom na horizontalni pomak pri 4, 8, 16 kPa

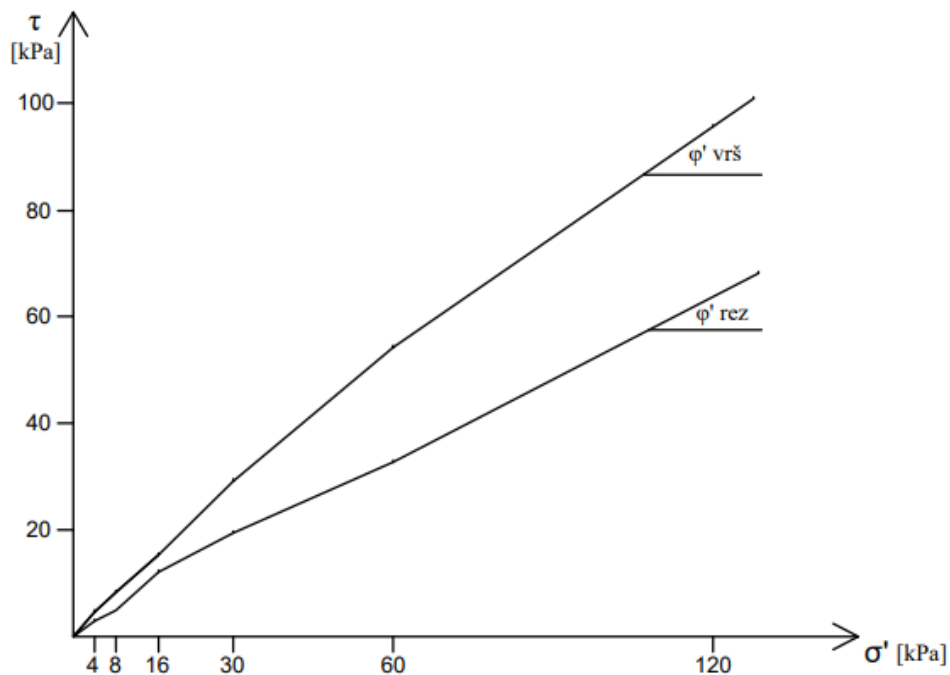


Slika 17: Posmično napreznje s obzirom na horizontalni pomak

4.4. Interpretacija rezultata

Na Slici 18 su interpretirani rezultati pokusa za određivanje parametara posmične čvrstoće. Prikazane su vršne vrijednosti kuta trenja i vrijednosti za kritično stanje. Na apscisi se nalazi efektivno normalno naprezanje koje smo odabrali za ispitivanja, a na ordinati vrijednosti posmičnog naprezanja (Slika 18). Gornja linija predstavlja vršne vrijednosti posmičnog naprezanja (otpora), a donja rezidualne vrijednosti, odnosno kritično stanje (pod pretpostavkom da je isto dosegnuto u svim pokusima). Vrijednosti rezultata pokusa prikazanih za vršne (i rezidualne) uvjete pri malim efektivnim naprezanjima pokazuje nelinearan odnos, ali s povećanjem naprezanja odnos postaje linearan. S obzirom da se radi o nekoherentnom materijalu, pretpostavljeno je da obje linije počinju iz nule.

Pomoću dobivenih vrijednosti posmične čvrstoće može se odrediti kut trenja za vršno i kritično stanje kako je prikazan u Tablici 2. Kut trenja iznosi 49° za naprezanje od 4 kPa te za naprezanja od 8, 16, 30 i 60 kPa oscilira od 45° do 40° . Za najveće naprezanje u ovom pokusu na 120 kPa, kut unutarnjeg trenja iznosi 35° , što je karakteristično za krupnozrnata tla.



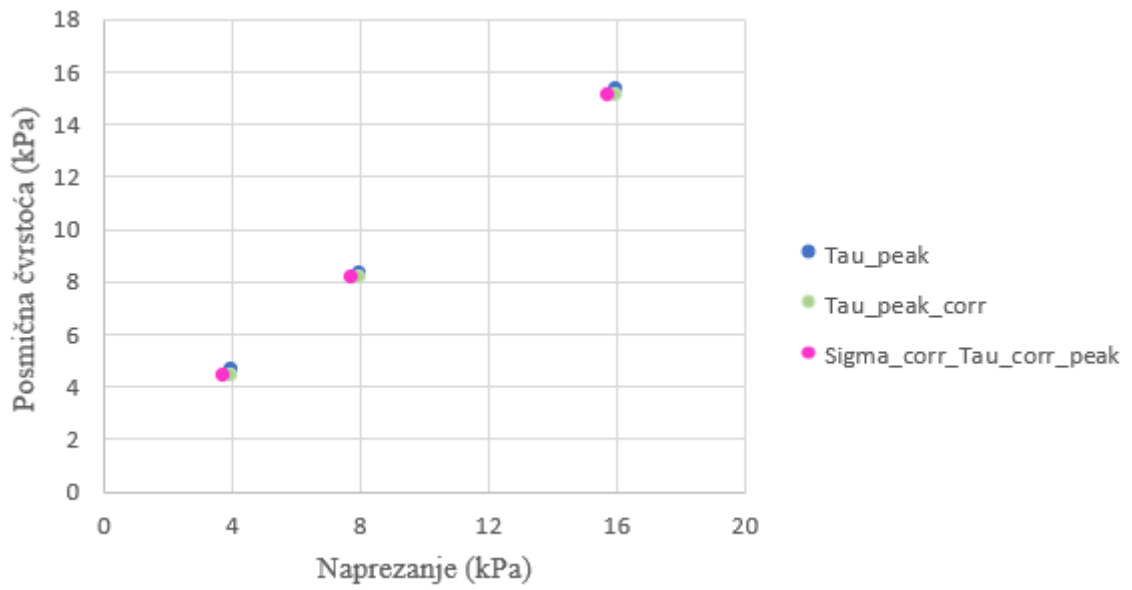
Slika 18: Vršna i rezidualna vrijednost posmičnog naprezanja

Tablica 2: Vrijednosti vršnih i rezidualnih kutova trenja

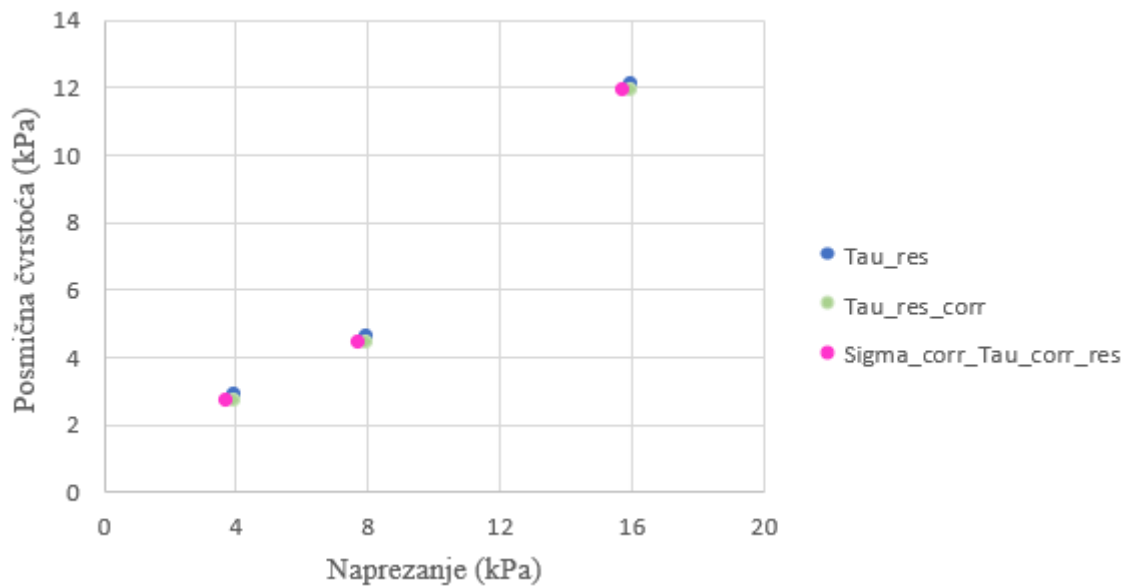
σ [kPa]	0 - 4	4 - 8	8 - 16	16 - 30	30 - 60	60 - 120
$\varphi'_{\text{vrš}}$ [°]	49	44	41	45	40	35
φ'_{rez} [°]	36	23	43	28	24	27

Zbog interpretacije rezultata provedeno je još jedno ispitivanje, ali bez uzorka i s ćelijom ispunjenom samo vodom. Razina vode u ćeliji i brzina smicanja bile su iste kao i u slučaju pokusa na uzorcima pijeska. Tim ispitivanjem se dobiva vrijednost otpora samog sustava. Međutim, rezultati ovog pokusa pokazali su da je trenje sustava zanemarivo (iznosi 0,2 kPa i konstantnog je iznosa od 0 do maksimalnog horizontalnog pomaka od 12,5 mm) i da ne utječe značajno na rezultate smicanja pijeska. Kao što je ranije spomenuto, korištena brzina smicanja je dovoljno spora u odnosu na propusnost ispitivanog pijeska da bi se smicanje odvijalo u potpuno dreniranim uvjetima. Zbog toga, jedini porni pritisak na plohi smicanja je onaj koji postoji uslijed hidrostatskog pritiska vode i odgovara visini stupca vode od 26 mm. Kako je prikazano na Slici 19, porni pritisak i trenje na plohi smicanja imaju zanemariv utjecaj na interpretaciju rezultata pokusa, odnosno parametre čvrstoće. Na grafu (Slika 19) su prikazane vršne vrijednosti posmične čvrstoće pri malim naprezanjima od 4, 8 i 16 kPa. Vršnu posmičnu čvrstoću s obzirom na normalno naprezanje prikazuje plava točka, zelena točka prikazuje vršnu čvrstoću kojoj je oduzet otpor sustava pri normalnom naprezanju, a ružičasta točka pripada vršnoj čvrstoći pri efektivnom naprezanju, odnosno naprezanju kojemu je oduzet porni pritisak.

Vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće su prikazane na Slici 20. Plava, zelena i ružičasta točka na Slici 20 imaju isto značenje kao i točke na Slici 19, osim što umjesto vršne posmične čvrstoće prikazuju rezidualnu. Upravo se iz interpretacije rezultata zaključuje, kako je i ranije spomenuto, da se porni pritisak, kao i trenje sustava može zanemariti.



Slika 19: Vršne vrijednosti posmične čvrstoće pri malim napreznjima od 4, 8 i 16 kPa



Slika 20: Rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće pri malim napreznjima od 4, 8 i 16 kPa

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Postupak ispitivanja uzoraka jednoliko graduiranog pijeska, za određivanje parametara čvrstoće, je proveden na uređaju za izravno smicanje te su prikazani rezultati pokusa. Ugrađeno je šest uzoraka finog pijeska identičnih značajki, visine 30 mm i opterećenih različitim normalnim naprezanjima. U sklopu ovog rada prikazani su rezultati pokusa određivanja posmične čvrstoće uzorka pri rasponu naprezanja od 4 kPa pa do 120 kPa.

Rezultati rada pokazuju da sustav uređaja ima vrlo malen otpor koji ima zanemariv utjecaj na interpretaciju rezultata. Također, s obzirom na malu visina razine vode iznad plohe smicanja, korekcija normalnog naprezanja za vrijednost pornog pritiska može se zanemariti. Interpretacijom rezultata dobiveni su vršni parametri čvrstoće i parametri čvrstoće za kritično stanje ispitivanog pijeska, odnosno kut unutarnjeg trenja dok kohezija iznosi nula.

Jednolično graduirani pijeska koji je ispitivan u radu korišten je u sklopu istraživačkog projekta „ModLandRemSS“ i mnogih drugih projekata u kojima se istražuje ponašanje umanjenih modela kosina na različite uvjete opterećenja, kao i efikasnost različitih mjera za sanaciju klizišta. Za rješavanje uobičajenih problema u inženjerskoj praksi potrebno je poznavati ponašanje materijala i njegove parametre čvrstoće – kut unutarnjeg trenja i koheziju. Značajke čvrstoće određene pri malim vrijednostima efektivnih naprezanja su interesantna za interpretaciju rezultata umanjenih modela. Naime, interpretaciju rezultata dobivenih na umanjenim modelima kosina u laboratoriju dodatno otežava nelinearnost anvelope sloma tla pri malim vrijednostima efektivnih naprezanja. Kod klizišta realnih dimenzija mjerodavna su znatno veća efektivna naprezanja i nelinearnost kriterija čvrstoće najčešće ne dolazi do izražaja.

Osnovne prednosti uređaja za izravno smicanje korištenog u radu (GDS Instruments) su u jednostavnosti i brzini izvođenja pokusa, kao i zanemarivom otporu unutar sustava. Međutim, nesavršenosti pri ugradnji uzoraka i određenim fazama pokusa (primjerice određivanja trenutka kontakta kod „nulte“ faze) unose nepouzdanost u dobivene rezultate. S obzirom na vrlo male vrijednosti naprezanja pri kojima se uzorci ispituju, ovakve „nesavršenosti“ mogu značajno utjecati na rezultate ispitivanja.

LITERATURA

- Arbanas, Ž., Mehanika tla i stijena – predavanja, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2006.
- Arbanas, Ž., Modland, <https://modland.uniri.hr/?lang=hr>, pristup 03.05.2023.
- GDS Back Pressured Shearbox, http://www.gdsinstruments.com/assets/Products/00029/GDSBPS_Datasheet.pdf, pristup 20.04.2023.
- GDS – prednosti i nedostaci, https://www.answers.com/civil-engineering/Advantages_and_disadvantages_of_the_shear_box_test, pristup 24.04.2023.
- Jagodnik, V.; Ljutić, K., Određivanje parametara čvrstoće pijeska u prijenosnom aparatu za direktni posmik, Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), XIV, Rijeka, 2011.
- Knappett, J. A.; Craig, R. F., Craig's Soil Mechanics, Spon Press, London, 2012.
- Kut dilatacije, <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/angle-of-dilation-01/>, pristup 26.06.2023.
- Mihalić, S., Inženjerska svojstva materijala – skripta, https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/06_poglavlje.pdf, pristup 18.04.2023.
- Mehanika tla, https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mehanika_tla.pdf, pristup 18.04.2023.
- Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- Peranić, J.; Čeh, N.; Arbanas, Ž., The Use of Soil Moisture and Pore-Water Pressure Sensors for the Interpretation of Landslide Behavior in Small-Scale Physical Models, Sensors, Rijeka, 2022.
- Powrie, W., Soil Mechanics, Spon Press, London, 2004.
- Szavits-Nossan, V., Mehanika tla i stijena – predavanja, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- Špoljarić, M., Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska, diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, 2021.