

# Mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja

---

Trupković, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:111608>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 5/GRD/2020**

**Mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne  
stjenke u različitim uvjetima zasipavanja**

**Juraj Trupković, 0951/336 D**

Varaždin, listopad 2020. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Graditeljstvo

Diplomski rad br. 5/GRD/2020

## Mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja

**Student**

Juraj Trupković, 0951/336 D

**Mentor**

doc.dr.sc. Aleksej Aniskin, viši predavač

Varaždin, listopad 2020. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Juraj Trupković	MATIČNI BROJ	0951/336D
DATUM	10.9.2020.	KOLEGIJ	Geotehničko inženjerstvo
NASLOV RADA	MJERENJE NORMALNIH OPTEREĆENJA PIJESKA NA PARALELNE STJENKE U RAZLIČITIM UVJETIMA ZASIPAVANJA		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	MEASUREMENT OF NORMAL LOADS OF SAND ON PARALLEL WALLS IN DIFFERENT FILLING CONDITIONS		
MENTOR	dr. sc. Aleksej Aniskin	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. prof. dr. sc. Božo Soldo 2. doc. dr. sc. Matija Orešković 3. doc. dr. sc. Aleksej Aniskin 4. doc. dr. sc. Željko Kos 5. _____		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 005/GRD/2020

OPIS

Pristupnik treba u radu obraditi slijedeća poglavlja zadane teme:

1. Uvod
2. Teorija proračuna
3. Mjerenja tlaka pijeska na paralelne stjenke
4. Analiza rezultata i usporedba rezultata s teorijom
5. Zaključak
6. Literatura

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

SVEUČILIŠTE  
SJEVER

## **Predgovor**

*Ovim putem bi se htio zahvaliti svom mentoru doc.dr.sc. Alekseju Aniskinu koji je pratio cijeli proces nastajanja završnog rada i što me svojim savjetima i znanjem usmjeravao da prevladam sve probleme na koje sam naišao prilikom izrade završnog rada. Također hvala svim profesorima odjela Graditeljstvo, što su odvojili svoje vrijeme kako bi prenesli svoje znanje i iskustva te što su nas pripremili za život i svijet građevine.*

*Hvala svim mojim prijateljima, kolegama studentima i djevojci Lani što su mi svojim prisustvom, razgovorom i vremenom uljepšali i olakšali studentsko doba.*

*Sav ovaj studij ne bi bio moguć bez moje najveće podrške, moje obitelji. Zahvaljujem se svojim roditeljima, majki Jadranki i ocu Josipu, svojim sestrama Katarini, Barbari i Josipi i nećakinji Elenor. Hvala Vam što ste uvijek bili tu uz mene da li se radilo o sretnim ili teškim trenucima i što ste me svojim riječima bodrili i pomogli da savladam sve probleme koji su mi se našli na putu.*

***Hvala Vam!!!***

***Trupković Juraj***

## Sažetak

Tema ovog diplomskog rada odnosi se na mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja. Gdje je samo pristup napravljen prema Janssen-ovoj metodi proračuna koja se temelji na ravnoteži tankog horizontalnog sloja skladištenog materijala.

Početni dio rada napravljen je teorijski kako bismo što pobliže objasnili o čemu se u ovom radu radi. Analizirali smo samo postavljanje eksperimenta koji je vrlo važan dio razmatranog procesa kako bi mogli usporediti teoretske vrijednosti s izmjerenim. Korišteni materijal je prokomentiran prema fizikalnim svojstvima kako bismo dobili potrebne podatke za proračun volumena pijeska u čaši i granulometrijskom sastavu.

Mjerenje bočnog tlaka napravljeno je za zasipavanje pod kutom  $0^\circ$  gdje je pri zasipavanju bilo potrebno paziti da prilikom istresanja pijeska u eksperimentalni model ne diramo model i da pijesak pada na sredinu eksperimentalnog modela, tj. na sredinu eksperimentalnog prostora koji se puni pijeskom, a kod kuta od  $45^\circ$  kako bi smo ostvarili puno zasipavanje modela do razine 1m, bilo je potrebno nadograditi naš model. I na kraju dolazimo do analize rezultata mjerenja pomoću dijagrama, koji nam pokazuje značajne razlike između zasipavanja pod različitim kutovima.

***Ključne riječi:*** normalno naprezanje, eksperimentalno mjerenje bočnog tlaka, Janssen-ova teorija, tlak na bliske paralelne stjenke.

## Abstract

The topic of this masters is the measurement of normal sand loads on parallel walls in deifferent backfill conditions. Where only approach is made according to Janssen's calculation method based on the balance of a thin horizontal layer of stored material.

The very initial part of the paper is made theoretically in order to explain as closely as possible what this paper is about. We only analyzed the setup of the experiment, which is a very important part of our process, so that there are no significant errors in the results. And our material is commented according to the physical properties in order to obtain the necessary dana for the calculation of the volume of sand in the beaker, the perticle size distribution due to the partical content and pressure.

Measurement of lateral pressure was made for  $0^\circ$  where when backfilling it was necessary to be careful not to touch the model when shaking the sand into the experimental model and that the sand falls in the middle of the experimental model, ie. in the middle of the experimental space filled with sand and at angle of  $45^\circ$  in order to achieve full backfilling od the model to the level of 1m, it was necessary to upgrade our model. Finally, we come to analysis of the results using diagrams that represent quite large daviations between our angles.

**Key words:** *lateral pressure, experimental lateral pressure measurement, Janssen's theory, pressure on close parallel walls.*



## Popis korištenih kratica

Velika latinična slova:

E	Youngov modul elastičnosti
L	linearni operator
R	promjer silosa
W	vlažnost uzorka

Velika latinična slova sa indeksom:

$C_c$	koeficijent zakrivljenosti
$C_U$	koeficijent jednolikosti
$D_{10}$	promjer sita kroz koji prolazi zadnjih 10% sijanog uzorka
$D_{30}$	promjer sita kroz koji prolazi 30% ukupne količine sijanog uzorka
$D_{60}$	promjer sita kroz koji prolazi 60% ukupne količine sijanog uzorka
$M_D$	masa pijeska
$M_W$	masa vode u pijesku u zasićenom stanju
$M_x$	zidni moment u vertikalnom smjeru
$N_{(x)}$	sila N u obodnom smjeru
$R_h$	hidrulički radijus
$V_v$	volumen pora
$V_s$	volumen čvrstih čestica
$V_{(x)}$	zidna poprečna sila u vertikalnom smjeru
$X_{izm}$	aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti tlaka
$X_{izr}$	izračunati tlak vode

Mala latinična slova:

c	konstanta
cm	centimetar
e	koeficijent pora
ff	funkcija
g	gram
kg	kilogram
m	metar
ml	milimetar
p	bočni tlak
sin	sinus
vv	konstantni vektor
x	dubina

Mala latinična slova sa indeksom

$a_0$	koeficijent najveće izvodnice
$h_1$	dubina ispod površine materijala
$k_0$	Rankine-ov koeficijent za aktivni tlak
$m_1, m_2, m_3, m_4$	konstante
$p_0$	tlak uskladištenog materijala

Grčka slova:

$\gamma$	obujamska težina
$\varphi$	kut unutarnjeg trenja uskladištenog materijala
$\eta$	porozitet

Grčka slova sa indeksom:

$\phi_{SAT}$	obujamska gustoća zasićenosti uzorka
$\rho_D$	obujamska gustoća pijeska u suhom stanju
$\rho_S$	gustoća čvrstih čestica

# Sadržaj

1.	Uvod .....	1
2.	Teorija proračuna.....	3
2.1.	Konstrukcije sa paralelnim stjenkama .....	3
2.1.1.	Silos.....	4
2.1.2.	Žmurje .....	6
2.1.3.	Čelijski sustav koferdam .....	9
2.2.	Pristup ponašanja vode.....	11
2.3.	Janssen-ov pristup.....	14
2.4.	Airy-ev pristup.....	14
2.5.	Reimbert-ov pristup .....	16
3.	Mjerenje tlaka pijeska na paralelne stjenke .....	17
3.1.	Opis i umjeravanje eksperimentalnog postavljanja .....	17
3.2.	Kalibracija senzora.....	22
3.3.	Mjerenje tlaka vode.....	25
3.4.	Određivanje fizikalnih svojstva pijeska .....	27
3.5.	Određivanje granulometrijskog sastava .....	32
3.6.	Mjerenje tlaka pijeska .....	36
4.	Analiza rezultata mjerenja i usporedba rezultata s teorijom .....	44
4.1.	Usporedba izmjerenih vrijednosti sa Janssen-ovom teorijom.....	44
5.	Zaključak.....	47
6.	Literatura.....	49

# 1. Uvod

Konstrukcije sa bliskim paralelnim stjenkama su vrlo česte u građevinskoj struci, posebno u hidrotehničkom inženjerstvu u dijelu lučnih konstrukcija u brodskim pristaništima kao što su razni molovi za privezivanje brodova, koferdami, čelično žmurje (talpe) kao zaštita obale od erozije i djelovanja mora, silosi za skladištenje žita i mnogi drugi.

Silosi su dobili ime od grčke riječi „silo“ što znači „jama za držanje žita“. Nekada davno nisu postojali silosi kakve poznajemo danas nego su se koristile tzv. silo jame koje su se izvodile na vodopropusnom tlu kako ne bi došlo do zadržavanja vode. Najrasprostranjenija vrsta silosa koji se danas koriste u agrokulturi za skladištenje žita su okomiti silosi ili silo-tornjevi.

Žmurje su vrsta zagatnih stijena u geotehnici čija je primarna funkcija sprječavanje urušavanja tla građevinske jame ili zadržavanje vode u slučajevima da se izvode radovi u vodenom području. Zabijaju se prije početka iskopa pomoću stroja. Mogu biti drvene, čelične i betonske. Betonska žmurja su pravokutnog poprečnog presjeka, zašiljenog vrha koji je obložen limom kako bi se spriječila oštećenja prilikom zabijanja. Čelična žmurja se izvode od valjanih limova s posebno oblikovanim poprečnim presjekom koji osigurava krutost. Kod ugradnje žmurja treba paziti da budu povezani u cjelinu radi osiguranja stabilnosti.

Pomoću žmurja možemo izraditi čelijski sustav koferdam koji osigurava suhu izgradnju u mokrom području ili se može zasipavati kako bi dobili stabilnu površinu iznad vode za izvođenje različitih površina npr. molovi, brodska pristaništa itd.

U proračunu ovih konstrukcija, važno je znati djelovanje bočnih tlakova na unutarnje stjenke konstrukcije. Iz tih razloga, otkrivene su nove teorije i eksperimenti radi preciznijih otkrivanja karakteristike materijala i dizajna silosa. Ispitivanja bočnih tlakova su započela na modelima silosnih struktura pa se u današnjoj literaturi proračun bočnih tlakova može naći pod pojmom „silosni tlak“. Dizajn silosa baziran na Janssen-ovoj (1895) jednadžbi koja koristi bitne parametre za proračun i raspodjelu bočnog tlaka nam omogućava proračun horizontalnih i vertikalnih tlakova sa prihvatljivom preciznošću. Unatoč tome što je od Janssen-ove jednadžbe prošlo više od sto godina, ona je još uvijek najrasprostranjenija analitička metoda određivanja tlaka na stjenke silosa [1].

Cilj diplomskog rada je provjeriti pouzdanost Janssen-ove jednadžbe. Da bi smo to mogli izvesti, provedeno je laboratorijsko eksperimentalno ispitivanje bočnog tlaka sipine na bočne paralelne stjenke. Prethodno tome, opisan je eksperimentalni model (paralelopiped) od čeličnog lima, načini povezivanja tenziometarskih konzolnih ćelija, pojačalo korišteno za ispitivanje i sva ostala pomagala. Kako bi ispitivanje bilo što preciznije, izvedena je kalibracija tenziometarskih ćelija standardnim utezima i mjerenjem tlaka vode. Radi pouzdanosti rezultata, provjeravana su fizikalna svojstva sipine korištena u eksperimentu kao i granulometrijski sastav sipine. Nakon izmjerenih vrijednosti bočnog tlaka i njihove obrade u računalnom programu, uspoređeni su rezultati sa Janssen-ovom teorijom.

## 2. Teorija proračuna

U graditeljskoj inženjerskoj praksi imamo mnoge znanstvenike koji su se bavili istraživanjem tlaka na paralelne stjenke. Imamo dosta metoda proračuna bočnih tlakova na paralelne stjenke, dok ćemo mi uzeti samo neke od njih.

Prvo eksperimentalno istraživanje bočnog pritiska, objavio je I. Roberts 1882. godine koji je eksperiment proveo na malom modelu silosa. On u svom istraživanju zaključuje kako je tlak na blisko postavljene stjenke prestane rasti kada dubina punjenja dosegne visinu duplo veću od promjera poprečnog presjeka. Janssen je u svom istraživanju proveo niz eksperimenata za određivanje tlaka raznog žita i pijeska na silosnom modelu različitih poprečnih presjeka. U njegovim eksperimentima je tlak izračunat pomoću sustava poluge, sa oblikom utega sa ramenom od 1:10, a rezultati su se slagali sa rezultatima eksperimenta koje je proveo I. Roberts. Nakon Janssena, mnogi su znanstvenici proučavali bočne tlakove na bliske stjenke, neki od njih su I. Pranche, W. Airy i ostali. Znanstvenici su došli do sličnih rezultata, do usporavanja rasta bočnog tlaka i njegovog nastojanja za nekom ograničavajućom vrijednošću- Janssen-ov efekt. Većina ponovljenih eksperimenata je potvrdila teoriju Janssen-a, međutim u rezultatima eksperimenata je bilo slučajeva kada je izračunati tlak bio 2 do 5 puta veći od izračunatog pritiska na stjenke.

Prije proračuna bočnih tlakova, dati su primjeri konstrukcija za koje možemo smatrati da su im stijenke blizu i kod kojih se pojavljuje bočni tlak tj. normalno naprezanje.

### 2.1. Konstrukcije sa paralelnim stjenkama

U graditeljskoj praksi proračun bočnih tlakova se koristi se kod mnogih konstrukcija kod kojih su stjenke međusobno blizu jedna drugoj. Najpoznatije takve konstrukcije su silosi i na konstrukcijama silosnih struktura su znanstvenici počeli ispitivati naprezanja na bliske stjenke po čemu se danas u literaturi taj pojam može pronaći pod pojmom tlak silosa. Također imamo i takve konstrukcije kod izvedbe brodskih luka gdje se rade razni molovi od armiranog betona ili od metalnih ploča (žmurja). Svim tim konstrukcijama je zajedničko to što ih je potrebno puniti/zasipavati odozgo prilikom čega dolazi do različitih naprezanja koja nam moraju ostati unutar granica kako ne bi došlo do oštećenja ili loma.

## 2.1.1. Silosi

Silosu su najsvremenije konstrukcije koje se koriste za skladištenje rastresitih materijala kao što su žito, kukuruz, ugljen, cement, vapno itd. ili za skladištenje raznih fluida.

Silosu su najčešće konstrukcije cilindričnog oblika čije je raspon promjera od 3 do 27 metara i visina im je od 10 do 90 metara. Silosne stijenke mogu biti izrađena od materijala, najčešće su to metal tj. čelik i armirani beton, a mogu biti izrađene i od pečene opeke i drveta. Silos se montira na betonsku podlogu radi osiguranja stabilnosti prilikom punjenja i skladištenja.

Silose se moraju puniti i prazniti centralno kako bi se spriječilo pojavljivanje velikih bočnih sila na stijenke silosa koje bi mogle dovesti do naginjanja, a i samim time i do prevrtanja silosa.

### 2.1.1.1. Okomiti silosi

Okomiti silosi su većinom cilindričnog oblika. Zbog njihovog oblika, potrebno je manje prostora u sklopu dvorišta neke industrije i sl.

#### Betonski silosi

U današnje vrijeme se betonski silosi više ne izvode zbog velike cijene izgradnje koja podrazumijeva veliki volumen skladišnog prostora tj. uskladištenog materijala kako bi se silos isplatio. Betonski silosi su okarakterizirani velikim kapacitetom skladištenja i mogućnošću centralnog i bočnog pražnjenja.



Slika 2.1: Betonski silos (Izvor: <https://www.wolfsystem.hr/nas-odjeli-proizvoda/betonski-spremnici/silos-za-poljoprivredne-svrhe/silos-za-zito>)

## **Metalni silosi**

Metalni se silosi grade od čelika pa se pod nazivom metalni silosi podrazumijevaju čelični silosi.

Prema vrsti konstrukcije i načinu izvođenja, čelične silose svrstavamo u tri skupine.

Prva skupinu, najbrojnija skupinu čine okrugli silosi koji se izrađuju od čeličnih limova zakrivljenih samo u jednoj ravnini (slika 2.2). Na najvećem dijelu spremnika, limovi se ojačavaju vodoravnim prirubnicama. Prirubnice i limovi se spajaju vijcima.



Slika 2.2: Čelični silos (Izvor: <http://ba.fdsp-cn.com/wheat-silo-with-competitive-price>)

U drugu skupinu se ubrajaju okrugli silosi koji se izrađuju od valovitih čeličnih ploča koje su ukružene stupcima (slika 2.3.). Stupci prenose uzdužnu silu preko ploča na temelj, a stupci se postavljaju ili sa unutarnje ili sa vanjske strane na razmacima od približno 1m.



Slika 2.3: Silos od valovitih čeličnih ploča (Izvor: <http://docplayer.com.br/77620988-Silos-i-spirale-i-puzevi.html>)



### 2.1.1.2. Vodoravni silos

Ovaj tip silosa je omeđen zidovima sa dvije ili tri strane čija je visina uobičajena 2 metra.

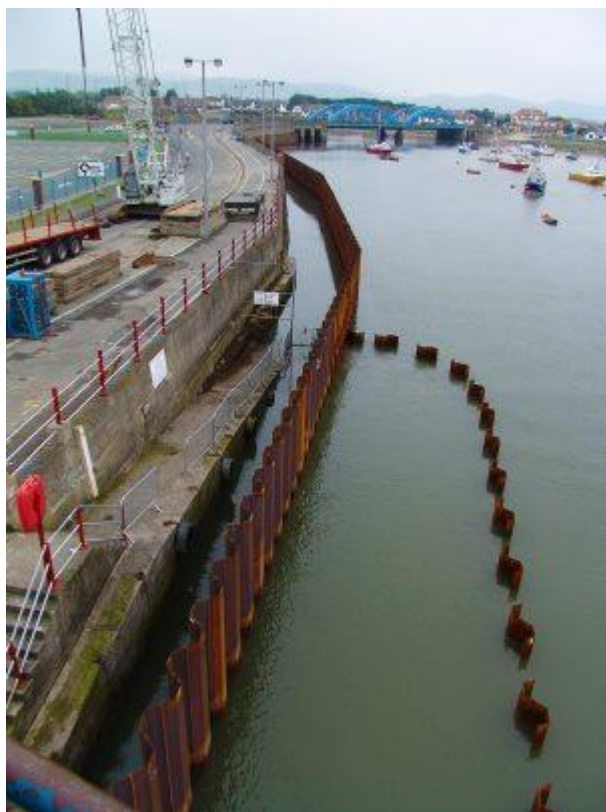
Punjenje i pražnjenje ovih silosa se vrši pomoću traktora ili utovarivača. Unutarnja ploha je u pravilu nakošena tj. konusnog oblika. Konusni oblik omogućava bolje zbijanje biljne mase i postizanje boljeg kontakta između skladištenog materijala i zidova silosa.



Slika 2.4: Vodoravni silos omeđen zidovima sa dvije strane (Izvor: <http://www.aurora-invest.hr/ponuda/fattori/otvoreni-horizontalni-silos>)

### 2.1.2. Žmurje

Žmurje (talpe) su konstruirane kako bi mogle preuzeti normalna naprezanja (bočne sile). U inženjerskoj praksi, žmurje vodi vodeću ulogu u inženjerskim potpornim konstrukcijama u zadržavanju zemljane mase prilikom iskopa i stabilizacije klizišta. U brodskim lukama se koriste radi osiguranja stabilnosti pristaništa i proširenja pristaništa za brodove i radi smanjenja erozije vode na brodsko pristanište[6]. Imamo čelično i betonsko žmurje za ovu namjenu.



Slika 2.5: Žmurje štiti obalu od djelovanja erozije (Izvor: <https://www.ivorking.co.uk/> )

### **Betonsko žmurje**

Betonsko žmurje se najčešće koristi kao potporni zidovi. Radi njihove težine, otežan je transport i ugradnja. Ovaj tip žmurja se koristi kao pregrade u slanoj i slatkoj vodi.



Slika 2.6: Betonsko žmurje (Izvor: <https://twitter.com/EquipCorp/status/1161348852600967169/photo/2>)

## Čelično žmurje

Čelično žmurje se u današnje vrijeme najviše koriste zbog svoje velike otpornosti. Za razliku od betonskih žmurja, čelično žmurje je lakše transportirati i potrebna je mala površina za ugradnju. Još neke prednosti čeličnog žmurja:

- Poboljšana vodonepropusnost
- Čvrstoća tj. žilavost
- Učinkovitost
- Dugotrajnost
- Lagane
- Moguća ponovna uporaba

Koriste se za izvedbu privremenih i stalnih konstrukcija koje uključuju konsolidaciju tla, lukobrane i lučke projekte.

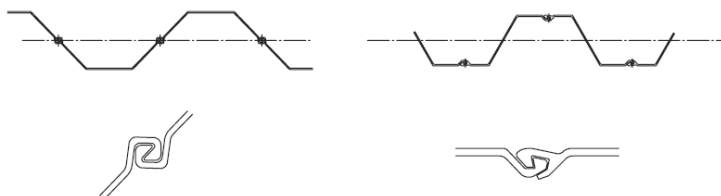
Najčešće su u uporabi žmurje Z i U presjeka.

## Z-žmurje

Smatraju se jedno od najučinkovitijih žmurja današnjice. Koristi se za srednje i duboke potporne konstrukcije. Z-žmurje se obično koriste za konzolne nosače, nosače mostova, sustave za vezivanje i dodatne primjene (Eskandari i Kalantari, 2011)

## U-žmurje

Z-žmurje i U-žmurje su zamalo jednako što se tiče njihove uporabe. U-žmurje se uobičajeno koristi kod izvođenja potpornih zidova u moru.



Slika 2.7: U- žmurje (lijevo), Z- žmurje (desno)(Izvor: Grabe, 2008)

Nedostaci žmurja:

- Ugradnja žmurja nije jednostavna u tlima u kojima se nalaze stijene i kamenje, radi toga se možda neće postići željena dubina zabijanja.
- Nisu prikladni za uporabu u trajnoj gradnji.
- Uslijed zabijanja dolazi do vibracija tla koja mogu dovesti do oštećenja susjednih građevina.

### 2.1.3. Čelijski sustav koferdam

Široko se koriste kao privremeni uređaji iz kojih se izbacuje voda kako bi se omogućila suha gradnja u vodi kao što su brane, podnožja mostova, molovi i hidroelektrane. Koriste se u širokom spektru, s visinama do 30 metra i promjera 27 metra. Zidovi čelijskog sustava koferdam su izrađeni od međusobno povezanog žmurja koje podupiru valjci i unutarne zagate. Koferdam se može oblikovati korištenjem različitih ćelija u tri oblika: kružni, dijafragmni i djetelinski oblik [10]. Kružni oblik se uglavnom koristi za dizajniranje koferdama iz sljedećih razloga:

- 1.) Stabilan je kao samostalna konstrukcija.
- 2.) Može se zapuniti čim je sagrađen.
- 3.) Nisu potrebne razlike u visini tla

Ćelija dijafragme može rezultirati neuspjehom cijelog koferdama, ali kolaps kružne stanice odvija se lokalno [10].

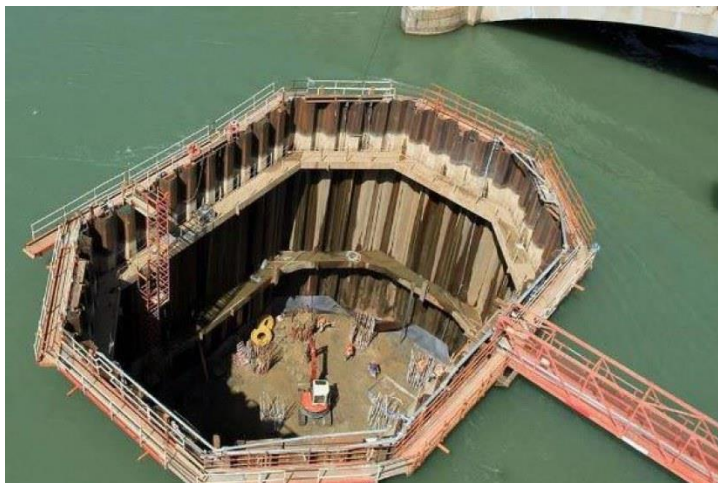


Slika 2.8: Izvođenje kružnih ćelija koferdam u vodi (Izvor:

[https://constructalia.arcelormittal.com/files/AMCRPS\\_AS%20500%20Design%20&%20Execution%20Manual--c0afb0837a3e3cb855d7b79331824f86.pdf](https://constructalia.arcelormittal.com/files/AMCRPS_AS%20500%20Design%20&%20Execution%20Manual--c0afb0837a3e3cb855d7b79331824f86.pdf))

Tipovi koferdama [14]:

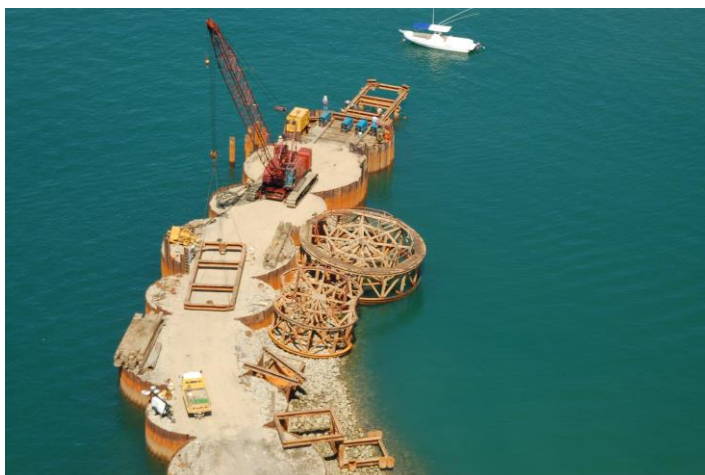
- 1.) Poduporeni koferdami: izrađeni su od jednog zida žmurja koji se zabija u zemlju da bi se oko iskopa stvorila "kutija". Zatim se hrpe listova podupiru s unutarnje strane, a unutrašnjost se odvodi vodom. Primarno se koristi za molove u plitkim vodama (9 do 12 m dubine).



Slika 2.9: Poduporeni koferdam (Izvor:

[https://www.google.com/search?q=braced+cofferdam&sxsrf=ALeKk02v8qu5DVJ7RepL\\_ASUQe\\_kkLRNcLg:1602016834970&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjqhP3i6aDsAhW7kcMKHRq8CSsQ\\_AUoAXoECAsQAw&biw=798&bih=730#imgrc=WBwENRLYTkEBsM](https://www.google.com/search?q=braced+cofferdam&sxsrf=ALeKk02v8qu5DVJ7RepL_ASUQe_kkLRNcLg:1602016834970&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjqhP3i6aDsAhW7kcMKHRq8CSsQ_AUoAXoECAsQAw&biw=798&bih=730#imgrc=WBwENRLYTkEBsM))

- 2.) Stanični koferdami koriste se samo u onim okolnostima kada veličina iskopa isključuje upotrebu veza za poprečni iskop. U ovom slučaju, koferdam mora biti stabilan zahvaljujući vlastitom otporu bočnim silama.



Slika 2.10: Stanični koferdam (Izvor: <https://www.pilebuck.com/marine/cellular-cofferdams-vital-marine-construction/>)

3.) Dvozidni koferdami: To su koferdamske konstrukcije koje se sastoje od dva paralelna reda žmurja zabijenih u zemlju i međusobno povezanih sustavom veznih šipki na jednoj ili više razina. Prostor između zidova obično je ispunjen granuliranim materijalom poput pijeska, šljunka ili slomljene stijene.



Slika 2.11: Dvozidni koferdam (Izvor: [https://www.google.com/search?q=Double-walled+sheet+pile+cofferdams:&sxsrf=ALeKk02Vy9hDIYGgh0iOHEsLu2lloa1SUA:1602017175167&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi0\\_JiF66DsAhVNPYsKHbb5D0QQ\\_AUoAXoEAsQAw&biw=798&bih=730#imgrc=3Dte8I2DYJNu2M&imgdii=abjwJk8-bmO5wM](https://www.google.com/search?q=Double-walled+sheet+pile+cofferdams:&sxsrf=ALeKk02Vy9hDIYGgh0iOHEsLu2lloa1SUA:1602017175167&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi0_JiF66DsAhVNPYsKHbb5D0QQ_AUoAXoEAsQAw&biw=798&bih=730#imgrc=3Dte8I2DYJNu2M&imgdii=abjwJk8-bmO5wM) )

## 2.2. Pristup ponašanja vode

U ovom pristupu Khouri [8] , pretpostavlja da je linearna preraspodjela bočnog tlaka „ $p$ “ koji djeluje na stjenku tj. da je dijagram tlaka trokutastog oblika. Preraspodjela tlaka sa dubinom  $x$ , gledajući od dna silosa, se može prikazati:

$$p = p_0 \times \left( \frac{h_1 + h_0 - x}{h_1} \right) \quad (2.1.)$$

gdje je:

- $\gamma$  – objamska težina
- $k_0$  – Rankine-ov koeficijent za aktivni tlak
- $p_0$  – tlak uskladištenog materijala na dubini  $h_1$  ispod površine materijala,

$$p_0 = k_0 \gamma h_1 \quad (2.2)$$

gdje je Rankine-ov koeficijent  $k_0$  dan jednadžbom:

$$k_0 = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2.3.)$$

gdje je:

- $\varphi$ - kut unutrašnjeg trenja uskladištenog materijala
- $h_1$ - visina uskladištenog materijala

Rješenje diferencijalne jednadžbe (2.1.) za gornji dio  $h_1$  silosa ne uzimajući u obzir desnu stranu je obuhvaćen jednadžbom (2.2.), a krajnje rješenje jednadžbe (2.1.) iznosi:

$$y_p = \frac{p_0}{KK} \frac{h_1 + h_0 - x}{h_1} \equiv fp_1(x) \quad (2.4.)$$

gdje je

$$KK = \frac{E \times ep}{R^2} = 4\lambda^4 \times DE \quad (2.5.)$$

gdje je  $E$  Youngov modul elastičnosti. Opće rješenje jednadžbe (2.1.) za donji dio silosa  $h_0$  je obuhvaćeno jednadžbom (2.4.)

Rješenje diferencijalne jednadžbe je napravljeno za funkciju  $f$  (prikazana kasnije) koja je pomnožena sa modulom elastičnosti  $E$ . To nam omogućava kalkulacije neovisno o materijalu od kojeg je silos.

Matematička analiza je odrađena u programu MathCAD 2000 i možemo je sažeti i prikazati:

Grafični uvjeti nam daju  $M \cdot$  konstantni vektor  $vv$ , gdje je  $M$  pravilna matrica  $8 \times 8$  koja odgovara graničnim stanjima, to nam daje vektor  $vv$ :

$$vv := \begin{pmatrix} -fp_1(h_0 + h_1) \\ -d_2fp_1 \left( h_0 + h_1 \times \frac{1}{2 \times \lambda^2} \right) \\ 0 \\ 0 \\ -fp_1(h_0) \\ -d_1f(h_0) \times \frac{1}{\lambda} \\ -d_2fp_1(h_0) \times \frac{1}{2 \times \lambda^2} \\ -d_3fp_1(h_0) \times \frac{1}{2 \times \lambda^3} \end{pmatrix} \quad (2.6.)$$

gdje  $d_1f(x) := \frac{d}{dx} fp_1(x)$        $d_2fp(x) := \frac{d^2}{dx^2} fp_1(x)$        $d_3fp(x) := \frac{d^3}{dx^3} fp_1(x)$

Rješavanjem ovog sustava s 8 jednadžbi, vrijednosti od osam konstanti integracije AA, AA1, BB, BB1, CC1, DD i DD1. Svaka od ovih funkcija je podijeljena u dva intervala gdje  $\epsilon \in [0, h_0]$  i  $x \in [h_0, h_0 + h_1]$ . Funkcije  $ff(x)$  i  $gg(u)$ , koje predstavljaju (savijanje \* E) su:

$$ff(x) := e^{-\lambda(x-h_0)}x[AA \cos[\lambda(x-h_0)] + BB \sin[\lambda(x-h_0)]] + e^{\lambda(x-h_0)}[AA_1 \cos[\lambda(x-h_0)] + BB_1 \sin[\lambda(x-h_0)]] + fp_1(x) \quad (3.7)$$

$$gg(u) := e^{-\lambda \times u}(CC \cos(\lambda \times u) + DD \sin(\lambda \times u)) + e^{\lambda \times u}(CC_1 \cos(\lambda \times u) + DD_1 \sin(\lambda \times u)) \quad (3.8)$$

Zidni moment u vertikalnom smjeru je:

$$M_x = DE \times d_2 f p x + 2 - \lambda^2 f f(x)$$

$$i$$

$$M_u = DE \times 2 - \lambda^2 g g(u)$$

Zidna poprečna sila u vertikalnom smjeru je:

$$V(x) = DE \{d_3 f p(x) + 2 \times \lambda^3 [f f(x)]\}$$

$$V(u) = DE \times 2 \times \lambda^3 [f f(x)]$$

Sila N u obodnom smjernu je:

$$N(x) = f f(x) [ep/R]$$

$$N(u) = g g(x) [ep/R] \quad (3.9)$$



### 2.3. Janssen-ov pristup

Janssenova metoda proračuna se temelji na ravnoteži tankog horizontalnog sloja skladištenog materijala. Jednadžba za horizontalni tlak je:

$$p = \frac{\gamma R_h}{\mu_1} \left[ 1 - e^{-\frac{\mu_1 k_0 Y}{R_h}} \right] \quad (3.10.)$$

gdje je:

- Y- dubina
- $k_0$ - Rankine-ov koeficijent aktivnog bočnog tlaka
- $R_h$ - hidraulički radijus
- $\mu_1$ - kut trenja uskladištenog materijala uz zid.

Princip je isti kao i kod pristupa ponašanja vode. Međutim, rješenje postupka za  $f p_1(x)$  je:

$$f p_1(x) := \frac{1}{KK} \beta \left[ 1 - 4 \frac{\lambda^4}{\alpha^4 + 4\lambda^4} e^{-\alpha(h_1+h_0-x)} \right] \quad (3.11.)$$

$$\alpha = \mu_1 \frac{k_0}{R_h} \quad \beta = \gamma \frac{k_0}{R_h} \quad R_h = \frac{R}{2}$$

Imajući određeno rješenje, konstante integracije i funkcije predstavljaju umnožak savijanja i modula elastičnosti, momente, uzdužne i poprečne sile N u obodnom smjeru mogu biti određene kao i pristupu ponašanja vode [8].

Razlika tlakova izračunata i izmjerena po Janssen-ovoj teoriji je iznosila i do 40%. Da bi smo postigli određivanje projektnih vrijednosti, upotrijebljen je Rankine-ov koeficijent bočnog tlaka koji je dobiven omjerom vodoravnog i vertikalnog tlaka na stjenke u najnižoj točki.

### 2.4. Airy-ev pristup

Airy-eva jednadžba je bila izvedena uzimajući u obzir statičku ravnotežu klinastih dijelova uskladištenog materijala iznad ravnine sloma. Airy-eva jednadžba za silose vodi do normalnog tlaka na dubini h [7]:

$$p = \frac{2 \gamma R}{\mu + \mu_1} \left[ 1 - \frac{1 + \mu^2}{\sqrt{\frac{h}{R}(\mu + \mu_1) + 1 - \mu \times \mu_1}} \right] \quad (3.12.)$$

gdje je:

- P- bočni tlak
- $\mu_1$ - faktor trenja uskladištenog materijala uz zid
- $\mu$ -unutarnje trenje u materijalu  $\mu=\tan(\varphi)$
- $\varphi$ - kut unutarnjeg trenja.
- R- promjer silosa

Diferencijalnu jednadžbu možemo zapisati u faktoriziranom obliku:

$$a_0(L - m_1) \times (L - m_2) \times (L - m_3) \times (L - m_4) \times y' = R(x) \quad (3.13.)$$

gdje je:

- $m_1, m_2, m_3, m_4$ - konstante
- L- linearni operator
- $a_0$ - koeficijent najveće izvodnice.

Ova metoda nam daje opća rješenja ako se uzimaju u obzir proizvoljne konstante, ako su izostavljene proizvoljne konstante, onda ova metoda daje određeno rješenje.

U ovom slučaju je:  $a_0=1, m_1=-1(1+i), m_2=1(1-i), m_3=1(-1+i), m_4=1(1+i)$ .

Da bi smo riješili diferencijalnu jednadžbu prvoga reda, koristimo opće rješenje za jednadžbu

$$y'(x) + p(x) \times y(x) = q(x) \Rightarrow y = e^{-\int p dx} \times \int Q \times e^{\int p dx} dx + c \times e^{-\int p dx} \quad (3.14.)$$

gdje nam je c konstanta (c=0):

$$q(x) := \delta_1 \left[ 1 - \left( \frac{\alpha}{\varepsilon_1 x + \beta} \right)^{-2} \right] \quad (3.15.)$$

$$\alpha := 1 + \mu^2 \quad \beta := 1 - \mu_1 \times \mu \quad \varepsilon_1 := 2 \frac{(\mu_1 + \mu)}{2R} \quad \delta_1 := \gamma \frac{1}{(\mu_1 + \mu)} \times \frac{2R}{DE}$$

$$y_1(x) := e^{m_1 x} \int q(x) e^{-m_1 x} dx$$

$$y_2(x) := e^{m_2 x} \int y_1(x) e^{-m_2 x} dx$$

$$y_3(x) := e^{m_3 x} \int y_2(x) e^{-m_3 x} dx$$

$$y_4(x) := e^{-m_4 x} \int y_3(x) e^{-m_4 x} dx$$

Neka bude  $z(x)=\text{Re}(y_4(x))$ , (Re znači realni dio od) gdje je  $x$  dubina uzeta od vrha do baze silosa. Nakon napravljene analitičke transformacije  $f_{p_1}$  postaje:

$$f_{p_1}(x) = z(h_0 + h_1 - x) \quad (3.16.)$$

Imajući određeno rješenje, možemo izračunati konstantu integracije i odrediti savijanja i sile kao prije [8].

Uspoređujući formulu (3.12.) prema Janssenovoj teoriji, vidimo da dolazi do neznatne razlike distribucije bočnog tlaka. To se može objasniti time da Airy nije uzeo u obzir aktivni tlak koji djeluje na suprotni zid silosa.

## 2.5. Reimbert-ov pristup

Reimbert-ov postupak za proračun statičkog tlaka da bočni tlak pri dnu silosa postaje asimptotski s obzirom na vertikalnu os. Na dubini  $h_0$ , bočni tlak doseže svoj vrhunac jednak  $p_{max}$ . Reimbert je izdvojio nedostatke Janssenove teorije i predložio je jednadžbu slične osnove [8].

Postupak je veoma sličan Airy-evom postupku gdje je bočni tlak na dubini  $h$  dan Reimbert-ovom jednadžbom:

$$p = p_{max} \left[ 1 - \left( \frac{h}{C} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (3.17.)$$

gdje je

$$p_{max} = \frac{\gamma R_h}{\mu_1} \quad (3.18.)$$

gdje je:

- $R_h$  hidraulički radijus
- $C = \frac{D}{4\mu_1 k_0}$
- $D$  promjer silosa.
- $h$ - dubina
- $\mu_1$ - koeficijent vanjskog trenja
- $\gamma$ - težina zatrpavanja

Reimbert-ova jednadžba (3.17.) je osnovana na podacima koje su dobili nizom eksperimentata mjerenja bočnog tlaka.

### 3. Mjerenje tlaka pijeska na paralelne stjenke

U našem eksperimentu mjerenje bočnog tlaka sipine na blisko postavljene stjenke modela izvodimo pod različitim kutovima s obzirom na horizontalu.

Ispitivanja su se provela u uvjetima ravninskog problema. Za ispitivanje smo koristili kompozitni medij čija ćemo fizikalna i mehanička svojstva kasnije prikazati.

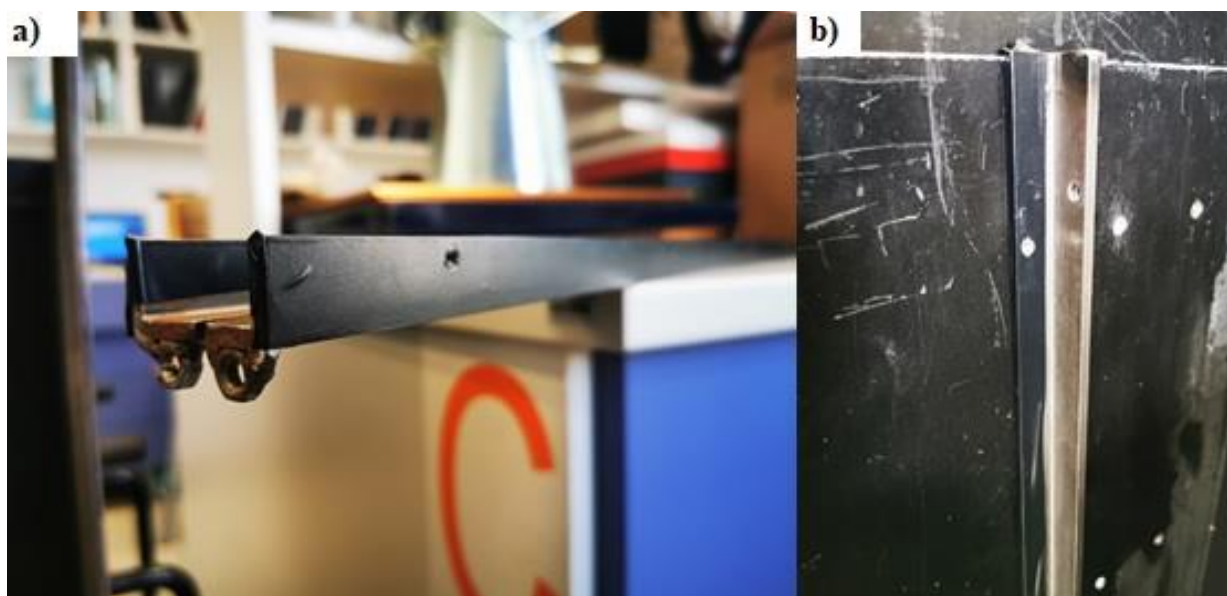
Tablica 1: Plan pokusa (eksperimenta)

Kut polaganja modela	0°	45°
Broj pokusa	6	6
Broj uzetih podataka pojedinog mjerenja	3	3

#### 3.1. Opis i umjeravanje eksperimentalnog postavljanja

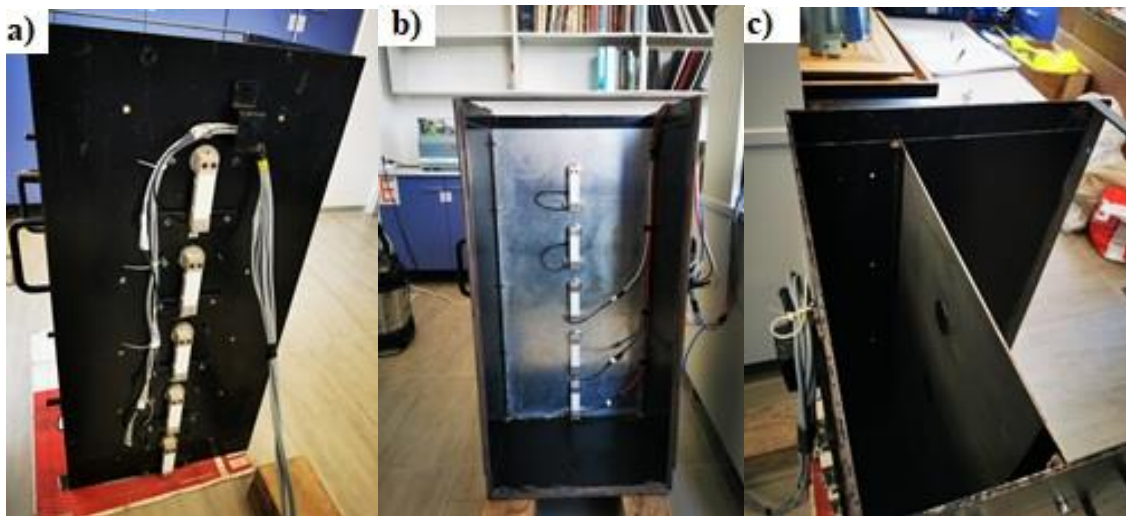
Eksperimentalni model, koji je prikazan na slici 3.2. je paralelepiped od čeličnog lima sa otvorenim vrhom čije su tlocrtne dimenzije 50cm x 50 cm i visine 105 cm. Sastoji se od četiri stjenke i dna. Bočne stjenke, prednja stjenka i dno su izrađeni od čeličnih ploča debljine 5 mm, a stražnja stjenka od čelične ploče debljine 3 mm. Sve stjenke su međusobno zavarene osim zadnje koja je vijcima učvršćena za model.

Stražnja stjenka se pomoću kutnih profila može učvrstiti vijcima za model na različitim udaljenostima od prednje stjenke-5, 10, 15 i 50 cm (slika 3.1.).



Slika 3.1: a) kutni profili; b) kutni profil učvršćen za eksperimentalni model

Za mjerenje tlaka u našem modelu, na sredini prednje i stražnje stjenke, izrađeni su deset otvora promjera 50 mm, koji su ravnomjerno raspoređeni po visini (slika 3.2.a i 3.2.b). Pored svake rupice su zavarene četiri navojne šipke M6, duljine 20 mm kako bi mogli učvrstiti senzore za eksperimentalni model.



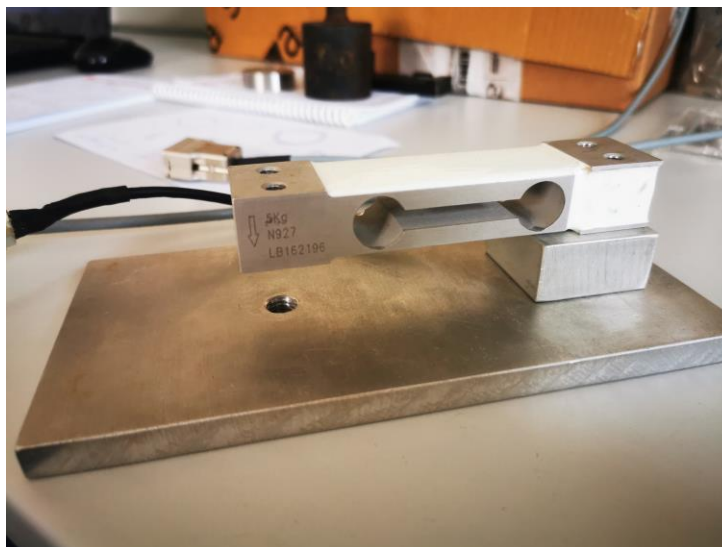
*Slika 3.2: Opći pogled na eksperimentalni model: a) pogled sprijeda; b) pogled straga; c) pogled odozgo*

Na bočnim stjenkama modela ugrađene su po dvije ručke i dva para navojnih šipki  $\Phi 20$  mm duljine 40 mm sa svake strane na koje se pričvrste čelični nosači kako bi smo mogli provesti ispitivanja pod željenim kutom (slika 3.3.)



*Slika 3.3: Ugradnja modela pod kutom*

Za mjerenje bočnih tlakova sipine, koristili smo osam tenziometarskih konzolnih ćelija (slika 3.4.), tipa 6530 izrađene od aluminija, koje je proizvela kineska firma Xi'an Ruiji Measurement Instruments Co. Karakteristike senzora su prikazane u tablici 2 [9].



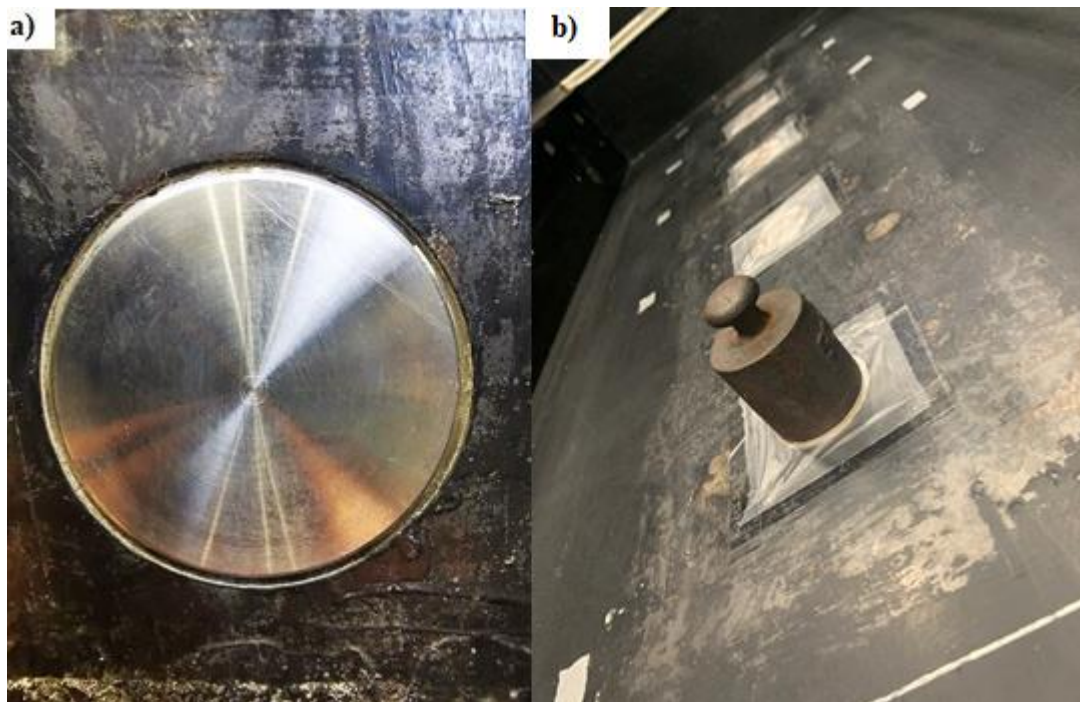
Slika 3.4: Tenziometarska konzolna ćelija

Tablica 2: Karakteristike tenziometarske konzolne ćelije

Ograničenje mjerenja	kg	5		
Normalni koeficijent mjerenja osjetljivosti	mV/V	2,0±0,15		
Ukupna pogreška	%FS	0,01	0,01	0,02
Odvratna osoba	%FS (15min)	0,01	0,01	0,02
Impedancija ulaza	Ω	406±20		
Izlazna impedancija	Ω	350±5		
Otpornost na izolaciju	M Ω	≥5000 (100VDC)		
Ograničenje mjerenja	%FS	±1		
Koeficijent temperature, razina signala	%FS/10°C	0,02		
Koeficijent temperature, nula razina	%FS/10°C	0,17		
Nazivni radni temperaturni raspon	°C	-10~+60		
Maksimalni raspon radne temperature	°C	-20~+80		
Nazivni napon napajanja	U	6~12		
Napajanje, maks.	U	3~15		
Sigurno opterećenje preopterećenja	%FS	120		
Ograničavanje opterećenja	%FS	150		
Klasa zaštite		SP65		
Materijal	Aluminijska legura			
Veličina	22mm x 30mm x 130mm			

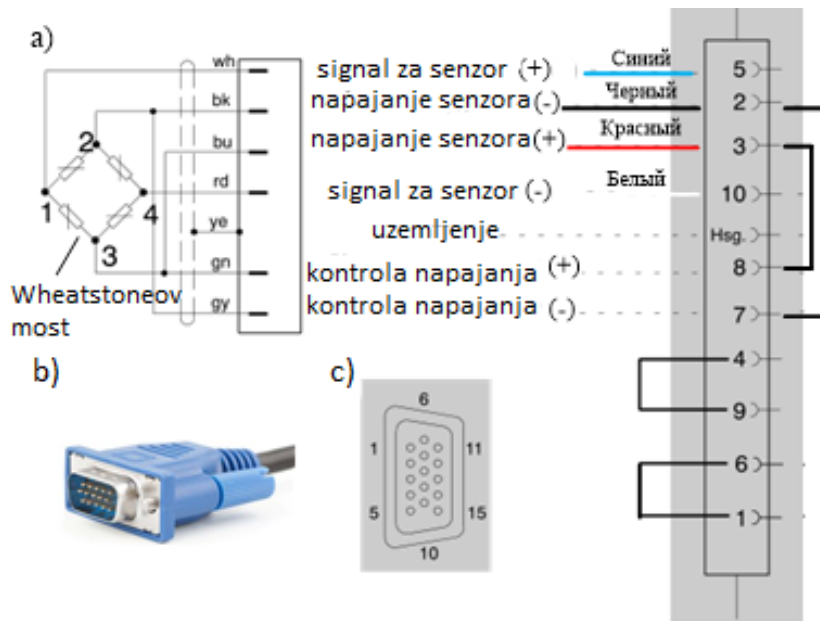
Tenziometarske ćelije smo fiksirali za prednju i stražnju stjenku modela. Pošto su stjenke napravljene za deset tenziometarskih ćelija, morali smo ih sve ugraditi. Međutim, naše pojačalo ima mogućnost mjeriti osam tenziometarskih ćelija istovremeno tako da smo koristili pet ćelija na prednjoj stijenci modela i tri ćelije na stražnjoj stijenci modela. Na donji dio tenziometarske ćelije je bila pričvršćena metalna gredica na kojoj su napravljena dva otvora koji sjedaju na navojne šipke M6. Na gornji dio je pričvršćen čelični cilindar promjera 48 mm koji sjeda u otvore promjera 50 mm koji se nalaze na stjenkama modela. To je rezultiralo dovoljnim razmakom od 1 mm između stjenke modela i pomičnog cilindra tenziometarske ćelije.

Razmak nam je omogućio nesmetano kretanje cilindra pod djelovanjem neznčajne sile pa je trenje između cilindra i stjenke smanjeno na nulu. Kako bi se cilindar nalazio u centru otvora promjera 50 mm i kako vi smo osigurali prstenasti slobodni prostor od 1 mm, koristili smo foliju voštanih svijeća (slika 3.5.a) Kako bi se spriječio ulazak sitnih čestica u zazor (prstenasti oblik) koristili smo tanku polietilensku membranu (slika 3.5.b). Slični pristup mjerenju bočnog tlaka su koristili autori E. Gallego i J. Hsiao-SungHuang.



*Slika 3.5: a) razmak između pomičnog cilindra i fiksne stjenke; b) polietilenska membrana na tenziometarskoj ćeliji*

Signali iz senzora su očitavani pomoću univerzalnog HBM-ovog univerzalnog 8-kanalnog pojačala QuantumX MX840A (slika 3.9.a). Spajanje tenziometarskih ćelija je provedeno u skladu sa uputama za uporabu 15- pinskog konektora. Shema spajanja tenziometarske ćelije i konektora prikazana je na slici 3.6.



Slika 3.6: Priključna shema spajanja tenziometarske ćelije na konektor: a) shema spajanja Wheatstoneovog mosta na priključak; b) opći prikaz konektora; c) priključni krug

Kako bi smo postigli jednakost prilikom svakog zasipavanja, tj. da bi nam svako zasipavanje u model bilo jednako i ravnomjerno cijelom širinom našeg eksperimentalnog modela, dali smo izraditi kutiju od tankog pocinčanog lima debljine 0,5 mm čije su dimenzije 48 cm x 20 cm x 10 cm.





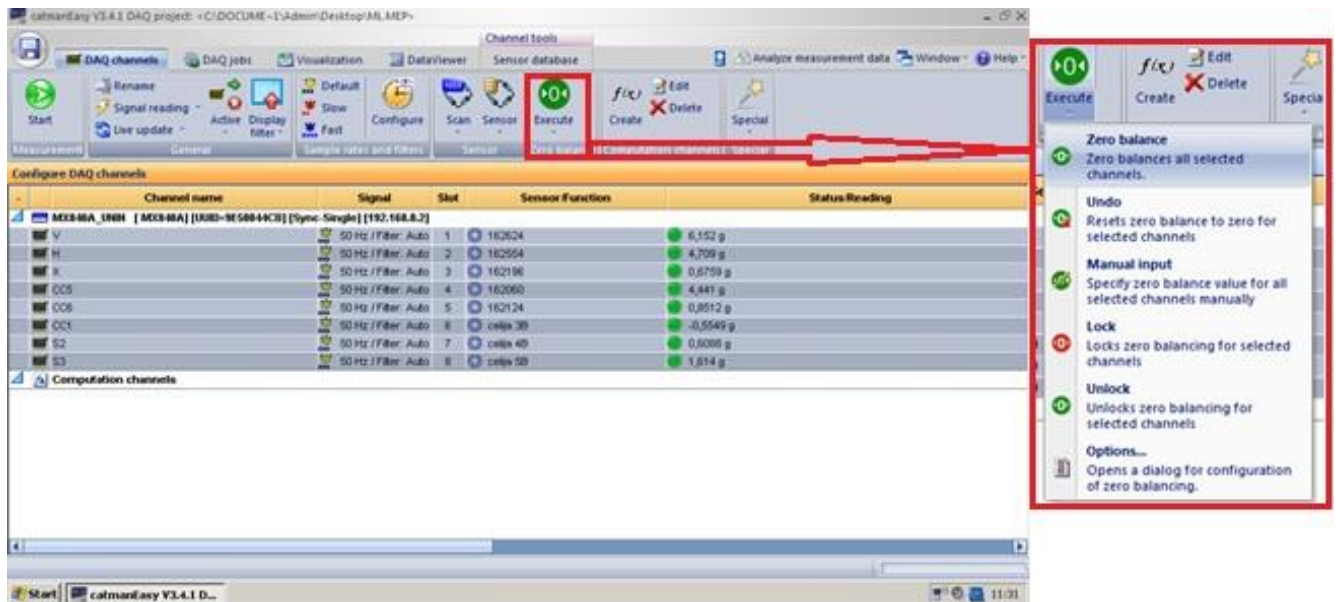
*Slika 3.7: Kutija od metalnog pocinčanog lima*

### **3.2. Kalibracija senzora**

Jedno od glavnih mjesta u tehnici eksperimenata pripada kvalitativnoj kalibraciji ćelija, mehaničkih veličina i stvaranje posebnih kalibracijskih uređaja. Prilikom pripreme za rad, glavnu pažnju posvećujemo očitavanju stabilnih karakteristika izmjerenih amplituda.

Za kalibraciju smo koristili standardizirane utege od 20g, 50g, 100g, 200g, 500g i 1000g (slika 3.9.b). Tenziometarske ćelije smo prethodno pričvrstili za eksperimentalni model koji smo plegli na drvene grede radi lakše kalibracije. Tenziometarske ćelije su kablom povezane za pojačalo, a pojačalo na računalo (slika 3.9.d).

U softveru „Catman®Easy“ smo resetirali očitavanja senzora i zatim smo započeli proces kalibracije (slika 3.8.).



Slika 3.8: Resetiranje očitavanja senzora u softveru „Catman@Easy“

Koeficijent osjetljivosti senzora  $k_0$ , postavljen je početnim sukladno tablici karakteristika tenziometra (tablica 2). Tada smo utege težine 20g, 50g, 100g, 200g, 500g i 1000g pojedinačno stavljani na senzor. Nakon toga je izračunat omjer stvarne i izmjerene težine i određen je prosječni omjer za određeni interval mjerenja. Ovaj interval nam služi za ispravak nominalne vrijednosti senzora.

Nova i točnija osjetljivost senzora je određena množenjem faktora korekcije za osjetljivost senzora (3.1.). U softver je uvedena nova osjetljivost senzora (tablica 3). Kako bi se provjerile izračunate vrijednosti osjetljivosti, postupak vaganja je napravljen 3 puta za svaku ćeliju. Za svako vaganje smo izračunavali relativnu pogrešku za interval mjerenja i za sve ćelije greška nam nije prelazila 0,4% [9].

$$k = k_0 \frac{m_{sred}}{m_{izmjereni}} \quad (3.1.)$$

Tablica 3: Korekcija koeficijenata osjetljivosti ćelije

Ćelija broj	Serijski broj	$k_0$	$k$
1	LB162624	2,00000	2,12765
2	LB162554	2,00000	2,14762
3	LB162196	2,00000	2,17791
4	LB162060	2,00000	2,08492
5	LB162124	2,00000	2,06875



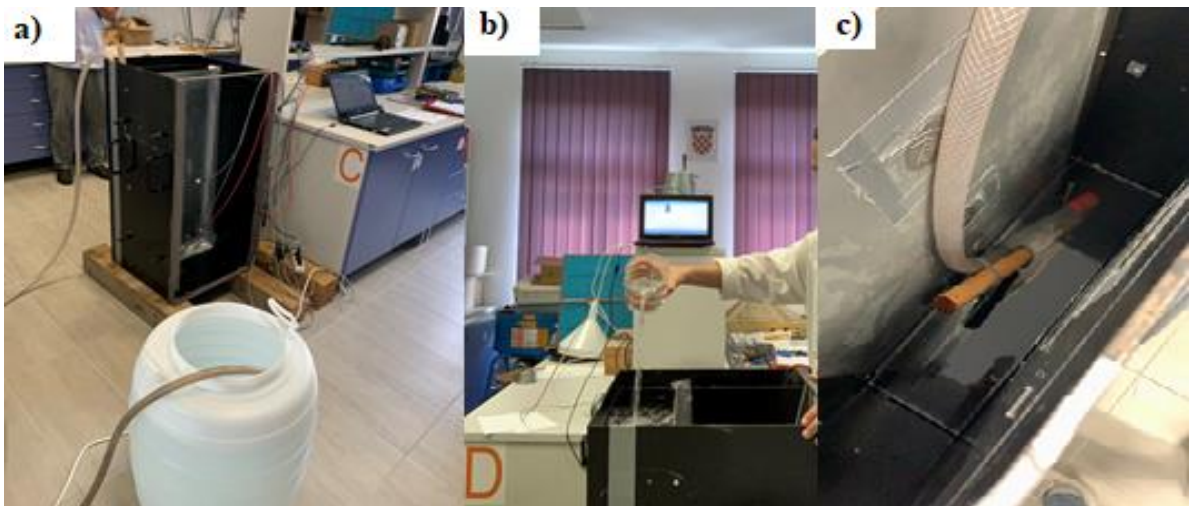
*Slika 3.9: Umjeravanje tenziometarskih konzolnih ćelija: a) pojačalo QuantumX MX840A; b) utezi korišteni u kalibraciji; c) uteg prilikom kalibracije na tenziometarskoj ćeliji; d) senzori povezani na računalo preko pojačala*

### 3.3. Mjerenje tlaka vode

Prije početka eksperimenta, cijeli mjerni sustav, sa instaliranim tenziometarskim ćelijama, kalibriran je mjerenjem hidrostatskog tlaka vode.

Mjerenje je provedeno idućim fazama:

- 1.) Očitanje ćelija vraćena su na 0 u programu za očitavanja "Catman © Easy" (naredba u programu „Execute“ ili „Zero Balance“), zatim smo započeli proces mjerenja;
- 2.) Vodu smo natakali u model pomoću crijeva (slika 3.10.a). Da bi smo vodu doveli do točne razine od 1m, natočili smo zadnjih par litara pomoću laboratorijske čaše volumena 1L (slika 3.10.b);
- 3.) Pričekali smo stabilizaciju očitavanja ćelija i zatim smo učitali izmjerene rezultate (3.11.).
- 4.) Nakon izmjerenih podataka, vodu iz modela smo praznili uz pomoć crijeva i vodene pumpe(slika 3.10.c)

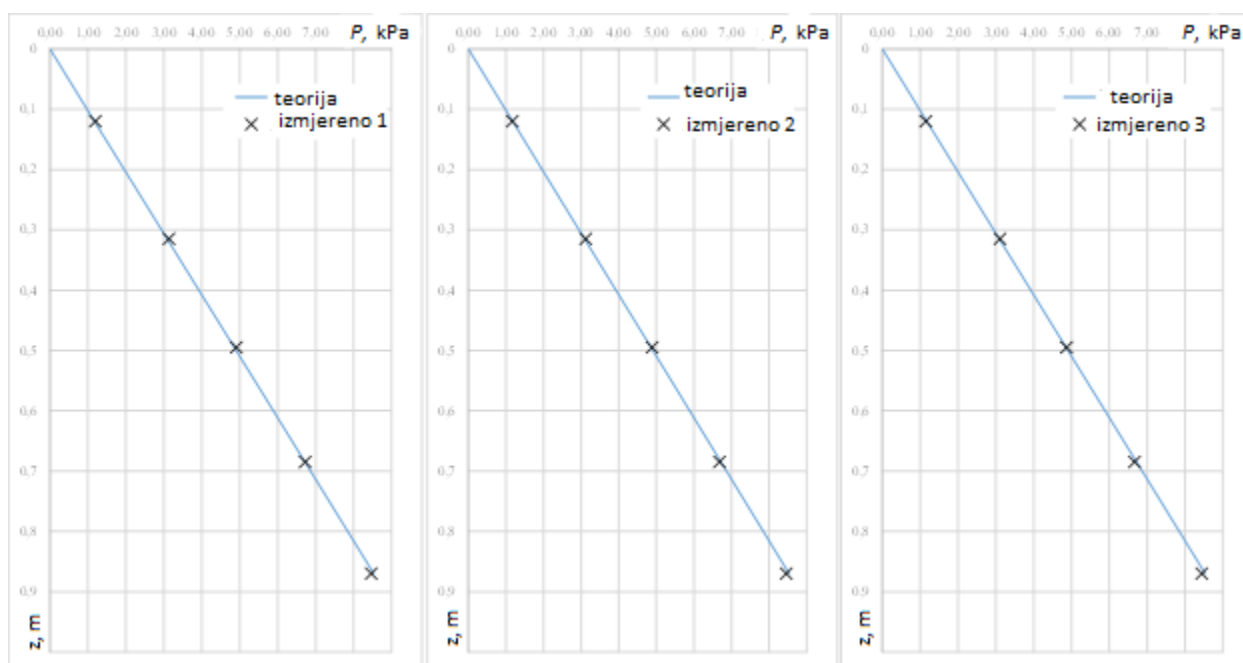


*Slika 3.10: a) Natakanje vode u model ispod razine 1m; b) Natakanje vode laboratorijskom čašom do razine 1m; c) pražnjenje modela pumpom*



Slika 3.11: Stabilizacija mjerenja i očitavanje rezultata

Da bi smo mogli ocijeniti točnost mjerenja, proces smo ponovili 3 puta. Teoretski izračun vodenog tlaka je proveden prema standardnoj formuli hidrostatičke (3.2.), a izmjereni tlak u programu je izračunat dijeljenjem sile izmjerene ćelijom na površinu pomičnog cilindra.



Slika 3.12: Grafički rezultati mjerenja hidrostatskih tlakova

$$P = \rho wgz = \gamma wz. \quad (3.2)$$

Rezultati mjerenja su prikazani na slici 3.12. Plava linija na dijagramu nam označava teorijski tlak, a crnim križićima su nam prikazane izmjerene vrijednosti. Relativnu pogrešku smo izračunali pomoću formule (3.3.)

$$\varepsilon = \frac{X_{izr}}{X_{izm}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

gdje je:

- $X_{izr}$  – izračunati tlak vode
- $X_{izm}$  – aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti tlaka.

Tablica 4: Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti

Dubina, $z$ [M]	Izračunate vrijednosti	Mjereni tlakovi, kPa			Prosjek	Relativna pogreška
		1	2	3		
0,000	0,000000					%
0,120	1,176840	1,180828	1,237904	1,205137	1,207956	-2,58
0,315	3,089205	3,012149	3,046927	3,011360	3,039910	1,62
0,495	4,854465	4,905192	4,924409	4,892316	4,894095	-0,81
0,685	6,717795	6,765494	6,780115	6,730107	6,748378	-0,45
0,870	8,532090	8,582193	8,617702	8,564882	8,574217	-0,49

### 3.4. Određivanje fizikalnih svojstva pijeska

Kako bi naše laboratorijsko ispitivanje bočnog tlaka bilo što preciznije, potrebno je odrediti fizikalna svojstva pijeska u rastresitom stanju.

Tablica 5: Plan eksperimenata

Vrsta eksperimenata	Broj eksperimenata
Određivanje vlažnosti pijeska	2
Određivanje obujamske gustoće	2
Određivanje gustoće čvrstih čestica pijeska bez pora	2
Određivanje koeficijenta pora	2
Stupanj zasićenosti (saturacija)	2

Fizikalna svojstva smo određivali na rahlo nasipanom pijesku pomoću priručnim metodama mjerenja, nije rađeno niti po jednoj normi. Za određivanje fizikalnih svojstva koristili smo laboratorijsku čašu volumena 250ml, vagu, kapaljku, šubler i metar.



*Slika 3.13: Laboratorijska čaša volumena 250ml*

U čašu je pijesak zasipavan otprilike do razine 200 ml. Nije potrebno da bude točno 200ml pošto se naknadno računa volumen pijeska u čaši radi preciznijih podataka. Prilikom zasipavanja smo trebali obratiti pozornost kako ne bi udarili čašu previše tresli da ne dođe do smanjenja pora u pijesku. Nakon završenog zasipavanja, mjerili smo visinu pijeska u čaši (slika 3.14.) dok smo prethodno šublerom četiri puta mjerili promjer čaše (tablica 6).

*Tablica 6: Izmjerene vrijednosti promjera čaše*

Broj mjerenja	Izmjerene vrijednosti promjera D [mm]
1.	66,17
2.	66,29
3.	65,96
4.	66,42
<b>Aritmetička sredina:</b>	<b>66,21</b>



*Slika 3.14: Mjerenje visine pijeska u čaši*

*Tablica 7: Izmjerene vrijednosti visine pijeska u čaši*

Broj mjerenja	Izmjerene vrijednosti visine h [mm]
1.	64,00
2.	65,50
3.	64,50
4.	66,50
<b>Aritmetička sredina:</b>	<b>65,125</b>

Ovim mjerenjima smo dobili sve potrebne podatke za proračun volumena pijeska u čaši. Volumen smo izračunali po standardnoj formuli za računanje volumena cilindra i dobili smo da je volumen pijeska u čaši  $224,23 \text{ cm}^3$ .

Masu pijeska ( $M_D$ ) je dobivena oduzimanjem mase čaše sa pijeskom i prazne čaše, masa pijeska u suhom rastresitom stanju iznosi 292,90 g.

Da bi smo odredili volumen pora ( $V_v$ ) pijeska, u čašu u koju smo naknadno nasipali pijesak, dolijevali smo vodu do razine da pijesak u cijelosti bude pod razinom vode (slika 3.15.b).

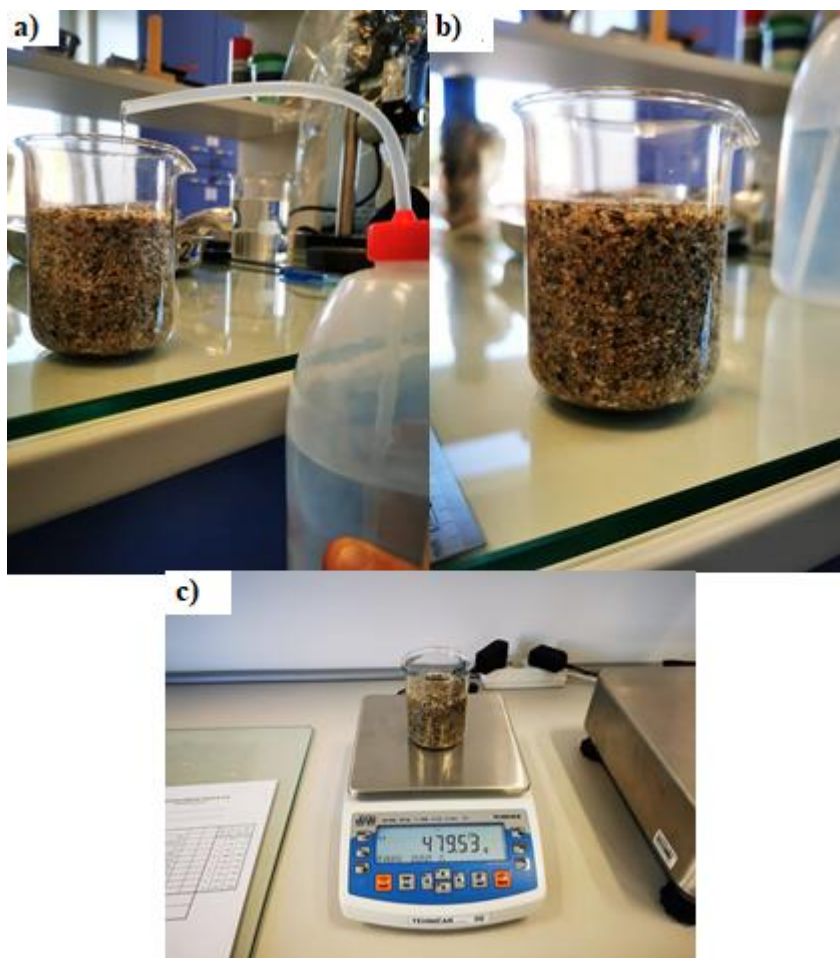


Volumen pora je izračunati po formuli (3.4) i iznosi 113,702 cm<sup>3</sup>.

$$V_v = \frac{M_w}{\varphi} \quad (3.4)$$

gdje je:

- $M_w$ - masa vode u pijesku u zasićenom stanju
- $\varphi$ - gustoća vode pri temperaturi 23°C [0,9976 g/cm<sup>3</sup>]



*Slika 3.15: a) Dolijevanje vode u pijesak; b) pijesak zasićen vodom; c) vaganje težine pijeska zasićenog vodom*

Masu vode ( $M_w$ ) smo izračunali na način da smo oduzeli masu pijeska u čaši sa masom pijeska i vode u čaši i dobivena je masa vode 110,263 g.

Tablica 8: Prikaz proračuna ostalih fizikalnih svojstva

Fizikalna svojstva	Formula	Izračunate vrijednosti
Obujamska gustoća zasićenog uzorka	$\varphi_{SAT} = \frac{M_D + M_w}{V}$	1,79 g/cm <sup>3</sup>
Obujamska gustoća pijeska u suhom stanju	$\rho_D = \frac{M_D}{V}$	1,30 g/cm <sup>3</sup>
Volumen čvrstih čestica	$V_S = V - V_w$	138,4 cm <sup>3</sup>
Gustoća čvrstih čestica	$\rho_S = \frac{M_S}{V_S}$	2,63 g/cm <sup>3</sup>
Porozitet	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	50,76%
Koeficijent pora	$e = \frac{V_v}{V_s}$	1,0309
Vlažnost uzorka	$w = \frac{M_w}{M_D} \times 100$	39,12%

Kontrolni izračuni:

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{1,0309}{1 + 1,0309} = 0,5076$$

$$n = 1 - \frac{\rho_D}{\rho_S} = 1 - \frac{1,30 \frac{g}{cm^3}}{2,63 \frac{g}{cm^3}} = 0,5057$$

$$e = \frac{\rho_S}{\rho_D} - 1 = \frac{2,63 \frac{g}{cm^3}}{1,30 \frac{g}{cm^3}} - 1 = 1,0231$$

$$S_r = \frac{w \times \rho_D \times \rho_S}{(\rho_S - \rho_D) \times \rho_w} = \frac{39,12\% \times 1,30 \frac{g}{cm^3} \times 2,63 g/cm^3}{\left(2,63 \frac{g}{cm^3} - 1,30 g/cm^3\right) \times 0,9976 g/cm^3} = 1,008$$

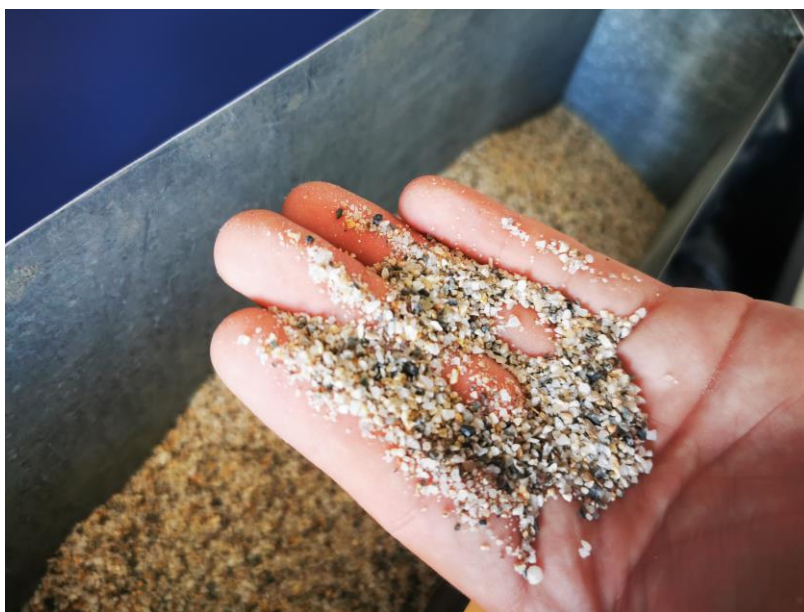
Za zadani volumen, stupanj zasićenosti može biti 1 ili 100%. S obzirom na kontrolni račun, naša pogreška je vrlo mala, 0,008%. Postupak određivanja fizikalnih svojstava smo ponovili još jednom radi kontrole i dobiveno je u drugom kontrolnom proračunu da nam je stupanj zasićenosti 0,9920 što znači da je uzorak zasićen vodom i da imamo pogrešku zanemarivo malu.

### 3.5. Određivanje granulometrijskog sastava

Da bi se otkrio udio čestica određene veličine u našem pijesku, potrebno je izvršiti granulometrijsku analizu. Granulometrijskom analizom nastaje granulometrijska krivulja koja se ucrtava u granulometrijski dijagram. Nakon ucrtavanja granulometrijske krivulje u granulometrijski dijagram, vidimo koji udio našeg pijeska spada u prah, pijesak i šljunak.

Našu granulometrijsku analizu smo proveli postupkom koji se zove prosijavanje. Prosijavanje se radi na materijalima čija su zrna veća od 0,06 mm. Kod metode prosijavanja bitno je da uzorak nekoherentnog materijala bude osušen i on se prosijava kroz seriju sita, čija se veličina otvora smanjuje odozgo prema dolje. Količina materijala koji koristimo za prosijavanje ovisi da li se radi o krupnozrnatom ili sitnozrnatom materijalu. Za sitnozrnate materijale je dovoljno uzeti npr. 250 grama. Mi smo za svoj postupak prosijavanja uzeli količinu od 479,4 grama.

Pošto je naš pijesak veoma sitan, koristili smo sita veličine 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm.



*Slika 3.16: Prikaz granulacije pijeska*



*Slika 3.17: Prosijavanje pijeska*

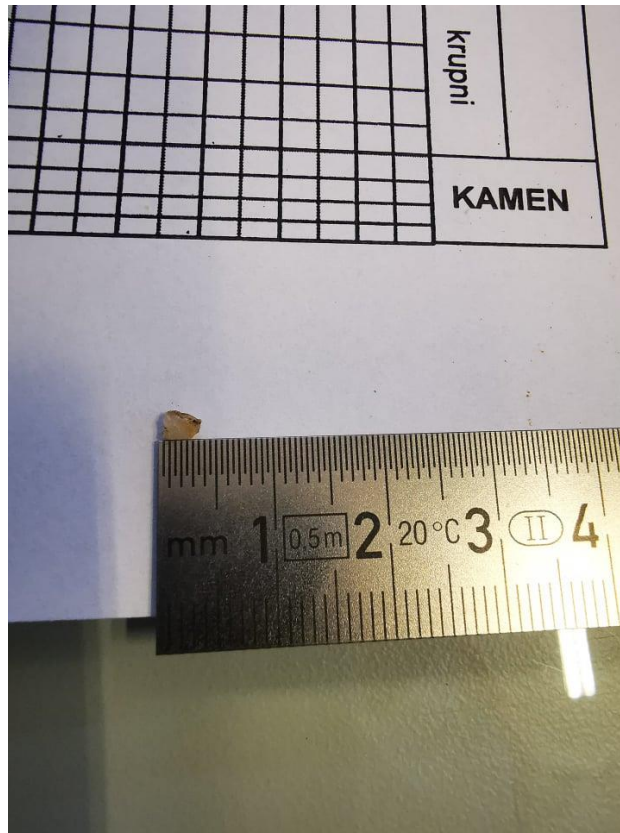
Sita smo zajedno za pijeskom stavili u aparat i započeo je naš proces prosijavanja (slika 3.17.). Radi male količine pijeska koji smo koristili i njegove nekoherentnosti i rastresitosti, prosijavanje je trajalo 5 minuta.

Nakon završenog prosijavanja, izvagali smo ostatak pijeska na svakom situ i na samom dnu posude na aparatu. Postoci prolaska zrna kroz sito prikazani su u tablici 9.

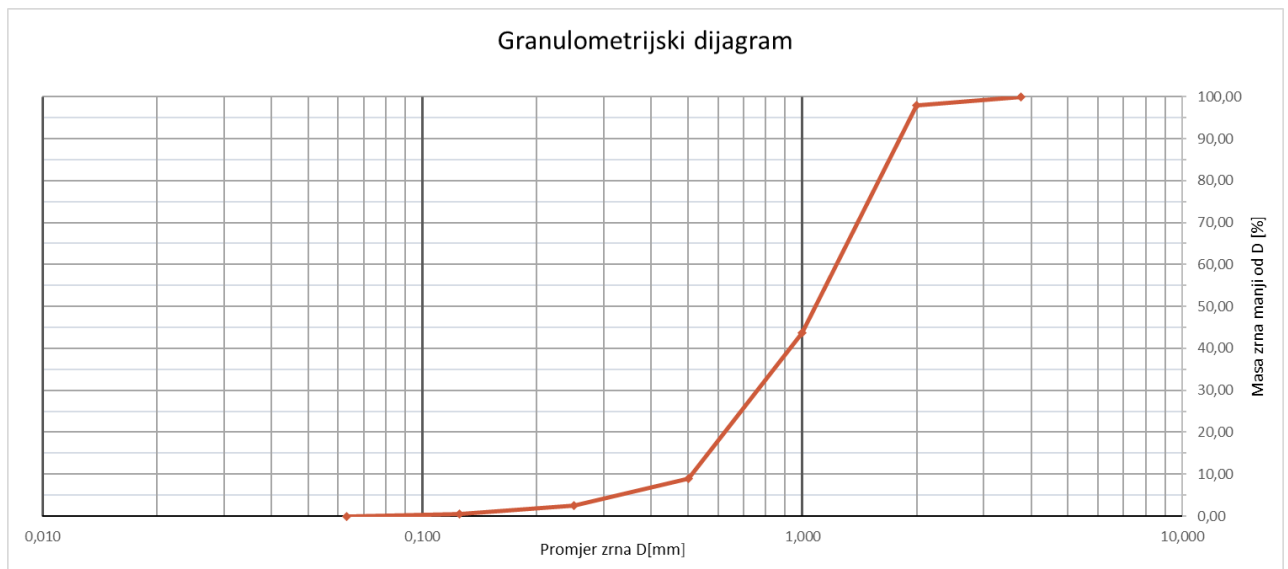
*Tablica 9: Prikaz postotka prolaska zrna kroz sito*

<b>Ekvivalentni promjer zrna [mm]</b>	<b>Postotak zrna jednak ili manji od ekvivalentnog promjera</b>
3,75	100
2,0	98
1,0	43,64
0,5	8,95
0,25	2,53
0,125	0,49
0,063	0,01

Potrebno je napomenuti da je najveća veličina korištenog otvora sita 4 mm. Međutim, sav naš materijal je prošao kroz to sito. Od ostatka materijala na situ od 2 mm smo pronašli najveće zrno čija je dimenzija bila 3,75mm x 2,50mm (slika 3.18.)



Slika 3.18: Dimenzija najvećeg zrna na situ od 2 mm



Slika 3.19: Granulometrijski dijagram dobiven prosijavanjem u laboratoriju

Bitne osobine granulometrijske krivulje mogu se izraziti pomoću efektivnog promjera zrna  $D_{10}$  koeficijenta jednolikosti  $C_u$ , koeficijenta zakrivljenosti  $C_c$ . Njih možemo izračunati pomoću promjera zrna:

- $D_{10}$ - promjer sita kroz koji prolazi zadnjih 10% sijanog uzorka
- $D_{30}$ - promjer sita kroz koji prolazi 30% ukupne količine sijanog uzorka
- $D_{60}$ - promjer sita kroz koji prolazi 60% ukupne količine sijanog uzorka

Očitavanjem iz dijagrama smo dobili iduće podatke:  $D_{60}= 1,2$  mm;  $D_{30}= 0,75$  mm;  $D_{10}= 0,51$  mm. Pomoću očitanih podataka možemo odrediti statističke pokazatelje karakteristika krivulje.

Koeficijent jednolikosti iznosi:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1,2}{0,51} = 2,35 \quad (3.5)$$

Koeficijent zakrivljenosti iznosi:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{0,75^2}{1,2 \times 0,51} = 0,92 \quad (3.6)$$

Kriteriji za dodjeljivanje simbola i naziva pojedinim grupama tla na osnovi laboratorijskih ispitivanja <sup>a</sup>				Klasifikacija tla	
				Simbol	Naziv grupe <sup>b</sup>
KRUPNOZRNA TLA (više od 50 % ostaje na situ br. 200 - 0.075 mm)	Šljunak (više od 50 % ostalo je na situ br. 4 - 4,75 mm)	Čisti šljunak (manje od 5 % sitnih čestica <sup>f</sup> )	$c_u \geq 4$ i $1 \leq c_c \leq 3^c$	GW	Dobro graduiran šljunak <sup>d</sup>
		Šljunak sa sitnim česticama (više od 12 % sitnih čestica <sup>f</sup> )	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	GP GM GC	Slabo graduiran šljunak <sup>d</sup> Prašinasti šljunak <sup>d,f,g</sup> Glinoviti šljunak <sup>d,f,g</sup>
	Pijesak (50 % ili više prolazi kroz sito br. 4 - 4,75 mm)	Čisti pijesak (manje od 5 % sitnih čestica <sup>f</sup> )	$c_u \geq 6$ i $1 \leq c_c \leq 3^c$	SW	Dobro graduiran pijesak <sup>h</sup>
		Pijesak sa sitnim česticama (više od 12 % sitnih čestica <sup>f</sup> )	$c_u < 6$ i/ili $1 > c_c > 3^c$	SP	Slabo graduiran pijesak <sup>h</sup>
	Pijesak sa sitnim česticama (više od 12 % sitnih čestica <sup>f</sup> )	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH	SM	Prašinasti pijesak <sup>e,g,h</sup>	
		Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	SC	Glinoviti pijesak <sup>e,g,h</sup>	
SITNOZRNA TLA (50 % ili više prolazi kroz sito br. 200 - 0.075 mm)	Prahovi i gline (granica tečenja manja od 50 %)	Anorganski	$I_p > 7$ i na ili iznad A-linije <sup>i</sup>	CL	Posna glina <sup>k,l,m</sup>
		Anorganski	$I_p < 4$ ili ispod A-linije <sup>i</sup>	ML	Prah <sup>k,l,m</sup>
	Organski	(Granica tečenja - sušenje u peći) / (Granica tečenja - bez sušenja u peći) < 0,75	OL	Organska glina <sup>k,l,m,n</sup> Organski prah <sup>k,l,m,o</sup>	
	Prahovi i gline (granica tečenja veća od 50 %)	Anorganski	$I_p$ na ili iznad A-linije	CH	Masna glina <sup>k,l,m</sup>
		Anorganski	$I_p$ ispod A-linije	MH	Elastični prah <sup>k,l,m</sup>
	Organski	(Granica tečenja - sušenje u peći) / (Granica tečenja - bez sušenja u peći) < 0,75	OH	Organska glina <sup>k,l,m,p</sup> Organski prah <sup>k,l,m,o</sup>	
Visoko organsko tlo	Primarno organska materija, tamne boje i organskog mirisa		PT	Treset	

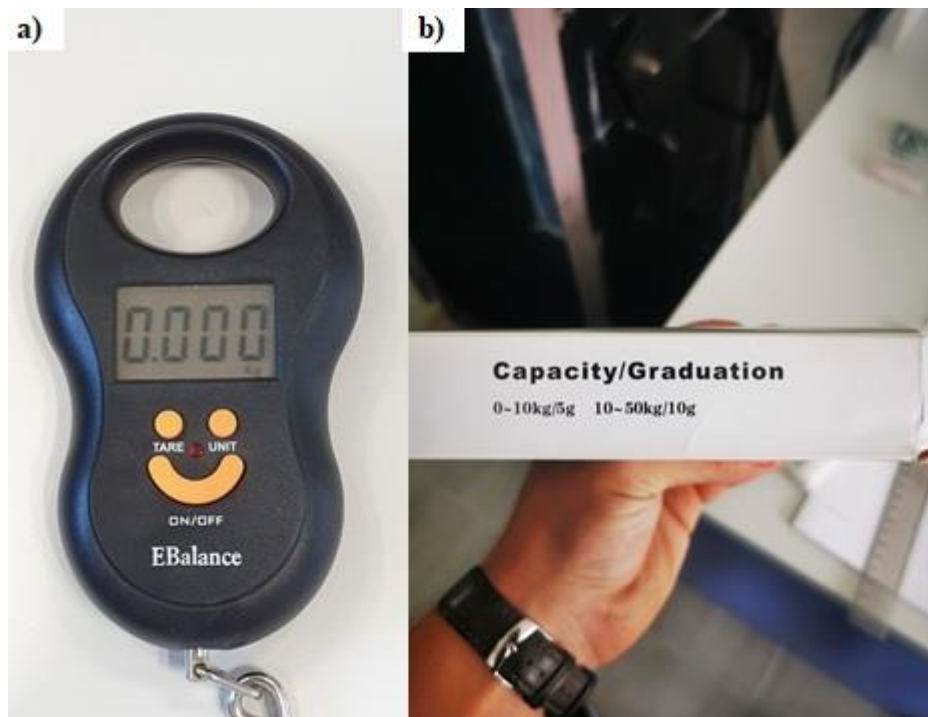
Slika 3.20: USCS klasifikacija tla prema ASTM D 2487

Iz slike 3.20. vidimo uvjet da  $C_u < 6$  i/ili  $1 > C_c > 3$  što odgovara našem materijalu jer su nam i koeficijent jednolikosti manji od 6 i koeficijent zakrivljenosti manji od 1 što nam dokazuje da se radi o slabo graduiranom pijesku.

### 3.6. Mjerenje tlaka pijeska

U našem eksperimentalnom mjerenju bočnog tlaka pijeska smo koristili pijesak iz Jerovca sitne granulacije koja je prikazana na slici 3.16.

Prethodno smo trebali izmjeriti količinu pijeska koju ćemo koristiti u našem eksperimentu i ona je iznosila 112,92 kg. Vaganje smo vršili pomoću vage marke „EBalance“ u laboratoriju prikazane na slici 3.21. U nijednom ispitivanju nije sudjelovala ista količina pijeska zbog načina zasipavanja i zbog razlike poroznosti pijeska koja ovisi o načinu zasipavanja.



Slika 3.21: a) Vaga marke EBalance; b) pogreška vage s obzirom na mjerenu kilažu

Zasipavanje eksperimentalnog modela se vršilo na način da smo plastičnom lopaticom stavljali pijesak u metalnu kutiju (slika 3.22.a), i zatim zasipavali pijesak u eksperimentalni model (slika 3.22.b). Model je zasipavan pijeskom do visine 1 m, a bočni tlakovi su izmjereni samo pod utjecajem zasipavanja.

Eksperimentalno mjerenje se vršilo pod kutom od  $0^\circ$  i pod kutom od  $45^\circ$ .

Prvo je proveden postupak mjerenja bočnog tlaka pod  $0^\circ$ .

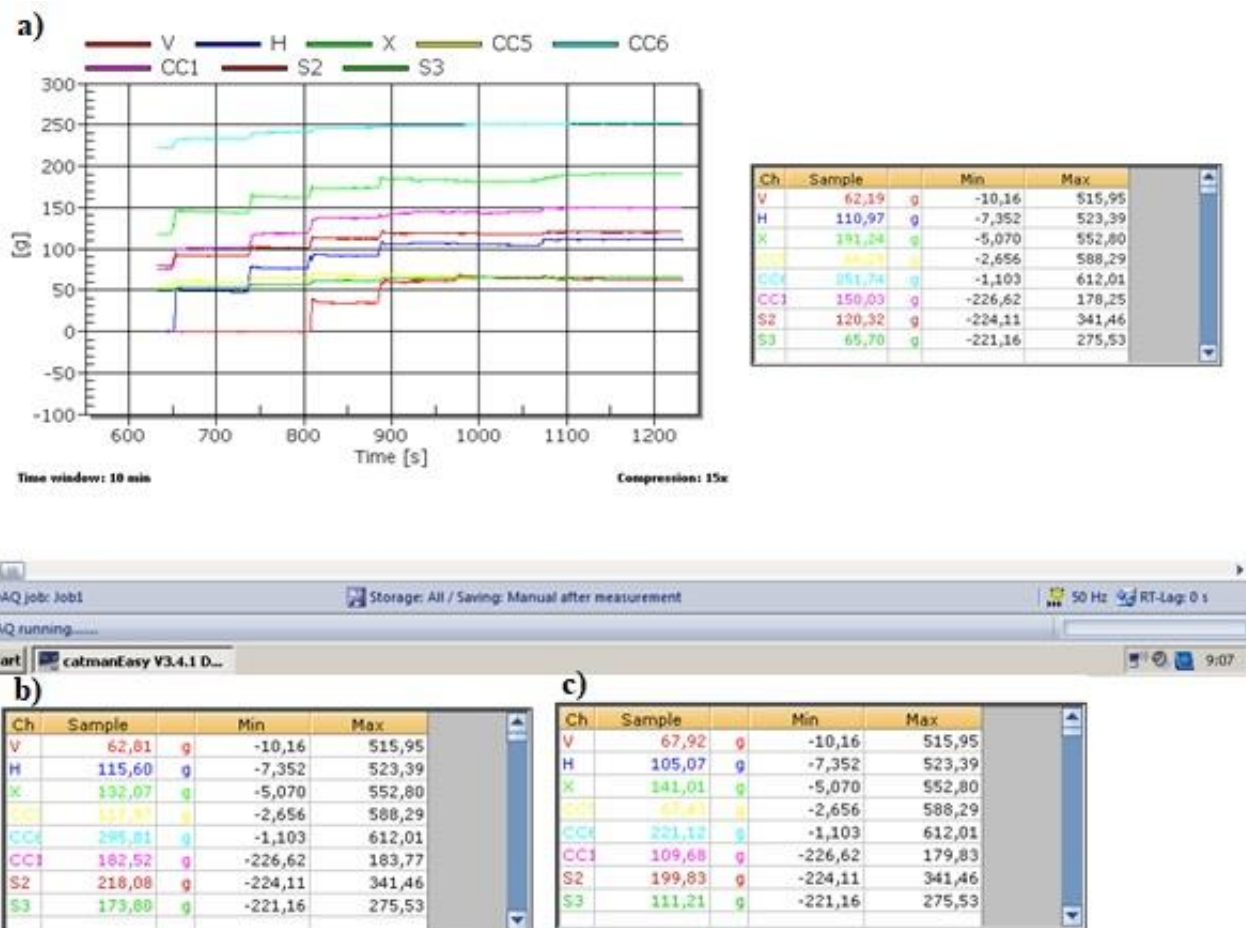


*Slika 3.22: a) Stavljanje pijeska lopaticom u metalnu kutiju; b) Zasipavanje pijeska u eksperimentalni model; c) Prikaz zasipavanja pijeska u model slikano odozgo*

Prilikom procesa mjerenja bočnog tlaka pri  $0^\circ$ , veliku pozornost je potrebno obratiti da ne bude vibracija i udaraca u prostoru gdje se provodi eksperimentiranje radi ostvarenja pouzdanih rezultata. Pri zasipavanju je potrebno bilo paziti da prilikom istresanja pijeska u eksperimentalni model ne bi dirali model i da pijesak pada na sredinu eksperimentalnog modela, tj. na sredinu eksperimentalnog prostora koji se puni pijeskom (slika 3.22.c).

Cijeli proces mjerenja, presijavanje pijeska iz plastične posude, presipavanje pijeska u eksperimentalni model, punjenje modela do razine 1m, čekanje stabilizacije rezultata, očitavanje i spremanje rezultata mjerenja i pražnjenje modela usisivačem, trajalo je u prosjeku 50 minuta. Proces smo ponavljali 6 puta kako bi mogli uzeti pouzdanije rezultate s obzirom na moguće greške koje bi se mogle desiti prilikom cjelokupnog procesa.

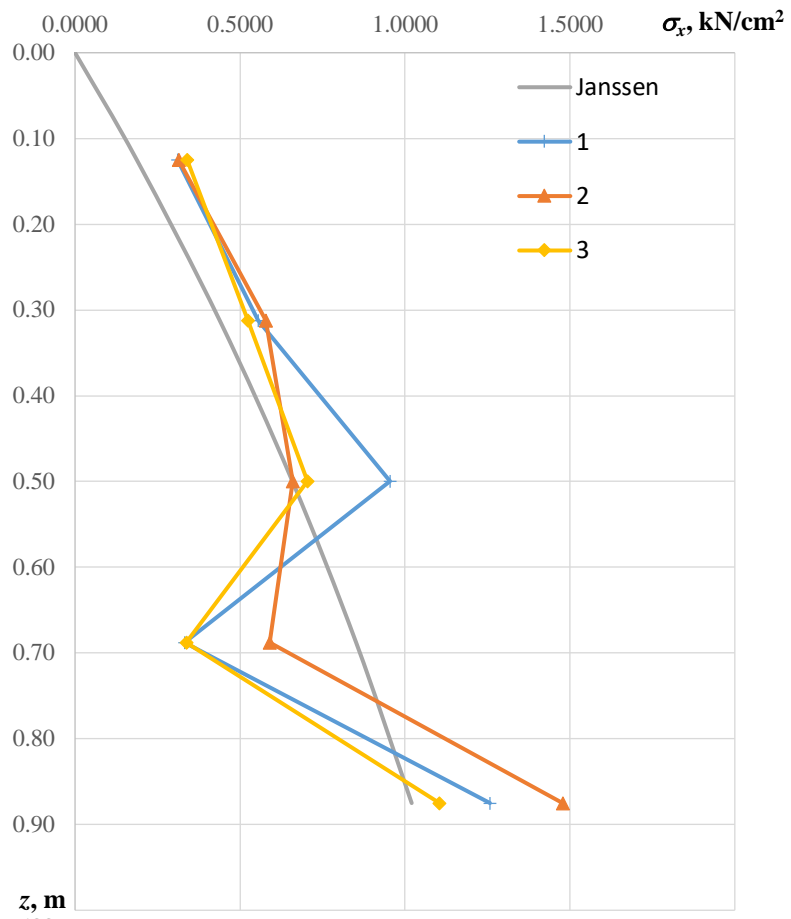




Slika 3.23: Mjerenje bočnog tlaka pod kutom  $0^\circ$  u softveru "Catman © Easy"; a) Prikaz dijagrama i izmjerenih vrijednosti prvog mjerenja; b) prikaz izmjerenih vrijednosti drugog mjerenja; c) prikaz izmjerenih vrijednosti trećeg mjerenja

Na dijagramu (slika 3.23.a) vidimo tijekom našeg eksperimentiranja i promjene tlaka tijekom vremena, te vidimo u kojem trenutcima se sipao pijesak u model i na kraju stabilizacija očitavanja.

Nakon stabilizacije očitavanja i spremanja izmjerenih vrijednosti (tablice slika 3.23), podatci su prenesi u već pripremljeni obrazac softvera za proračunske tablice Microsoft Excel gdje su podaci grafički prikazani u obliku dijagrama i uspoređeni sa Janssen-ovom teorijom. Uzeti su podaci iz tri najpouzdanija mjerenja prikazanih na slici 3.23.



Slika 3.24: Dijagram izmjerenih podataka modela pod kutom  $0^\circ$

U drugom dijelu ispitivanja, mjeren je bočni tlak pijeska dok je eksperimentalni model pod kutom  $45^\circ$ .

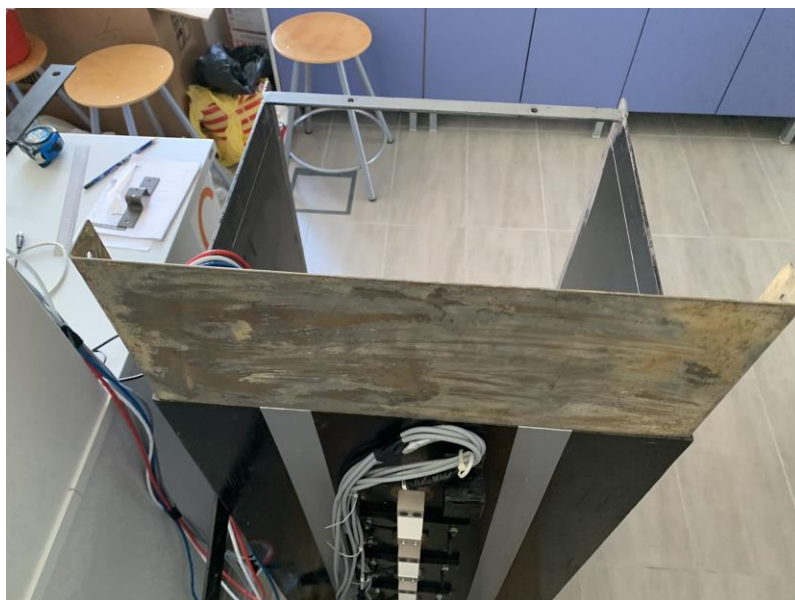


*Slika 3.25: Model postavljen pod kut  $45^\circ$  s obzirom na horizontalu*

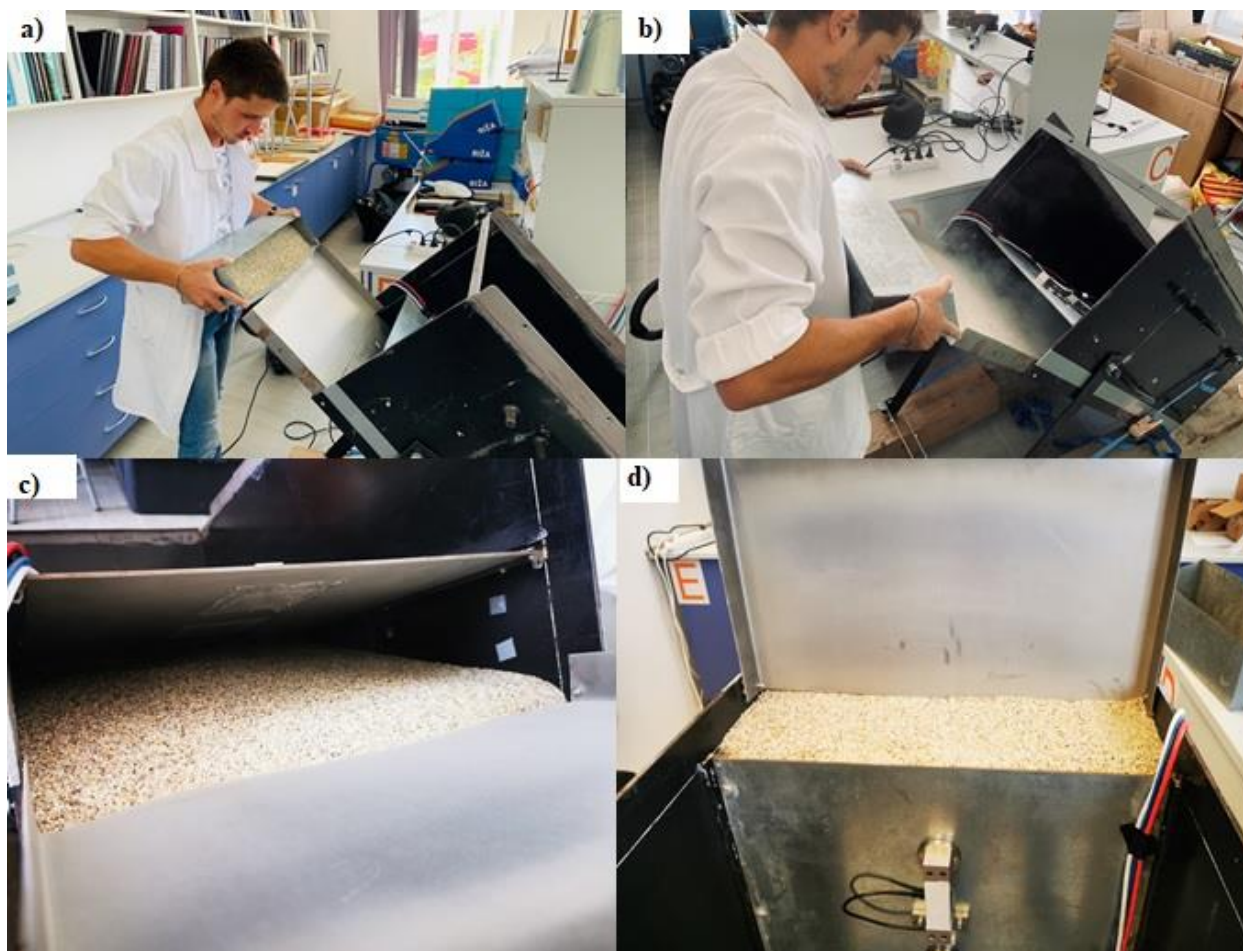
Cjelokupni proces mjerenja je neznatno drugačiji od prethodnog postupka. Nakon početka mjerenja, bilo je potrebno nagnuti model pod kut  $45^\circ$  i nakon završetka zasipavanja, bilo ga je potrebno vratiti pod kut  $0^\circ$ , zatim bi se pričekala stabilizacija senzora i izvršilo bi se očitavanje podataka. Prilikom spuštanja modela iz okomitog položaja (kut  $0^\circ$ ) u kosi položaj (kut  $45^\circ$ ) bilo je potrebno paziti kako bi model polagano i jednoliko spuštali/dizali kako ne bi došlo do naglih očitavanja tenziometarskih ćelija i da ne bi došlo do naglog punjenja pora pijeska što bi nam uveliko utjecalo na najveće izmjerene vrijednosti.

Da bi smo ostvarili puno zasipavanje modela do razine 1m, bilo je potrebno nadograditi naš model. Ugradili smo limenu ploču savijenu u slovo U na koju bi zasipavali pijesak i on bi klizio preko nje do dna modela (slika 3.26).

Zbog trenja između pijeska u modelu i modela, nije bilo moguće ostvariti ispunjenost modela pijeskom dok je postavljen pod kutom  $45^\circ$  pa je pijesak koji se nalazio na limenom produžetku, prilikom dizanja modela nazad pod kut  $0^\circ$ , zapunio tu razliku koja je nedostajala da bi smo postigli razinu od 1m (slika 3.27.d.).

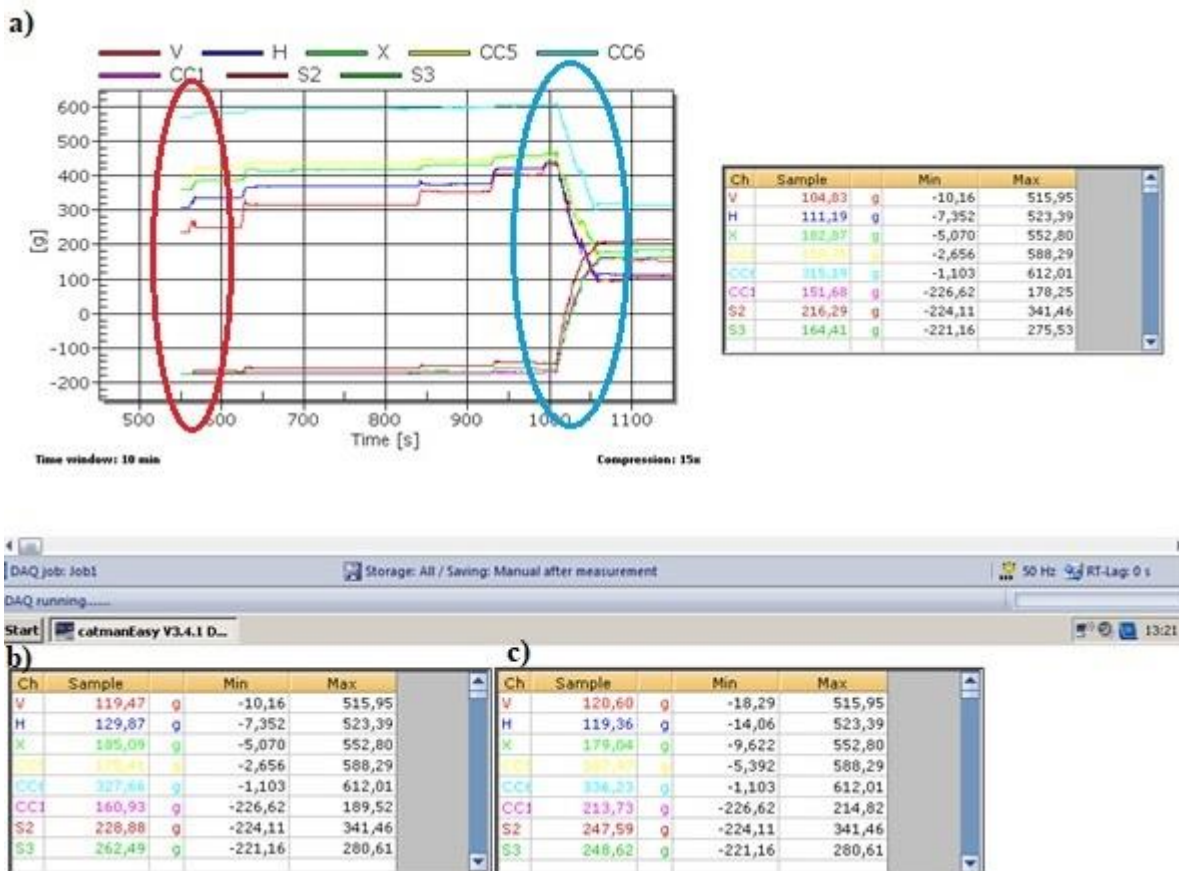


*Slika 3.26: Limena ploča kao nadogradnja našem modelu*



*Slika 3.27: a) Početak zasipavanja u model pod kutom 45°; b) Zasipavanje pijeska u model; c) Položaj pijeska u modelu; d) Pijesak u eksperimentalnom modelu nakon vraćanja u početni položaj*

Cjelokupni proces je neznatno drugačiji od prethodnog ispitivanja zbog naginjanja i vraćanja modela, pa je proces od početka mjerenja, naginjanja modela, punjenja modela, vraćanja u početni položaj, te pražnjenja trajao 60 minuta.

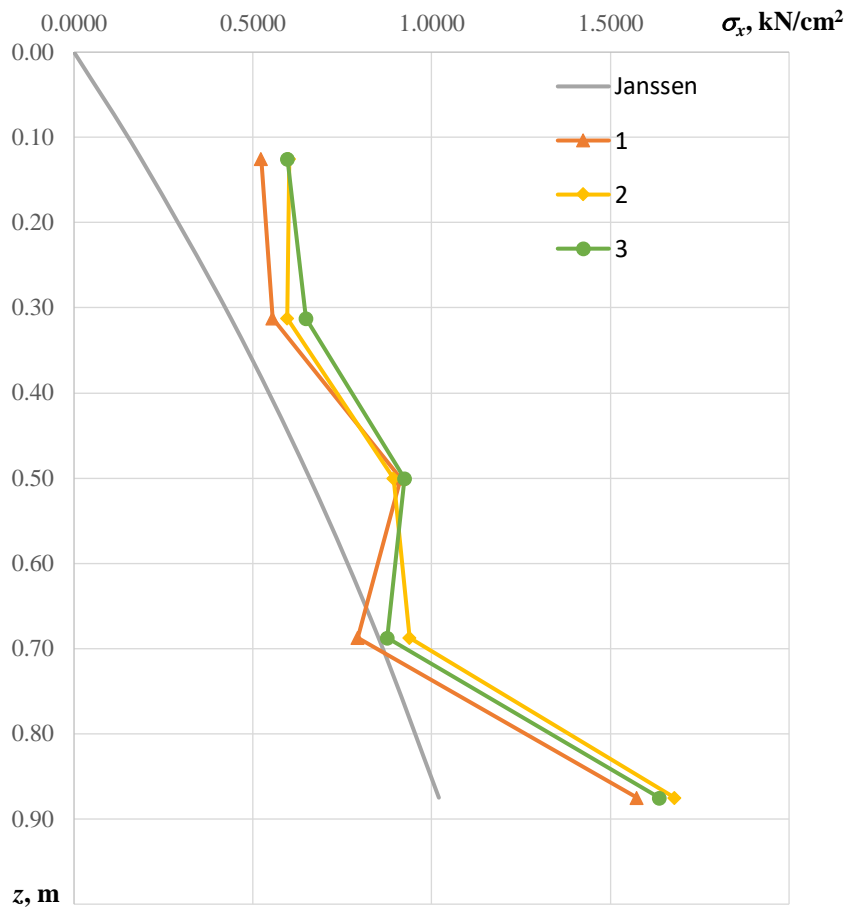


Na slici 3.28.a. crveno su označene negativne vrijednosti mjerenja tri tenziometarske ćelije do kojih dolazi prilikom postavljanja modela pod kut  $45^\circ$  jer dolazi do utjecaja vertikalne sile na samu ćeliju koje se očitavaju kao negativne jer se tenziometarska ćelija pomiče na suprotnu stranu, tj. pomiče se prema sredini eksperimentalnog modela. Također je crvenim označeno i velike početne vrijednosti ostalih pet tenziometara koji se javljaju zbog istog razloga, odnosno naginjanja modela.

Na slici 3.28.a. plavim je označeno završetak zasipavanja modela i vraćanje modela u početni položaj (kut  $0^\circ$ ). radi toga dolazi do smanjenja vrijednosti na tenziometarske ćelije koje su na početku eksperimenta bile pozitivne, i dolazi do povećanja izmjerenih vrijednosti tenziometarskih ćelija kod kojih su na početku eksperimenta bile negativne vrijednosti.

Nakon vraćanja modela u početni položaj, pričekala se stabilizacija senzora i očitani su dobivene vrijednosti, izmjerene vrijednosti su prenesene u već pripremljeni obrazac softvera za proračunske tablice Microsoft Excel gdje su podaci grafički prikazani u obliku dijagrama i uspoređeni sa Janssen-ovom teorijom.

Kod ovog ispitivanja smo također radili 6 ispitivanja koje smo pregledali i uzeli smo tri najpouzdanija mjerenja prikazani na slici 3.29.

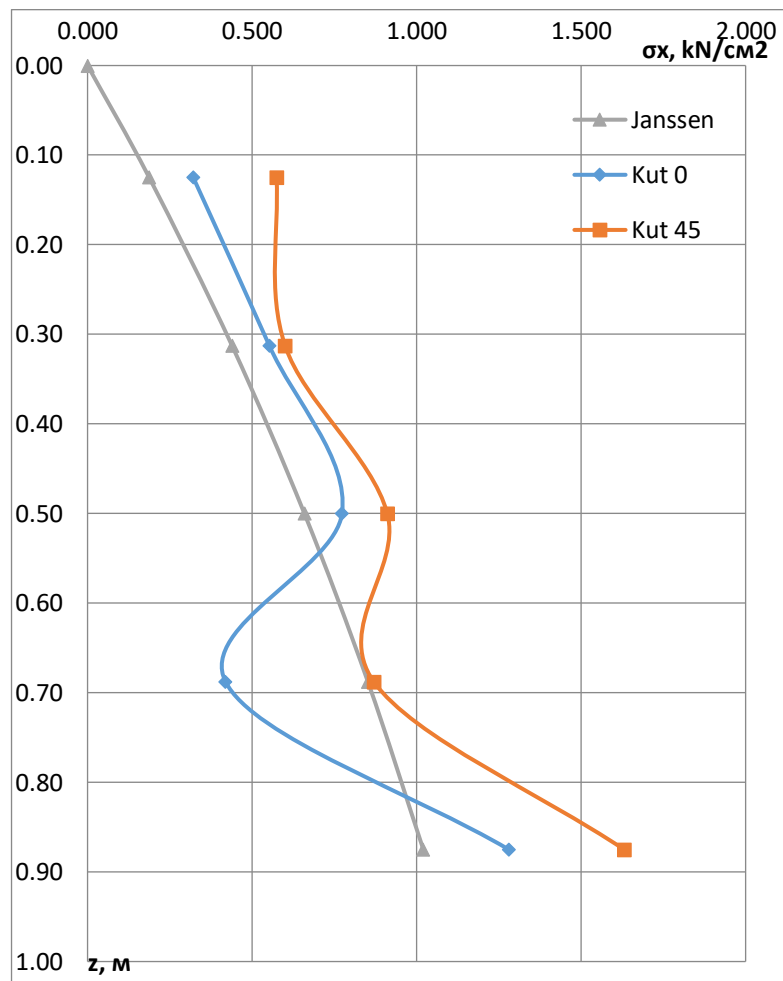


Slika 3.29: Dijagram izmjerenih podataka modela pod kutom 45°

## 4. Analiza rezultata mjerenja i usporedba rezultata s teorijom

### 4.1. Usporedba izmjerenih vrijednosti sa Janssen-ovom teorijom

Da bi smo olakšali usporedbu rezultata, uzeta je srednja vrijednost odabranih izmjerenih rezultata koji su prikazani na slici 3.24. i slici 3.29. za pojedine kutove (slika 4.1).



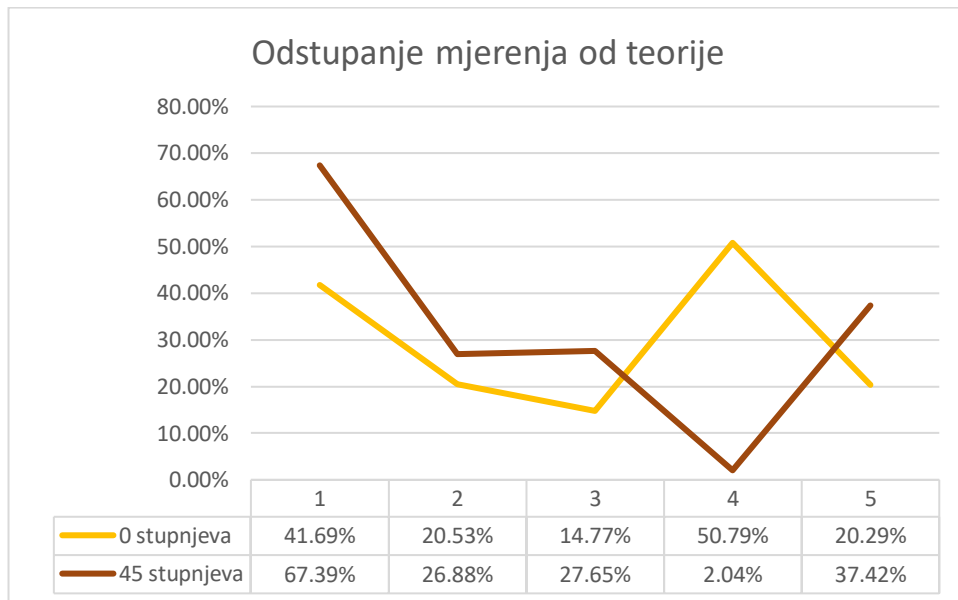
Slika 4.1: Dijagram usporedbe srednjih izmjerenih vrijednosti i Janssen-ove teorije

Iz slike 4.1. vidimo kako su dijagrami tlaka slične prirode, rastu do dubine 0,5m, zatim dolazi do smanjenja u sloju debljine 0,2m i zatim krene rasti prema dnu gdje doseže svoj maksimum na dubini od 0,88m.

Proučavajući svaku pojedinu točku mjerenja, u grafičkom prikazu srednjih izmjerenih rezultata za pojedine kutove i Janssen-ove teorije vidimo kako imamo odstupanja koja iznose u prosjeku 29,61% za mjerenje pod kutom 0° i 32,28% za mjerenje pod kutom od 45°.

Gledajući svaki mjernu točku pojedinačno, vidimo kako su rezultati pri mjerenju pod kutom 45° konzistentniji nego kod kuta 0°. U mjernoj točki 4, na dubini od 0,6875m vidimo kako nam skoro dolazi do preklapanja tj. podudaranja rezultata sa Janssen-ovom teorijom, greška je 2,04%.

Detaljniji prikaz odstupanja u postocima za svaku pojedinu točku mjerenja je prikazan na slici 4.2.

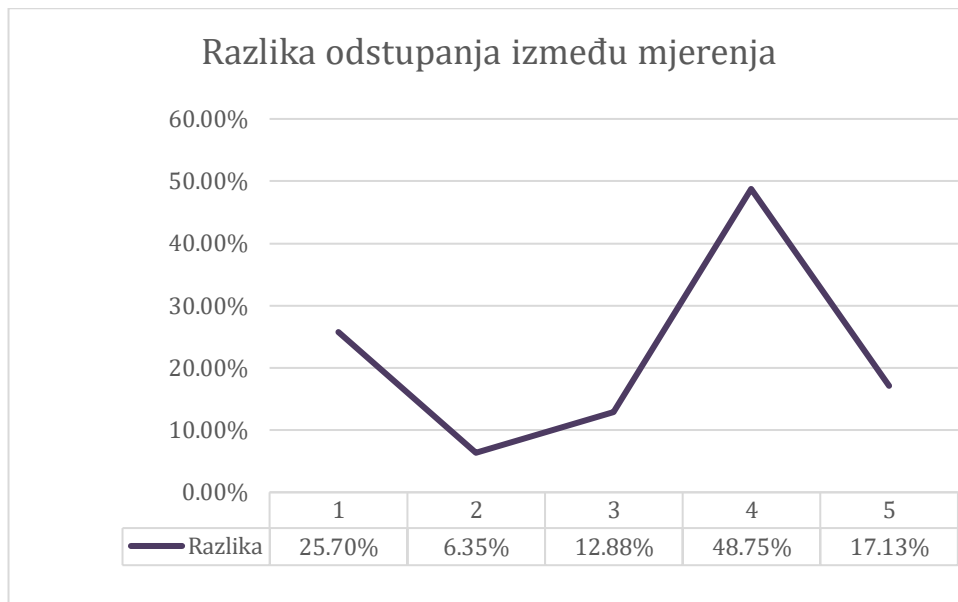


*Slika 4.2: Odstupanje srednje izmjerenih vrijednosti od Janssen-ove teorije*

Značajna razlika odstupanja mjerenja bočnog tlaka pri kutu 45° se može objasniti time što dolazi do punjenja pora kompozitnog medija (pijeska) prilikom pomicanja eksperimentalnog modela radi vraćanja modela iz nagnutog u okomiti položaj.

Za mjerenje pri nagnutosti od 0° vidimo da je maksimalno odstupanje od teorije 50,79%.





*Slika 4.3: Razlika odstupanja između srednjih vrijednosti ispitivanja*

U poglavlju 2. je rečeno kako je od Janssen-ove teorije i eksperimentalnih mjerenja drugih znanstvenika znala biti razlika 2 do 5 puta veća, ili kao što je rečeno u poglavlju 2.3 da je između Janssen-ove teorije i eksperimenata znala biti razlika od 40%. Takav je slučaj i u ovom eksperimentalnom ispitivanju.

Gledajući podatke dobivene mjerenjem tlaka vode u poglavlju 3.3. vidimo da su naše tenziometarske ćelije iznimno precizne, što nam govori da smo došli do pouzdanih rezultata.

Greška eksperimentalnog mjerenja bočnog tlaka za pojedine kutove se može pripisati tome što nije uzeta u obzir anizotropija materijala i pretpostavljam da bi rezultati imali manje odstupanje kada bi se ista uzela u obzir.

## 5. Zaključak

U ovom diplomskome radu obrađena je tema mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja sa konkretnim eksperimentima. Za sam početak napravljena je analiza teorije proračuna za određene konstrukcije koje se koriste u graditeljskoj praksi pri proračunu bočnih tlakova.

Ono što je karakteristično da se one zasipavaju odnosno pune odozgo, prilikom čega dolazi do različitih naprezanja. Kako bismo došli do nekih najjednostavnijih jednadžba uzeli smo u obzir Janssen-ovu metodu proračuna se temelji na ravnoteži tankog horizontalnog sloja nasipanog materijala. U našem eksperimentu mjerenje bočnog tlaka sipine na blisko postavljene stjenke modela izvodili smo pod različitim kutovima s obzirom na horizontalu.

Eksperimentalni model nam je od čeličnog lima sa otvorenim vrhom čije su tlocrtne dimenzije 50cm x 50cm i visine 105cm, te se sastoji od 4 stijenke i dna. Za mjerenje bočnih tlakova sipine, koristili smo osam tenziometarskih konzolnih ćelija koje smo fiksirali za prednju i stražnju stijenku modela. Prilikom pripreme za rad, glavnu pažnju posvetili smo očitavanju stabilnih karakteristika izmjerenih amplituda koje dobijemo iz kalibracije senzora.

Prije samog početka eksperimenta napravljeno je kalibracijsko mjerenje hidrostatskog tlaka vode. Slijedi određivanje fizikalnih svojstava pijeska u rahlo nasipanom stanju pomoću priručnim metodama mjerenja. Da bi se otkrio udio čestica određene veličine u našem pijesku odredili smo granulometrijski sastav. Mjerenja tlaka pijeska izvodili smo pri zasipavanju  $0^\circ$  i  $45^\circ$  sa 6 ponavljanja kako bismo mogli uzeti najpouzdanije rezultate zbog mogućih određenih grešaka.

Prilikom proces mjerenja bočnog tlaka pri  $0^\circ$ , veliku pozornost je potrebno obratiti da ne bude vibracija i udaraca u prostoru gdje se provodi eksperimentiranje radi ostvarenja pouzdanih rezultata. Dok kod mjerenja bočnog tlaka pri  $45^\circ$  bilo je potrebno nagnuti model pod kut i nakon završetka zasipavanja, bilo ga je potrebno vratiti pod kut  $0^\circ$ , zatim bi se pričekala stabilizacija senzora i izvršilo bi se očitavanje podataka

Za sami kraj cijela analiza rezultata mjerenja je prokomentirana uz određene dijagrame koji prikazuju usporedbu pojedinih kutova. Gdje možemo zaključiti da svaka pojedina točka mjerenja srednjih izmjerenih rezultata za pojedine kutove i Janssen-ove teorije odskače. Značajna razlika odstupanja mjerenja bočnog tlaka pri kutu  $45^\circ$  se može objasniti time što dolazi do punjenja pora kompozitnog medija (pijeska) prilikom pomicanja eksperimentalnog modela radi vraćanja modela iz nagnutog u okomiti položaj. Uspoređujući naše rezultate u analizi podataka, došli smo do zaključka da je naše ispitivanje ima veliko odstupanje od teorije, međutim i dalje su relevantni podaci iz razloga što su mnogi znanstvenici izvodili pokuse i imali odstupanja veoma bliska našima.

## 6. Literatura

Knjige:

- [1] Blahovec, J.; Kutilek, M.(2002): Fizičke metode u agrokulturi: Pristup preciznosti i kvaliteti, Prag, Češka.
- [2] Roje-Bonacci, T. (2007): Mehanika tla, treće izdanje, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split.
- [3] Roje-Bonacci, T. (2005): Potporne građevine i građevne jame, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split.
- [4] Sarač, Dž. (1998): Mehanika tla, drugo izdanje, Građevinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo.

Časopisi:

- [5] Kovačević, M. S., Jurić-Kaućinič, D.: Europska klasifikacija tla za inženjerske potrebe, Građevinar 9/2014., str 801-810.
- [6] Sadeghi, K., Abdullah Sofy, S., Hawez Baiz, Z: Primjena čeličnih žmurja u obalnim konstrukcijama i marinama, Azijske novine za prirodne i primijenjene znanosti, str. 10-17.
- [7] Aniskin, A, Orešković, M., Kozina, G(2017): Utjecaj orijentacije čestica na bočni tlak u omeđenim paralelnim stjenkama, Tehnički vjesnik 4(2017), str. 1249-1253.

Radovi na konferenciji:

- [8] Khouri, M. (2005): Usporedba raznih metoda korištenih u analizi silosa bez trenja uza stjenke, Odjel za građevinu, Libanonsko sveučilište, Libanon.

Doktorski, magistarski i diplomski radovi:

- [9] Aniskin, A. (2017): Bočni tlak zrnate anizotropne sredine na blisko postavljene stjenke s obzirom na tehnološke faktore, Doktorski rad, Državna akademija za građevinu i arhitekturu, Odessa.
- [10] Khademian, S: Upotreba kružnih koferdama za trajnu uporabu pri uporabi hidroenergije, Diplomski rad, Građevinsko i okolišno inženjerstvo, Colorado.

Internet izvori:

- [11] [http://www.fazos.unios.hr/upload/documents/OBsK\\_07%20Osnovne%20znacajke%20tla.pdf](http://www.fazos.unios.hr/upload/documents/OBsK_07%20Osnovne%20znacajke%20tla.pdf)
- [12] <https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A2195/datastream/PDF/view>
- [13] <https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/3673515/>
- [14] <https://www.deepexcavation.com/en/Cofferdam-cellular-cofferdams>

## Popis slika

Slika 2.1: Betonski silos (Izvor: <a href="https://www.wolfsystem.hr/nas-odjeli-proizvoda/betonski-spremnici/silos-za-poljoprivredne-svrhe/silos-za-zito">https://www.wolfsystem.hr/nas-odjeli-proizvoda/betonski-spremnici/silos-za-poljoprivredne-svrhe/silos-za-zito</a> ).....	4
Slika 2.2: Čelični silos (Izvor: <a href="http://ba.fdsp-cn.com/wheat-silo-with-competitive-price">http://ba.fdsp-cn.com/wheat-silo-with-competitive-price</a> ).....	5
Slika 2.3: Silos od valovitih čeličnih ploča (Izvor: <a href="http://docplayer.com.br/77620988-Silos-spirale-i-puzevi.html">http://docplayer.com.br/77620988-Silos-spirale-i-puzevi.html</a> ).....	5
Slika 2.4: Vodoravni silos omeđen zidovima sa dvije strane (Izvor: <a href="http://www.aurora-invest.hr/ponuda/fattori/otvoreni-horizontalni-silos">http://www.aurora-invest.hr/ponuda/fattori/otvoreni-horizontalni-silos</a> ).....	6
Slika 2.5: Žmurje štiti obalu od djelovanja erozije (Izvor: <a href="https://www.ivorking.co.uk/">https://www.ivorking.co.uk/</a> ).....	7
Slika 2.6: Betonsko žmurje (Izvor: <a href="https://twitter.com/EquipCorp/status/1161348852600967169/photo/2">https://twitter.com/EquipCorp/status/1161348852600967169/photo/2</a> ).....	7
Slika 2.7: U- žmurje (lijevo), Z- žmurje (desno)(Izvor: Grabe, 2008).....	8
Slika 2.8: Izvođenje kružnih ćelija koferdam u vodi (Izvor: <a href="https://constructalia.arcelormittal.com/files/AMCRPS_AS%20500%20Design%20&amp;%20Execution%20Manual--c0afb0837a3e3cb855d7b79331824f86.pdf">https://constructalia.arcelormittal.com/files/AMCRPS_AS%20500%20Design%20&amp;%20Execution%20Manual--c0afb0837a3e3cb855d7b79331824f86.pdf</a> ) .....	9
Slika 2.9: Poduporeni koferdam (Izvor: <a href="https://www.google.com/search?q=braced+cofferdam&amp;sxsrf=ALeKk02v8qu5DVJ7RepL_ASUQekkLRNcLg:1602016834970&amp;source=lnms&amp;tbm=isch&amp;sa=X&amp;ved=2ahUKEwjqhP3i6aDsAhW7kcMKHRq8CSsQ_AUoAXoECAsQAw&amp;biw=798&amp;bih=730#imgrc=WBwENRLYTkEBsM">https://www.google.com/search?q=braced+cofferdam&amp;sxsrf=ALeKk02v8qu5DVJ7RepL_ASUQekkLRNcLg:1602016834970&amp;source=lnms&amp;tbm=isch&amp;sa=X&amp;ved=2ahUKEwjqhP3i6aDsAhW7kcMKHRq8CSsQ_AUoAXoECAsQAw&amp;biw=798&amp;bih=730#imgrc=WBwENRLYTkEBsM</a> ).....	10
Slika 2.10: Stanični koferdam (Izvor: <a href="https://www.pilebuck.com/marine/cellular-cofferdams-vital-marine-construction/">https://www.pilebuck.com/marine/cellular-cofferdams-vital-marine-construction/</a> ).....	10
Slika 2.11: Dvozidni koferdam (Izvor: <a href="https://www.google.com/search?q=Double-walled+sheet+pile+cofferdams:&amp;sxsrf=ALeKk02Vy9hDIYGgh0iQHEsLu2lloa1SUA:1602017175167&amp;source=lnms&amp;tbm=isch&amp;sa=X&amp;ved=2ahUKEwi0_JiF66DsAhVNpYsKHbb5D0QQ_AUoAXoECAsQAw&amp;biw=798&amp;bih=730#imgrc=3Dte8I2DYJNu2M&amp;imgdii=abjwJk8-bmO5wM">https://www.google.com/search?q=Double-walled+sheet+pile+cofferdams:&amp;sxsrf=ALeKk02Vy9hDIYGgh0iQHEsLu2lloa1SUA:1602017175167&amp;source=lnms&amp;tbm=isch&amp;sa=X&amp;ved=2ahUKEwi0_JiF66DsAhVNpYsKHbb5D0QQ_AUoAXoECAsQAw&amp;biw=798&amp;bih=730#imgrc=3Dte8I2DYJNu2M&amp;imgdii=abjwJk8-bmO5wM</a> ).....	11
Slika 3.1: a) kutni profili; b) kutni profil učvršćen za eksperimentalni model.....	17
Slika 3.2: Opći pogled na eksperimentalni model: a) pogled sprijeda; b) pogled straga; c) pogled odozgo.....	18
Slika 3.3: Ugradnja modela pod kutom.....	18
Slika 3.4: Tenziometarska konzolna ćelija.....	19
Slika 3.5: a) razmak između pomičnog cilindra i fiksne stjenke; b) polietilenska membrana na tenziometarskoj ćeliji.....	20

Slika 3.6: Priključna shema spajanja tenziometarske ćelije na konektor: a) shema spajanja Wheatstoneovog mosta na priključak; b) opći prikaz konektora; c) priključni krug.....	21
Slika 3.7: Kutija od metalnog pocinčanog lima.....	22
Slika 3.8: Resetiranje očitavanja senzora u softveru „Catman®Easy“.....	23
Slika 3.9: Umjeravanje tenziometarskih konzolnih ćelija: a) pojačalo QuantumX MX840A; b) utezi korišteni u kalibraciji; c) uteg prilikom kalibracije na tenziometarskoj ćeliji; d) senzori povezani na računalo preko pojačala.....	24
Slika 3.10: a) Natakanje vode u model ispod razine 1m; b) Natakanje vode laboratorijskom čašom do razine 1m; c) pražnjenje modela pumpom .....	25
Slika 3.11: Stabilizacija mjerenja i očitavanje rezultata.....	25
Slika 3.12: Grafički rezultati mjerenja hidrostatskih tlakova.....	26
Slika 3.13: Laboratorijska čaša volumena 250ml.....	27
Slika 3.14: Mjerenje visine pijeska u čaši.....	28
Slika 3.15: a) Dolijevanje vode u pijesak; b) pijesak zasićen vodom; c) vaganje težine pijeska zasićenog vodom.....	29
Slika 3.16: Prikaz granulacije pijeska.....	31
Slika 3.17: Prosijavanje pijeska.....	32
Slika 3.18: Dimenzija najvećeg zrna na situ od 2 mm.....	33
Slika 3.19: Granulometrijski dijagram dobiven prosijavanjem u laboratoriju.....	33
Slika 3.20: USCS klasifikacija tla prema ASTM D 2487.....	34
Slika 3.21: a) Vaga marke EBalance; b) pogreška vage s obzirom na mjerenu kilažu.....	35
Slika 3.22: a) Stavljanje pijeska lopaticom u metalnu kutiju; b) Zasipavanje pijeska u eksperimentalni model; c) Prikaz zasipavanja pijeska u model slikano odozgo.....	36
Slika 3.23: Mjerenje bočnog tlaka pod kutom 0° u softveru "Catman © Easy"; a) Prikaz dijagrama i izmjerenih vrijednosti prvog mjerenja; b) prikaz izmjerenih vrijednosti drugog mjerenja; c) prikaz izmjerenih vrijednosti trećeg mjerenja.....	37
Slika 3.24: Dijagram izmjerenih podataka modela pod kutom 0°.....	38
Slika 3.25: Model postavljen pod kut 45° s obzirom na horizontalu.....	39
Slika 3.26: Limena ploča kao nadogradnja našem modelu.....	40
Slika 3.27: a) Početak zasipavanja u model pod kutom 45°; b) Zasipavanje pijeska u model; c) Položaj pijeska u modelu; d) Pijesak u eksperimentalnom modelu nakon vraćanja u početni položaj.....	40
Slika 3.28: Mjerenje bočnog tlaka pod kutom 45° u softveru "Catman © Easy"; a) ) Prikaz dijagrama i izmjerenih vrijednosti prvog mjerenja; b) prikaz izmjerenih vrijednosti drugog mjerenja; c) prikaz izmjerenih vrijednosti trećeg mjerenja.....	41

Slika 3.29: Dijagram izmjerenih podataka modela pod kutom $45^\circ$ .....	42
Slika 4.1: Dijagram usporedbe srednjih izmjerenih vrijednosti i Janssen-ove teorije.....	43
Slika 4.2: Odstupanje srednje izmjerenih vrijednosti od Janssen-ove teorije.....	44
Slika 4.3: Razlika odstupanja između srednjih vrijednosti ispitivanja .....	44



**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Juraj Trupković (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Juraj Trupković

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Juraj Trupković neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom Mjerenje normalnih opterećenja pijeska na paralelne stjenke u različitim uvjetima zasipavanja čiji sam autor.

Student:

Juraj Trupković

(vlastoručni potpis)