

Istraživanje utjecaja značajki simuliranih oborina na razvoj pornih pritisaka i vlažnosti u fizičkom modelu kosine

Kocijančić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:157:051250>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Luka Kocijančić

**Istraživanje utjecaja značajki simuliranih oborina na razvoj
pornih pritisaka i vlažnosti u fizičkom modelu kosine**

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni prijediplomski studij
Mehanika tla i stijena**

**Luka Kocijančić
JMBAG: 0114035491**

**Istraživanje utjecaja značajki simuliranih oborina na razvoj
pornih pritisaka i vlažnosti u fizičkom modelu kosine**

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradio 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.

Luka Kocijančić

U Rijeci, 1. rujna 2024.

IZJAVA O PRIPADNOSTI ZNANSTVENOM PROJEKTU

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta **Hidraulička karakterizacija tla korištenjem fizičkih i numeričkih modela kosina (HCPNM)** (voditelj dr.sc. Josip Peranić) koji se realizira uz potporu Sveučilišta u Rijeci (uniri-iskusni-tehnic-23-240) 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, 28. kolovoza 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Josipu Peraniću na pomoći i volji pri izradi završnog rada. Zahvaljujem se svojim prijateljima, kolegama i obitelji što su bili uz mene tijekom studiranja.

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je provedba pokusa na fizičkom modelu kosine s ciljem saznanja kako različite značajke simulirane oborine utječu na njegov hidraulički odziv. Fizički model kosine, izgrađen je u geotehničkom laboratoriju građevinskog fakulteta u Rijeci, izložen je različitim uvjetima simulirane oborine, a njegov se hidraulički odziv prati pomoću ugrađenih senzora. U ovom završnom radu definirati će se osnovna svojstva tla i varijable koje su relevantne za temu. Dati će se osnovni prikaz tehnika mjerenja i specifikacije mjerne opreme korištene u pokusima. Biti će prikazane i objašnjene značajke korištenog fizičkog modela kosine, simulatora oborina i simulirane kiše, te će se detaljno prikazati položaj i karakteristike mjernih profila. Na kraju završnog rada biti će prikazani i interpretirani rezultati provedenih pokusa.

Ključne riječi: tlo, fizički model kosine, infiltracija oborine, vlažnost tla, porni pritisak, matrična sukcijska

ABSTRACT

The topic of this paper is the implementation of experiments on a physical slope model with the aim of studying how different features of the simulated rainfall affect its hydraulic response. The physical slope model, built in the geotechnical laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, is exposed to different conditions of simulated rainfall, and its hydraulic response is monitored using built-in sensors. In this paper, basic soil properties and variables relevant to the topic will be defined. A basic description of the measurement techniques and specifications of the measuring equipment used in the experiments will be given. The features of the used physical slope model, rainfall simulator and simulated rain will be presented and explained, and the location and characteristics of the measuring profiles will be presented in detail. At the end of this paper, the results of the conducted experiments will be presented and interpreted.

Key words: soil, physical slope model, rainfall infiltration, soil moisture, pore pressure, matric suction

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PODRIJETLO I KLASIFIKACIJA TALA.....	2
2.1. Mehanički faktori rastrožbe	2
2.2. Kemijski faktori rastrožbe.....	4
2.3. Faktori transporta	5
2.4. Faktori sedimentacije.....	6
2.5. Klasifikacija tla.....	7
2.6. Jedinstvena klasifikacija.....	9
3. OSNOVNA SVOJSTVA TLA I FAZNI ODNOSI.....	11
3.1. Trofazni model tla	12
3.1.1. Gravimetrijska vlažnost tla.....	13
3.1.2. Volumetrijska vlažnost tla	14
3.1.3. Koeficijent pora.....	15
3.1.4. Relativni porozitet	15
3.1.5. Stupanj zasićenosti tla	16
3.2. Porni pritisak.....	17
3.2.1. Pozitivni porni pritisak - ispod razine podzemne vode	17
3.2.2. Negativni porni pritisak - iznad freatske linije razine podzemne vode ...	20
3.3. Karakteristične gustoće i zapreminske težine tla	22
4. SENZORI ZA MJERENJE VLAŽNOSTI TLA I PORNIH PRITISAKA U TLU	24
4.1. TEROS 10 senzor vlažnosti tla	26
4.1.1. Kalibracija	29
4.2. TEROS 12 senzor vlažnosti, električne vodljivosti i temperature tla	31
4.2.1. Kalibracija	37
4.3. TEROS 31 mini tenziometar	39

5. FIZIČKI MODEL KOSINE	46
5.1. Značajke fizičkog modela.....	46
5.2. Značajke simulatora oborina.....	49
5.2.1. Mlaznice i nosači horizontalnih grana	50
5.2.2. Kontrolni blok za mjerenje i kontrolu značajki simulirane oborine	52
5.2.3. PEHD cijevi i spojevi.....	53
5.3. Značajke simulirane oborine.....	54
5.3.1. Uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine	55
5.3.2. Pokus 1	56
5.3.3. Pokus 2	58
5.3.4. Pokus 3	59
5.4. Mjerni profili.....	60
6. REZULTATI POKUSA.....	62
6.1. Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine.....	62
6.2. Rezultati 1. pokusa	65
6.3. Rezultati 2. pokusa	67
6.4. Rezultati 3. pokusa	69
6.5. Interpretacija rezultata pokusa.....	71
7. ZAKLJUČCI I DISKUSIJA	74
8. LITERATURA.....	76

POPIS SLIKA

Slika 1: Deformacija geoloških naslaga zbog djelovanja tektonskih sila [1]	3
Slika 2: Dijagram za klasifikaciju tla prema US Bureau of Soils [1]	8
Slika 3: Tipične granulometrijske krivulje po grupama AC - klasifikacije [1]	10
Slika 4: Trofazni dijagram tla [3].....	12
Slika 5: Arteški uvjeti [4]	18
Slika 6: Porni pritisak vode u glini [4].....	19
Slika 7: Poddrenirani uvjeti [4].....	19
Slika 8: Porni pritisak vode u glini [4].....	20
Slika 9: Analiza površinske napetosti za matričnu sukciju pri ulasku zraka [4] ...	21
Slika 10: Porni pritisak vode u sitnozrnastom tlu iznad freatske linije razine podzemne vode [4].....	22
Slika 11: 3,5 - mm stereo konektor [5]	24
Slika 12: Senzor TEROS 10 [5]	24
Slika 13: Senzor TEROS 12 [5]	24
Slika 14: Senzor TEROS 31 [5]	25
Slika 15: Komponente senzora TEROS 10 [6]	28
Slika 16: Volumen utjecaja senzora TEROS 10 [6]	28
Slika 17: Komponente senzora TEROS 12 [7]	33
Slika 18: Volumen utjecaja senzora TEROS 12 [7]	33
Slika 19: Komponente senzora TEROS 31 [8]	41
Slika 20: Očitavanja tenziometra s napetostima do -1000 kPa [8].....	43
Slika 21: Očitavanja tenziometra s napetostima do -400 kPa [8]	44
Slika 22: Očitavanja tenziometra uz odgodu pojave kavitacije [8].....	45
Slika 23: Položaj referentne točke za mjerenje vodnog potencijala [8].....	45
Slika 24: Detalj podnožja kosine [fotografirao autor].....	48
Slika 25: Fizički model kosine s nagibom od 35° izrađen od uniformno graduiranog sitnog pijeska iznad sloja šljunka debljine 5 cm za poboljšanje drenažnih svojstava tijekom ispitivanja [fotografirao autor].....	48

Slika 26: Shematski prikaz sustava za simuliranje oborina [5]	49
Slika 27: Protoci koje generiraju mlaznice pri različitim tlakovima u sustavu [izradio autor]	50
Slika 28: Aksijalne mlaznice punog stošca (Lechler GmbH) serije 460 (lijevo) i 490 (desno) [5]	51
Slika 29: Elementi simulatora oborina: nosač mlaznica s ventilima, spojeni na horizontalnu granu simulatora [fotografirao autor].....	51
Slika 30: Primjer kontrolnog bloka [5]	52
Slika 31: Detalji spojeva i elemenata, koji se koriste za spajanje PEHD cijevi simulatora oborina [5].....	54
Slika 32: Stvarne značajke oborine za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine [izradio autor]	56
Slika 33: Stvarne i idealizirane značajke oborine u pokusu 1 [izradio autor].....	57
Slika 34: Stvarne značajke oborine u pokusu 2 [izradio autor]	58
Slika 35: Stvarne i idealizirane značajke oborine u pokusu 3 [izradio autor].....	60
Slika 36: Detalj instalacije senzora vlažnosti tla TEROS 10 i mini-tenziometra TEROS 31 na promatranoj točki I1-6 [9].....	61
Slika 37: Geometrija fizičkog modela kosine i shematski prikaz položaja mjernih profila [izradio autor].....	61
Slika 38: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 6 cm [izradio autor].....	62
Slika 39: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 12 cm [izradio autor]	63
Slika 40: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 18 cm [izradio autor]	63
Slika 41: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 24 cm [izradio autor]	64
Slika 42: Rezultati 1. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]	65
Slika 43: Rezultati 1. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor].....	65
Slika 44: Rezultati 1. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor].....	66
Slika 45: Rezultati 1. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor].....	66

Slika 46: Rezultati 2. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]	67
Slika 47: Rezultati 2. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor].....	67
Slika 48: Rezultati 2. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor].....	68
Slika 49: Rezultati 2. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor].....	68
Slika 50: Rezultati 3. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]	69
Slika 51: Rezultati 3. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor].....	69
Slika 52: Rezultati 3. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor].....	70
Slika 53: Rezultati 3. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor].....	70

POPIS TABLICA

Tablica 1: Mjerne specifikacije senzora TEROS 10 [6]	26
Tablica 2: Fizičke značajke senzora TEROS 10 [6]	27
Tablica 3: Mjerne specifikacije senzora TEROS 12 [7]	31
Tablica 4: Fizičke značajke senzora TEROS 12 [7]	32
Tablica 5: Mjerne specifikacije senzora TEROS 31 [8]	39
Tablica 6: Fizičke značajke senzora TEROS 31 [8]	40
Tablica 7: Osnovne značajke tla [5]	47
Tablica 8: Protoci koje generiraju mlaznice pri različitim tlakovima u sustavu [5]	50
Tablica 9: Osnovni podaci o pokusu za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine [izradio autor]	55
Tablica 10: Osnovni podaci o pokusu 1 [izradio autor]	56
Tablica 11: Osnovni podaci o pokusu 2 [izradio autor]	58
Tablica 12: Osnovni podaci o pokusu 3 [izradio autor]	59

1. UVOD

Klizišta predstavljaju značajan problem u geotehnici jer mogu imati katastrofalne posljedice za infrastrukturu i na ljudske živote. Pokretanje klizišta može biti uzrokovano različitim pojavama i procesima, kao što su potresi, otapanje snijega, vulkanske erupcije ili ljudska aktivnost. Infiltracija oborina, posebno onih ekstremnih u smislu visokog intenziteta i/ili dugog trajanja, najčešći je uzročnik pokretanja klizišta. Intenzivna oborina može utjecati na stabilnost klizišta tako što smanjuje matričnu sukciju tla iznad razine podzemne vode ili uzrokuje porast razine podzemne vode i povećanje pritiska vode u porama.

Proučavanje utjecaja oborina na hidraulički odziv fizičkih modela kosina bitno je za razumijevanje i predviđanje stabilnosti kosina, što je od velike važnosti u geotehnici. Fizički modeli kosina omogućuju simuliranje prirodnih pojava, pružajući podatke o uvjetima infiltracije kiše u tlo, razvoju pornih pritisaka i vlažnosti, kao i uvid u mehanizme koji dovode do nastanka i kasnijeg razvoja klizišta u modelima. U tu svrhu, u geotehničkom laboratoriju izgrađen je fizički model kosine i opremljen sensorima za mjerenje vlažnosti i pornih pritisaka u tlu. Model je izložen različitim značajkama simulirane kiše kako bi se dobili podaci o hidrauličkom odzivu materijala u modelu na definiranim točkama.

Cilj provedenih pokusa bio je analizirati podatke prikupljene tijekom pokusa kako bi se proučio utjecaj različitih značajki oborina na uvjete vlažnosti i porne pritiske u modelu. Rezultati pokusa otkriti će koji tip oborine najnepovoljnije utječe na stabilnost kosine. Posebna pozornost posvećena je mjerenju volumetrijskog sadržaja vode i pornih pritisaka u tlu, dva bitna parametra koja neposredno utječu na čvrstoću tla, time i na stabilnost kosine. Povećanje vlažnosti tla uslijed infiltracije intenzivnih oborina uzrokuje zasićenje tla i porast pornih pritisaka. Pritisak vode unutar pora tla prenosi se na okolne čestice tla i time utječe na iznos efektivnih naprežanja u tlu. Visoki porni pritisci uslijed infiltracije djeluju destabilizirajuće, odnosno smanjuju efektivno naprežanje u tlu, time i posmičnu čvrstoću tla, te potencijalno uzrokuju nastanak klizišta.

2. PODRIJETLO I KLASIFIKACIJA TALA

Današnji oblik i sastav površine tla rezultat je procesa formiranja našeg planeta u razdoblju od oko četiri milijarde godina. Za to se vrijeme mijenjao Zemljin oblik, sastav njezine atmosfere, raspored i osobine vode - od pare do leda. Mijenjali su se postepeno i u raznim kataklizmama napreznja, temperatura i vlaga u kori. Posljedica je takvih dugotrajnih i sporih procesa postepena promjena sastava i svojstava materijala na samoj Zemljinoj površini, što nas u mehanici tla najviše zanimaju. Najnovije spoznaje stečene ispitivanjem Mjesečeve površine, pridonijele su da se bolje razumiju procesi koji su se zbivali na našem planetu i njihove posljedice za osobine materijala na Zemljinoj površini. Današnji je sastav tla rezultat zbroja neprestanih promjena prilika, učinaka erozije vode i vjetra, rastrošivanja i raznih drugih činilaca, procesa i utjecaja.

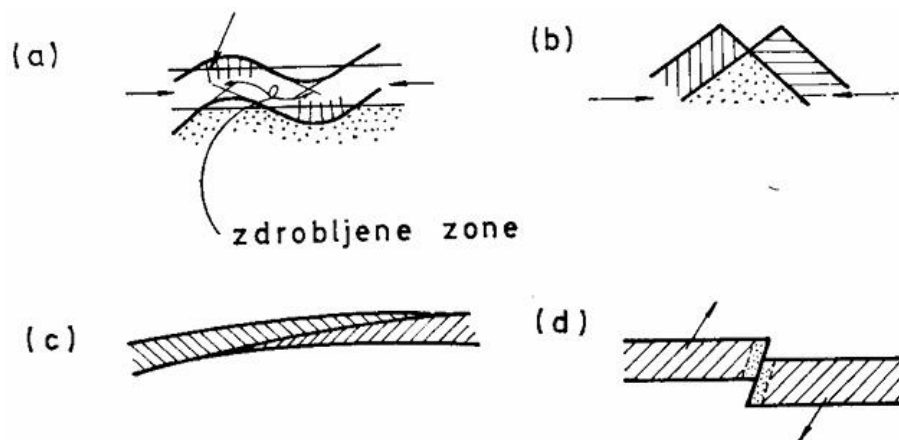
U toku cijelog vremena od postanka Zemlje djeluju na materijal u njezinoj kori faktori koji izazivaju:

- rastrožbu i dezintegraciju prvobitnih stijena
- transport nastalih proizvoda
- sedimentaciju transportiranih čestica

Posebno su tu još i stanja napreznja što razaraju ili formiraju čvrste stijene u Zemljinoj kori. Ti su procesi vrlo spori, ali su njihovi efekti zato ipak značajniji [1].

2.1. Mehanički faktori rastrožbe

Stezanje i rastezanje čvrste Zemljine kore pod utjecajem dugoročnih sezonskih i dnevnih promjena temperature i promjene gravitacijskih sila nastalih rotacijom Zemlje, Mjeseca i drugih nebeskih tijela uzrokuju promjene napreznja u Zemljinoj kori, te fluktuaciju njezine površine i kontinenata. **Tektonske sile**, izazvane tim činocima, u raznim razdobljima i na različitim mjestima deformiraju čvrste stijene, kako je to prikazano na slici 1.



Slika 1: Deformacija geoloških naslaga zbog djelovanja tektonskih sila:
 a) boranje naznačenim zonama u kojima nastaje kidanje, usitnjavanje i smicanje u sloju; b) prijelom sloja pri naglom djelovanju bočnog tlaka;
 c) navlačenje; d) rasjedanje s razlomljenom zonom [1]

Te deformacije nastaju u određenim uvjetima - plastičnim preoblikovanjem stijene ili se stvaraju pukotine na mjestima gdje se ona rasteže. Ondje gdje se stijena zbija, one su zatvorene.

Na rubovima navlaka i rasjeda stijena se mrvi u sitnije čestice. To sve priprema tlo za agresivni nastup drugih čimbenika koji utječu na daljnje usitnjavanje i dezintegraciju prvobitno monolitnih kamenih masiva. Temperaturne promjene stalno djeluju pri smjeni dana i noći, godišnjih doba i dugoročnih klimatskih promjena. Zbog toga se mijenja volumen kamenih masiva, a kad je to onemogućeno, nastaju unutarnja naprezanja koja stvaraju sitne ili veće pukotine. Različiti koeficijent rastezanja mineralnih sastojaka u kamenim masivima uzrokuje unutarnja naprezanja, osobito na granicama većih kristala, a time i sitne pukotine i postepenu dezintegraciju masiva (npr. raspadanje granita).

Led je također snažan čimbenik u razaranju stijena pošto su na njihovoj površini nastale makar i sitne pukotine. Volumen leda je 11% veći od volumena vode, pa njezino smrzavanje u pukotinama stijena izaziva znatne unutarnje sile, koje dalje proširuju i produbljuju pukotine i pridonose daljnjem ubrzanom razaranju stijene.

Abrazija dalje usitnjava i troši stijene. Raspadnute čestice bivaju zahvaćene snagom tekuće vode ili vjetra. One stružući i udarajući o površinu čvrstih stijena odlamaju od njih druge čestice. Na oko su to neznatni učinci, ali njihovo akumulirano djelovanje u toku vrlo dugog vremenskog razdoblja obradi ogromne količine materijala. Ledenjaci svojim sporim kretanjem, uz veliki pritisak na podlogu, također znatno pridonose abraziji.

Vegetacija je još jedan faktor koji ubrzava razaranje stijena. Tu su u prvom redu sile nastale rastom korijenja biljaka i stabala u postojećim manjim pukotinama. Tako se mogu postepeno odlamati i veliki blokovi stijena [1].

2.2. Kemijski faktori rastrožbe

Svi minerali stijena nisu inertni na okolne utjecaje. Svugdje u prirodi ima vode i vodene pare, kisika i ugljične kiseline, sadržanih u zraku i u oborinama, te raznih drugih organskih kiselina nastalih razvojem i raspadanjem vegetacije. Ma kako malen bio afinitet između tih agensa i stijena i bilo kako da su spori kemijski procesi što pri tome nastaju, oni u toku dugih geoloških razdoblja vrlo snažno djeluju.

Oksidacija nastaje djelovanjem kisika i ozona iz zraka, naročito na stijene koje sadrže željezne spojeve.

Karbonizacija je učinak ugljične kiseline otopljene u vodi, koja otapa soli i minerale što sadrže željezo (Fe), kalcij (Ca), magnezij (Mg), natrij (Na) i kalij (K). U našim je krajevima to osobito izraženo u područjima građenima od vapnenca (CaCO_3), koji se zbog djelovanja kišnice i njoj sadržane ugljične kiseline postepeno otapa. Otapanjem se šire već postojeće tektonske pukotine, slojne plohe i drugi defekti u stijenama, formiraju se kanali i kaverne, a površina dobiva karakteristične oštre oblike. Tako nastaje reljef općenito nazvan krš. Granitne stijene se pod utjecajem ugljične kiseline postepeno raspadaju. Ona razara feldspat i pretvara ga u kaolinit.

Hidratacija nastaje kada se voda u procesu raspadanja kemijski veže. Obično nastupa kombinirano s karbonizacijom.

Desilikacija je otapanje i ispiranje silicijevog dioksida (SiO_2) iz stijena u toku dugotrajnih i sporih većinom hidrotermalnih procesa.

Otapanje u vodi pridružuje se opisanim utjecajima. Više su tome podložne soli natrija i magnezija (sol i gips). Otope li se te soli u većim količinama, mogu nastati daljnja urušavanja i dezintegracija okolnih stijena. Magmatske, primarne stijene jače su izložene kemijskim utjecajima nego sedimentne stijene, koje su već nastale kao rezultat rastrožbe i ponovne cementacije (pješčari i sl.). Međutim, i sedimentne stijene koje sadrže kalcij i željezo malo su otporne na kemijske uzročnike [1].

2.3. Faktori transporta

Pridružuju se čimbenicima rastrožbe i djeluju prenoseći proizvode primarne rastrožbe.

Glavni transportni faktori su:

- gravitacija
- voda
- vjetar
- led

Gravitacija pomiče fragmente stijena različite veličine s višega na niži potencijalni nivo. Može to biti slobodan pad, kotrljanje odlomljenih čestica niz kosine ili klizanje velikih masa niz padine.

Voda se u obliku padalina slijeva u potoke, bujice i rijeke, koje svojom energijom mogu pomicati i prenositi čestice različite veličine, već prema količini i brzini vode - blokove, valutice, pijesak ili sasvim sitne suspendirane čestice.

U procesu transporta djeluje i abrazija jer se sve te čestice u toku kretanja sukobljavaju, sudaraju i taru pa se drobe i usitnjavaju kao u mokrom mlinu. Tekuća je voda najjači čimbenik usitnjavanja i prijenosa sedimentnih taložina.

Vjetar u nekim krajevima i u određeno vrijeme može puhati velikom snagom pretežno u jednom smjeru. Ako je takvo strujanje zraka kombinirano i sa suhom klimom ili suhim klimatskim razdobljem, onda zračna struja, slično kao i voda, može pokretati velike količine sitnijih čvrstih čestica. Zračne mase nekad te čestice dižu u velike visine i raznose ih na velike udaljenosti. Veličina čestice zavisi od snage strujanja, a na mjestu taloženja su one gotovo sve jednake, pa nastaje jednozrnasti sediment, kakav je poznati kopneni les.

Ledenjaci u svom polaganom kretanju prema dolini zahvaćaju stijene i u svom koritu ih usitnjavaju. Tako nakupljen materijal prenosi se do kraja ledenjaka, gdje se led otapa pa se tu taloži u naslage, tzv. morene. One sadrže čestice od najkrupnijih blokova do koloida [1].

2.4. Faktori sedimentacije

Posljednja su stepenica u procesu pretvorbe čvrstih stijena u nevezane sedimente. Na mjestu gdje transportne sile postaju previše male za dalji prijenos materijala ili one sasvim oslabljuju, čestice se talože. Prema tome koliki su rad obavili faktori rastrožbe do mjesta gdje prestaje djelovati transport, nastaju sedimenti od krupnijih ili sitnijih čestica. Bujice u svojem toku mogu prenositi i pokretati velike blokove skupa sa šljunkom i pijeskom. Na nekim mjestima takvi se materijali talože, pa nastaju sedimenti od vrlo krupnih do znatno sitnih čestica. Rijeke prenose u gornjem toku krupan šljunak, u srednjem je on sitan, a u donjem toku većinom nose samo pijesak. Na raznim mjestima, u proširenim dolinama uzduž toka taloži se, već prema položaju, krupni ili sitni materijal, pa odatle ponekad velike naslage krupnog šljunka, sitnog šljunka ili pijeska. Najsitniji materijal odlaže se na ušćima rijeka u mora i jezera, gdje prestaju djelovati sile transporta.

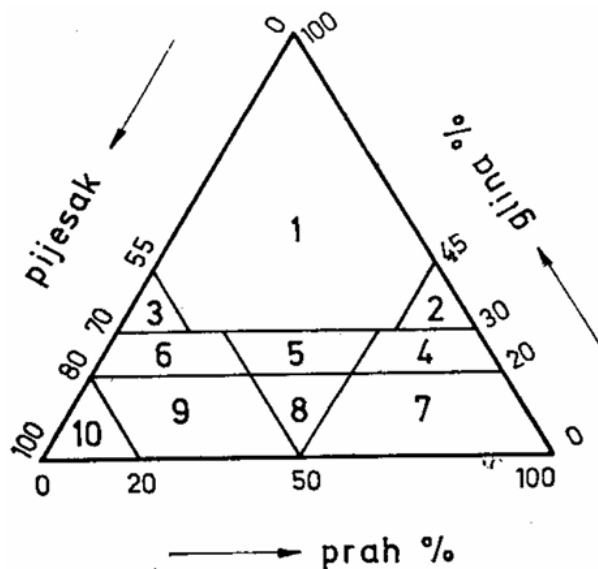
Osobine taložnog materijala mnogo ovise o vrstama matičnih stijena od kojih su nastali sedimenti, zatim o uvjetima u kojima je taloženje nastalo i konačno o utjecajima kojima je takav sediment bio podvrgnut od vremena postanka od tad. Naknadno erodirane naslage tla ili naslage leda debljine od više stotina metara mogle su za vrijeme glacijacija povremeno opterećivati i zbijati sedimente. Nakon što su poslije ta opterećenja ponovno oslabila (erozija, topljenje ledenjaka), sedimenti ostaju zbijeni, za razliku od onih što nisu bili podvrgnuti takvim utjecajima pa su rahli.

Na osnovi raznih utjecaja krug rastrožbe se može zatvoriti, pa nevezani sedimenti podliježu ponovnoj petrifikaciji zbog jakog pritiska i raznih kemijskih procesa što izazivaju cementaciju nevezanih sedimenata. Prema sastojcima na koje utječu ti procesi nastaju razni konglomerati, breče, pješčari, škriljavci, lapori itd. Faktori rastrožbe, transporta i sedimentacije stalno djeluju i materija stijena neprekidno se mjenja. Pri tome mogu biti najraznovrsniji utjecaji na najrazličitije početne sirovine, pa će stoga i biti jasno zašto se sedimenti mogu međusobom toliko razlikovati i zašto je vrlo teško predvidjeti i proučavati njihove osobine [1].

2.5. Klasifikacija tla

Neki se stariji klasifikacijski sistemi temelje samo na granulometrijskom sastavu. Oni nisu prikladni za inženjersku praksu jer karakteristične osobine tla ne ovise samo o veličini zrna i njihovom rasporedu u materijalu. Granulometrijski sastav samo je jedan od osobina tla i njime se ne mogu izraziti utjecaji oblika zrna i njihova mineraloškog sastava, strukture, poroziteta, te koloidnih osobina sitnih čestica itd. na obilježja tla. Neki klasifikacijski sistemi prikazuju sadržaj raznih frakcija pomoću trokutnog dijagrama. Prema „US Bureau of Soils“ dijeli se na tlo sastavljeno od čestica sitnijih od 2 mm u deset grupa, kako je prikazano na slici 2. Očito je prema onome što je prije rečeno da npr. razni materijali uvršteni u grupu 4 mogu imati sasvim različite osobine s obzirom nato kakve minerale sadrži glinovita frakcija. Ladanji (1952.) je predložio sličan, bolje diferenciran klasifikacijski sistem baziran na granulometrijskom sastavu, ali ga je povukao jer je u nasptihvaćen sistem jedinstvene klasifikacije.

Za potrebe mehanike tla u građevinarstvu najpogodnija je jedinstvena klasifikacija, poznata kao AC - klasifikacija. Razradio ju je Arthur Casagrande za potrebe zrakoplovstva. Poslije je ona dopunjena i međunarodno prihvaćena jer je vrlo prikladna pa se u današnje vrijeme gotovo općenito upotrebljava [1].



Slika 2: Dijagram za klasifikaciju tla prema US Bureau of Soils: (1) glina; (2) prašinsta glina; (3) pjeskovita glina; (4) prašinsto glinovita ilovača; (5) glinovita ilovača; (6) pjeskovito glinovita ilovača; (7) prašinsta ilovača; (8) ilovača; (9) pjeskovita ilovača; (10) pijesak [1]

2.6. Jedinствena klasifikacija

Sve se vrste tla svrstavaju u dvije glavne skupine:

- krupnozrnasto, nekoherentno tlo
- sitnozrnasto, koherentno tlo

Uz to se razlikuje i pet osnovnih grupa:

- | | | | | |
|----------------|--------------|---------------|--------|---|
| • Šljunak | promjer zrna | 2-60 mm | Simbol | G |
| • Pijesak | promjer zrna | 0,06-2 mm | Simbol | S |
| • Prah | promjer zrna | 0,002-0,06 mm | Simbol | M |
| • Glina | promjer zrna | <0,002 mm | Simbol | C |
| • Organsko tlo | promjer zrna | / | Simbol | O |

Osim toga još je tu i treset, sa simbolom Pt.

Tlo u prirodi je redovno smjesa dviju ili više osnovnih grupa. Šljunak i pijesak, oznak G i S, dijele se dalje na šest podgrupa, što označavamo dodajući drugo slovo osnovnom simbolu:

- | | |
|--|----|
| • Dobro graduirano - široko granulometrijsko područje | W |
| • Dobro graduirano s dovoljno glinovita veziva da veže krupna zrna | C |
| • Slabo graduirano - nedostaje neka grupa zrna, malo sitnih frakcija | P |
| • Slabo graduirano - s mnogo prašinastih čestica | Fs |
| • Slabo graduirano s mnogo glinovitih čestica | Fc |
| • Jednolično graduirano - jednozrnasto, malo sitnih čestica | U |

Prema tome razlikujemo kod šljunka i pijeska ove grupe:

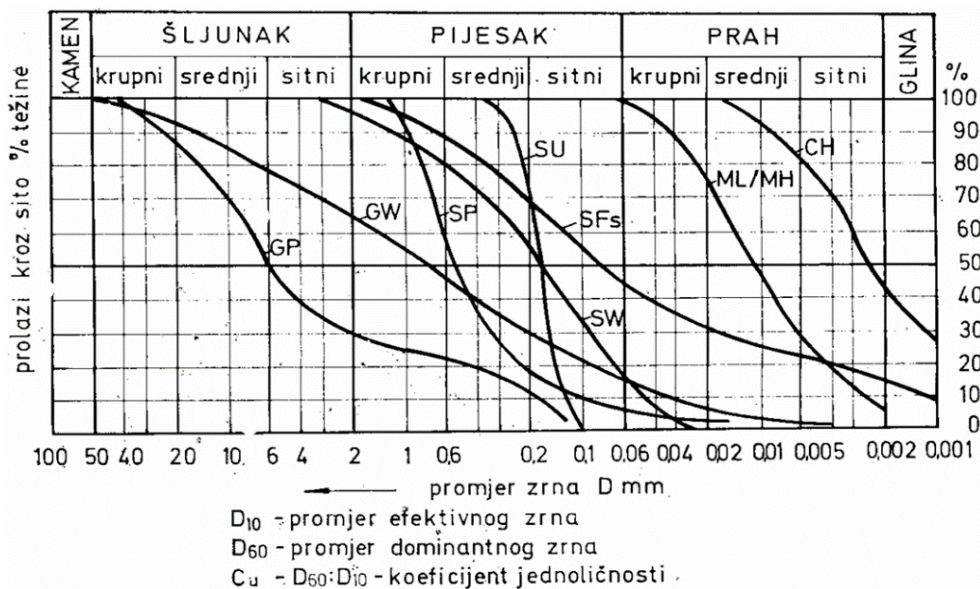
- | | |
|--|-------|
| • Dobro graduiran šljunak ili pijesak, nevezan | GW SW |
| • Pjeskovit šljunak ili pijesak s glinovitim vezivom | GC SC |
| • Slabo graduiran šljunak ili pijesak, čist, nedostaje neka grupa zrna | GP SP |
| • Jednoličan šljunak ili pijesak uskog granulometrijskog područja | GU SU |

- pjeskovit šljunak ili pijesak s previše praha, stabilnost krupnih zrna smanjena GFs SFs
- pjeskovit šljunak ili pijesak s previše glinovita veziva, stabilnost krupnih zrna povećana GFc SFc

Od tih 12 grupa, 10 se može identificirati pogledom prostim okom, a za razlikovanje SFs i SFc potrebni su identifikacijski pokusi koji će biti opisani. Neke karakteristične granulometrijske krivulje za nekoherentne materijale prikazane su na slici 3. Koherentno (sitnozrnasto) tlo oznake M, C i O dijeli se na tri podgrupe prema granici tečenja:

- niskog plasticiteta $w_L < 35\%$ oznaka L
- srednjeg plasticiteta $35\% < w_L < 50\%$ oznaka I
- visokog plasticiteta $w_L > 50\%$ oznaka H

U skupini koherentnih tala razlikujemo tri grupe: prah, glinu i organsko tlo s tri podgrupe - niskog, srednjeg i visokog plasticiteta, koje označavamo simbolima ML, MI, MH, CL, CI, CH, OL, OI i OH. Treset, oznake Pt, nema podgrupe. Prema tome, sitnozrnasto tlo dijeli se u deset grupa i podgrupa [1].



Slika 3: Tipične granulometrijske krivulje po grupama AC - klasifikacije [1]

3. OSNOVNA SVOJSTVA TLA I FAZNI ODNOSI

Tlo je trofazni materijal. Sastoji se od zrna i čestica koje tvore skelet tla i od pora koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. U ovom završnom radu, za pore će se koristiti indeks v (eng. „voids“, šupljine). Tri faze od kojih se tlo sastoji su: zrna, tj. čvrste čestice tla, koje će se označavati indeksom s (eng. „solids“, čvrste tvari), voda s indeksom w (eng. „water“) i zrak s indeksom a (eng. „air“). Svaka od tih triju faza ima svoju gustoću (odnos mase po volumenu te iste tvari), pri čemu se gustoća zraka pri rješavanju praktičnih inženjerskih problema najčešće zanemaruje.

Za definiranje odnosa među fazama tla, predočimo element tla kao da je podijeljen na tri dijela: na volumen ispunjen samo čvrstim česticama, volumen ispunjen samo vodom i volumen ispunjen samo zrakom. Tako jednostavno možemo definirati varijable tla, koje su neophodne za analizu njegova ponašanja. Pod ponašanjem tla najčešće podrazumijevamo odnos između naprezanja i deformacija u tlu. Naprezanje je sila podijeljena s površinom na koju djeluje. Proračun naprezanja u mehanici tla provodi se za prividna prosječna naprezanja u tlu, a ne stvarna naprezanja na kontaktu samih čvrstih čestica, koja su mnogo veća od prosječnih.

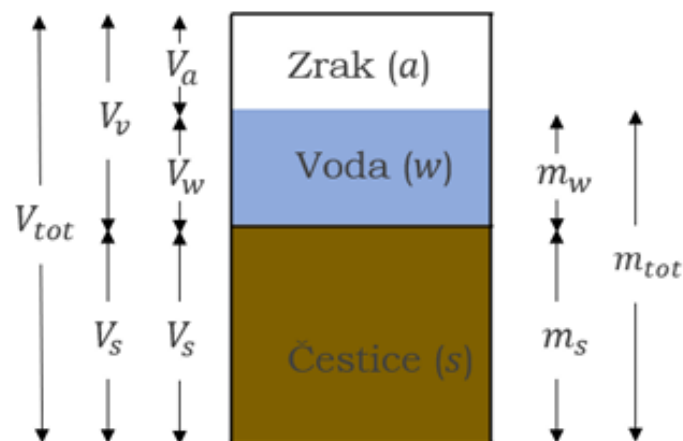
U mehanici tla pretpostavljamo da su čvrste čestice i voda nestišljivi. To znači da, uslijed djelovanja vanjskog opterećenja, neće doći do promjene volumena čvrstih čestica tla ni vode. Deformacije se u potpunosti realiziraju u porama tla, tako što se smanjuje njihov volumen (pozitivna deformacija). Pri tome čestice popunjavaju određeni dio volumena pora te zauzimaju novi ravnotežni položaj. Ako su pore u tlu potpuno ispunjene vodom, nužno je da voda isteče iz tla prije nego li se može smanjiti volumen pora. Brzina istjecanja vode iz tla ovisi o svojstvu tla koje se zove koeficijent propusnosti [2].

3.1. Trofazni model tla

Realnu heterogenu sredinu prirodnog tla vrlo je teško obuhvatiti modelima proračuna, te se stoga uvodi tzv. trofazni model tla koji je prikazan na slici 4. Ukupni volumen tla u takvom idealiziranom modelu može se podijeliti na volumen kojeg zauzimaju samo čestice različite krupnoće i međuprostor između njih, tj. pore. Pore u tlu mogu biti ispunjene vodom ili zrakom.

U trofaznom dijagramu tla, V_a označava volumen zraka u porama, V_w volumen vode u porama, a V_s volumen čvrstih čestica u tlu. m_w označava masu vode, a m_s masu čvrstih čestica u tlu. Masu zraka (m_a) se zanemaruje. Volumen pora (V_v) zbroj je volumena zraka u porama (V_a) i volumena vode u porama (V_w). Volumen pora (V_v) i volumen čvrstih čestica (V_s) čine ukupan volumen tla (V_{tot}). Masa vode (m_w) i masa čvrstih čestica (m_s) čine ukupnu masu tla (m_{tot}).

Iz odnosa volumena faza može se definirati tri svojstva tla: koeficijent pora e , relativni porozitet n i stupanj zasićenosti tla S [2].



Slika 4: Trofazni dijagram tla [3]

3.1.1. Gravimetrijska vlažnost tla

Vlažnost tla je jedno od osnovnih svojstava tla koje se utvrđuje u laboratoriju za svaki uzorak tla, budući da voda ima značajan utjecaj na mehaničko ponašanje tla. Vlažnost tla u gravimetrijskim (masenim) odnosima označava se simbolom w i definira se kao odnos mase vode (m_w) i mase čvrstih čestica (m_s) u uzorku tla, prema izrazu (1):

$$w = \frac{m_w}{m_s} (\%) \quad (1)$$

Budući da su brojnik i nazivnik u izrazu međusobno nezavisne veličine, vrijednost vlažnosti može premašiti 100 %. Pogodnost ovog svojstva očituje se u jednostavnosti njegovog određivanja. Uzorak vlažnog tla naprosto se izvaže, odredi se masa m , zatim se osuši u peći na 105 °C u trajanju od 24 sata, pa se ponovo izvaže da bi se dobila masa suhog uzorka m_d (indeks d , eng. „dry“), koja je jednaka masi čvrstih čestica m_s u uzorku. Kako je razlika mase vlažnog i mase suhog uzorka tla jednaka masi vode u uzorku, $m_w = m - m_s$, izračun vlažnosti slijedi iz izraza (1). Vlažnost se izražava u postocima.

Za dobivanje prirodne vlažnosti tla, tj. one koju je tlo imalo in-situ (na terenu), prije vađenja uzorka, izvađeni je uzorak potrebno posebno zaštititi kako ne bi izgubio vodu isparavanjem, a u laboratoriju ga prije ispitivanja treba čuvati u vlažnoj komori. Kao što će naknadno biti prikazano, vrijednosti vlažnosti tla određene pod posebno definiranim uvjetima vrlo su značajne karakteristike toga tla. Zato je određivanje vlažnosti jedan od osnovnih pokusa u geotehničkim laboratorijima [2].

3.1.2. Volumetrijska vlažnost tla

Volumetrijski sadržaj vode u tlu (*eng. Volumetric water content - VWC*) predstavlja omjer volumena vode i jedinice volumena tla. Volumetrijski sadržaj vode (θ) može se izraziti kao koeficijent ili postotak i definiran je izrazom (2) [3]:

$$\theta = \frac{V_w}{V_{tot}} \quad (\%) \quad (2)$$

Ukupni volumen tla (V_{tot}) definiran je izrazom (3):

$$V_{tot} = V_s + V_w + V_a \quad (m^3) \quad (3)$$

gdje je:

θ - volumetrijski sadržaj vode [/]

V_{tot} - ukupni volumen tla [m^3]

V_s - volumen čestica [m^3]

V_w - volumen vode [m^3]

V_a - volumen zraka [m^3]

3.1.3. Koeficijent pora

Koeficijent pora (e) definiran je izrazom (4):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (/) \quad (4)$$

Koeficijent pora bezdimenzionalna je veličina. U izrazu (4) V_s se ne mijenja, bez obzira na procese kroz koje tlo prolazi. Mijenja se samo volumen pora V_v , pa ova promjena volumena pora ujedno čini i promjenu ukupnog volumena tla V . Ako volumen čvrstih čestica svedemo na jedinični, dakle $V_s = 1\text{m}^3$, onda je volumen pora jednak koeficijentu pora, odnosno $e = V_v$, kao što je prikazano na slici 4. Često se za jedinični volumen čvrstih čestica, definira specifični volumen $v = 1 + e$, koji odgovara ukupnom volumenu V za jedinični volumen čvrstih čestica [2].

3.1.4. Relativni porozitet

Relativni porozitet ili samo porozitet (n), definiran je izrazom (5):

$$n = \frac{V_v}{V_{tot}} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Budući da je u izrazu (5), brojnik sastavni dio nazivnika, relativni porozitet je manji od 100 %. Jednostavnim proračunom dođe se do veze između koeficijenta pora i relativnog poroziteta:

$$n = \frac{V_v}{V_{tot}} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1 + e} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

odnosno:

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (7)$$

gdje se n izražava kao decimalni broj a ne kao postotak [2].

3.1.5. Stupanj zasićenosti tla

Stupanj zasićenosti tla (S) definiran je izrazom (8):

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \text{ (\%)} \quad (8)$$

Stupanj zasićenosti tla pokazuje koliki je postotak pora ispunjen vodom. Ako je $S = 0 \%$, tlo je suho. Ako je $S = 100 \%$, pore u tlu su u potpunosti ispunjene vodom, pa kažemo da je tlo potpuno zasićeno ili potpuno saturirano. Ako je $0 \% < S < 100 \%$, pore su ispunjene vodom i zrakom u određenom omjeru, pa za tlo kažemo da je djelomično zasićeno ili parcijalno saturirano.

Nijedno od definiranih svojstava tla iz faznih odnosa volumena, koeficijent pora, relativni porozitet ni stupanj zasićenosti tla, ne određuju se izravno laboratorijskim pokusima, već neizravno pomoću drugih svojstava [2].

3.2. Porni pritisak

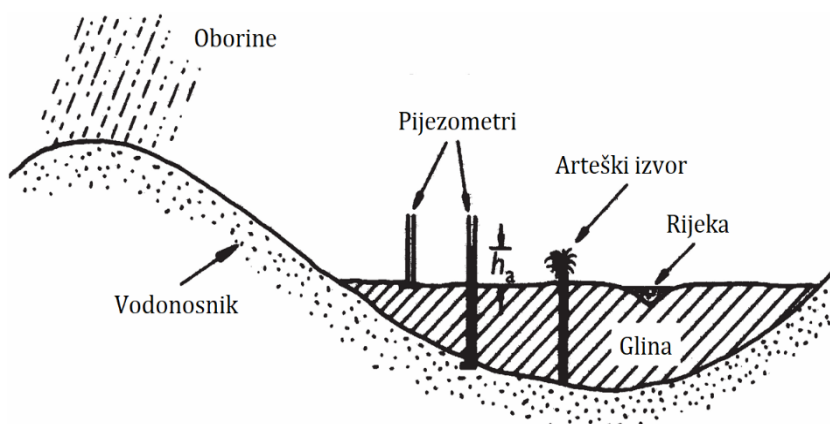
Potpuno zasićeno tlo je dvofazni materijal, koji se sastoji od čestica tla i vode u porama. Utjecaj porne vode na ponašanje tla i geotehničkih konstrukcija ne smije se zanemariti. Efektivno naprezanje u tlu ovisi o ukupnom naprezanju u tlu i o pritisku vode u porama. Efektivno stanje naprezanja određuje udaljenost od anvelope sloma tla. Porni pritisci vode često predstavljaju značajan udio ukupnog opterećenja koje potporni zidovi i podzemne strukture, poput tunela i podruma, moraju moći izdržati. Prisutnost podzemne vode u tlu predstavlja izvor većine problema u geotehničkom inženjerstvu. Uvjeti podzemne vode često su pogrešno shvaćeni ili se razlikuju od onih predviđenih na temelju rezultata istražnih radova s lokacije. Zanemarivanje i neuzimanje u obzir potencijalno katastrofalnih učinaka nekontrolirane podzemne vode tijekom iskapanja također ima značajnu ulogu [4].

3.2.1. Pozitivni porni pritisak - ispod razine podzemne vode

Ako je podzemna voda stacionarna, tlak vode u porama biti će hidrostatski ispod razine na kojoj je tlak vode u porama nula, a to je na freatskoj liniji razine podzemne vode. Porni pritisci vode nisu uvijek hidrostatski. Slika 5 prikazuje staru riječnu dolinu u kojoj je vodonosnik prekriven glinenim tlom. Vodonosnik se proteže izvan rubova gline, u okolna brda. U dolini, porni pritisci vode u vodonosniku mogu biti relativno visoki, jer porna voda može relativno lako teći kroz vodonosnik s visokih brda, dok nepropusna glina djeluje kao brtveni sloj.

Pritisak vode u porama na određenoj točki unutar tla može se izmjeriti pomoću jednostavnog uređaja poznatog kao pijezometar. Pijezometar je cijev malog promjera (obično oko 20-25 mm) s poroznim keramičkim vrhom. Nakon ugradnje, razina vode u pijezometru raste sve dok pritisak na dnu stupca vode u uspravnoj cijevi ne bude jednak kao pritisak vode u porama u tlu neposredno izvan vrha. Zbog volumena vode koji mora teći u uspravnu cijev prije nego što se postigne ravnoteža tlaka, vrijeme odziva uređaja se povećava kako se propusnost tla smanjuje. Stoga, pijezometar nije prikladan za mjerenje

brzo promjenjivih tlakova vode u porama u tlu niske propusnosti, za što se mora koristiti druga vrsta pijezometra [4].

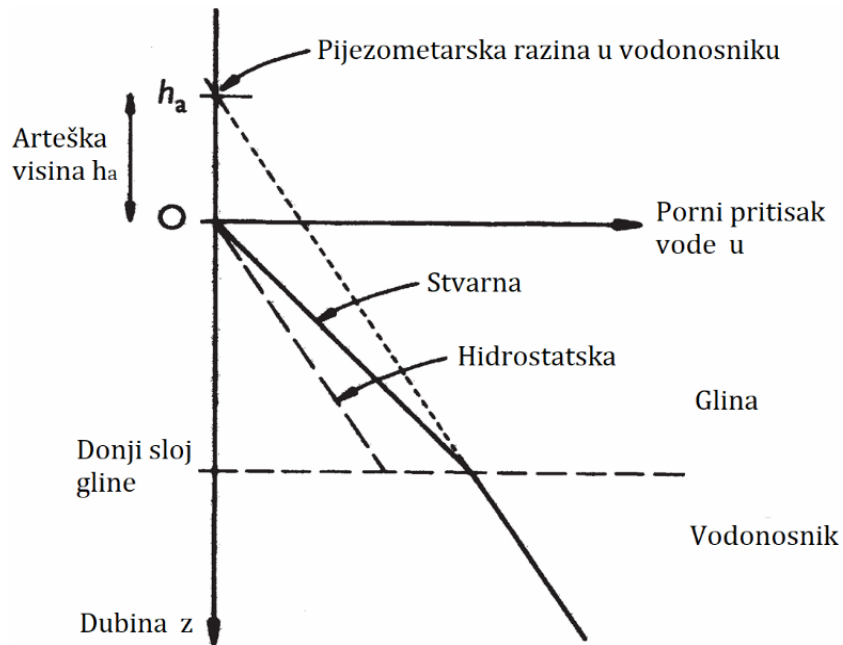


Slika 5: Arteški uvjeti [4]

Pijezometar probijen kroz glinu može pokazati razinu podzemne vode u vodonosniku koji je iznad površine tla u dolini. Ako cijev nije dovoljno visoka, ona će se prelići, donoseći vodu iz vodonosnika na površinu. Ovi uvjeti, u kojima visina pritiska vode u porama u zakopanom ili ograničenom vodonosniku raste do razine iznad površine tla, opisuju se kao arteški uvjeti. Bušotina izbušena kroz gornji sloj gline do vodonosnika u svrhu opskrbe vodom poznata je kao arteški bunar.

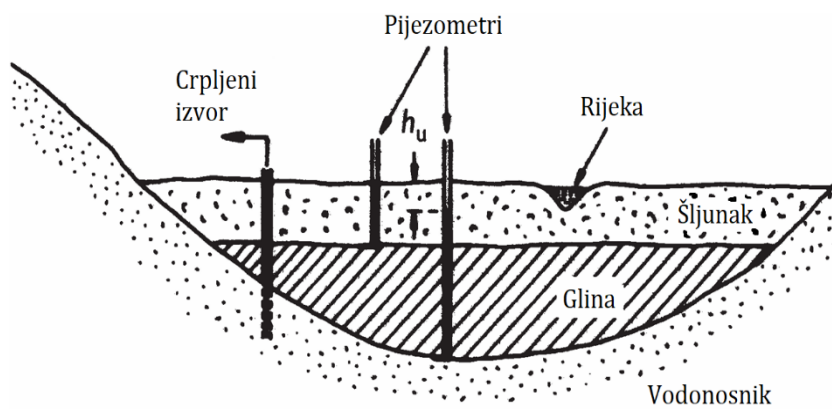
U arteškim uvjetima, pritisak vode u porama unutar sloja gline postepeno raste s dubinom. U podnožju glinenog sloja, porni pritisak vode je isti kao i na vrhu vodonosnika (slika 6). Podzemna voda teče prema gore kroz glinu, ali ne brže nego što može ispariti s površine gline. Porni pritisci vode u vodonosniku mogu biti hidrostatski, ispod freatske linije razine podzemne vode ili pijezometrijske razine, prikazane pijezometrom.

Slika 6 pokazuje da je brzina povećanja pritiska porne vode s dubinom u arteškim uvjetima (unutar gline) veća od hidrostatske. Ako se napravi iskop u glini, može se doseći dubina na kojoj težina preostale gline nije dovoljna da zadrži pritisak vode u vodonosniku, a dno iskopa će propasti [4].



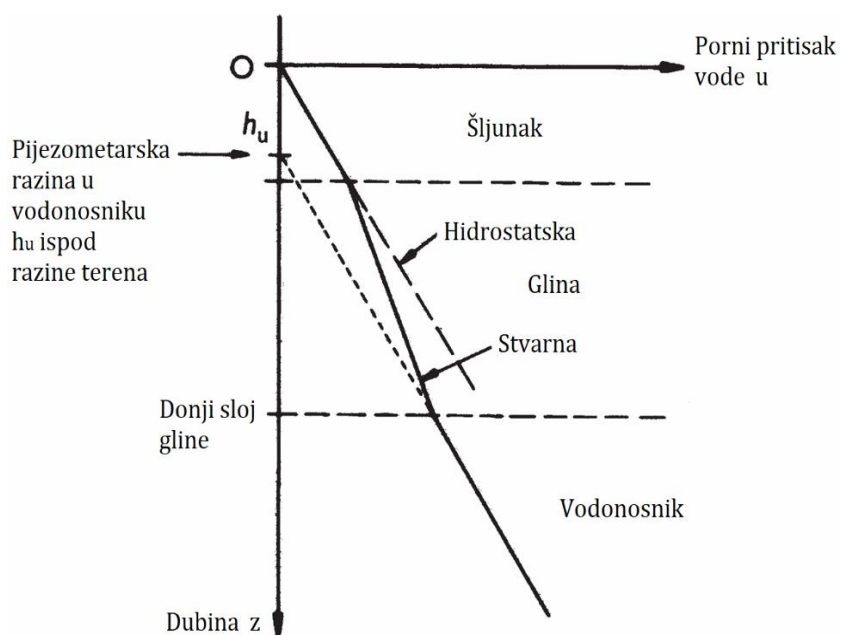
Slika 6: Porni pritisak vode u glini [4]

Slika 7 prikazuje sloj gline ispod kojeg se nalazi porozni vodonosnik, ali u ovom slučaju na vrhu je sloj šljunka. Razina podzemne vode u šljunku održava se na površini tla prihranom iz rijeke. Porni pritisci vode u vodonosniku koji se nalazi ispod izvorno su bili arteški, ali nakon mnogo godina pumpanja za potrebe vodoopskrbe, razina podzemne vode u vodonosniku sada je znatno ispod one u šljunku iznad njega [4].



Slika 7: Poddrenirani uvjeti [4]

Stoga postoji spor, ali stabilan tok vode prema dolje kroz glinu od šljunka do temeljnog vodonosnika. Povećanje pritiska vode u porama s dubinom unutar gline je manje od hidrostatskog, kao što je prikazano na slici 8. U ovim uvjetima, glina se opisuje kao nedovoljno drenirana [4].

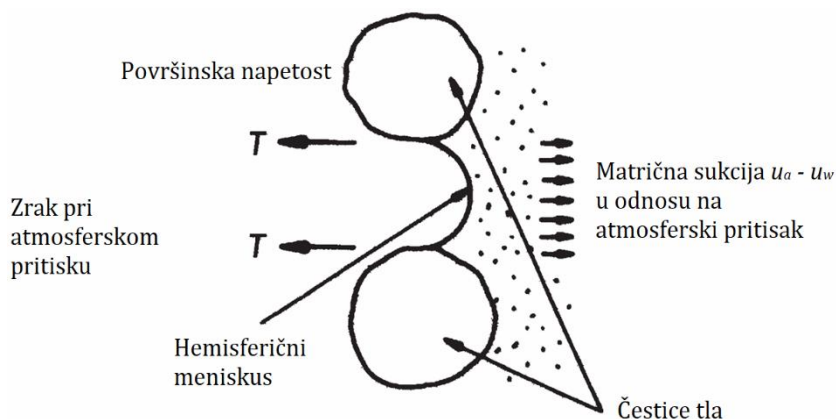


Slika 8: Porni pritisak vode u glini [4]

3.2.2. Negativni porni pritisak - iznad freatske linije razine podzemne vode

Pritisak vode u porama može biti negativan, u tom će slučaju efektivno naprezanje biti veće od ukupnog naprezanja. Međutim, postoji ograničenje negativnog pornog pritiska vode koje tlo može podnijeti bez da u njega uđe zrak (pri atmosferskom ili nultom tlaku) kroz bilo koju površinu koja je izložena atmosferi. Ovaj ograničavajući negativni pritisak vode u porama poznat je kao „ulazna vrijednost zraka“. Povećavat će se kako se veličina pora u tlu smanjuje. To se može pokazati analizom prikazanoj na slici 9.

Matrična sukcijska $u_a - u_w$ (tj. negativni pritisak vode u porama izmjeren u odnosu na atmosferski pritisak okoline) pri ulazu zraka može se procijeniti razmatranjem ravnoteže hemisferičnog vodenog meniskusa u pori oblika kruga promjera d [4].



Slika 9: Analiza površinske napetosti za matričnu sukciju pri ulasku zraka [4]

Sila površinske napetosti jednaka je razlici u pritisku na rubu meniskusa između porne vode i zraka. Matrična sukcijska ($u_a - u_w$) definirana je izrazom (9):

$$u_a - u_w = \frac{4 \times T}{d} \text{ (kPa)} \quad (9)$$

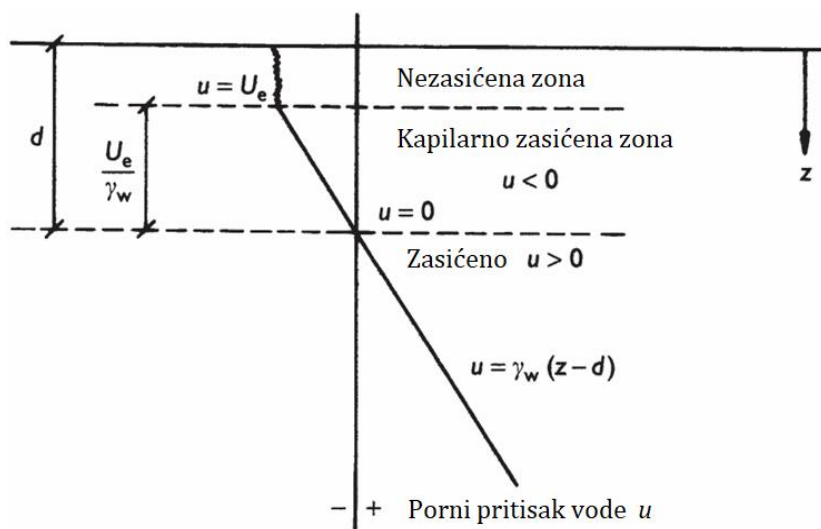
gdje je:

T - površinska napetost sučelja voda/zrak ($= 7 \times 10^{-5} \text{ kN/m}$ pri 10°C)

d - promjer hemisferičnog vodenog meniskusa u kružnoj pori

Općenito se pretpostavlja da je efektivna veličina pora stvarnog tla negdje između D_{10} i $0,2 \times D_{10}$ (gdje je D_{10} veličina čestice). Može se pokazati (zamjenom odgovarajućih vrijednosti D_{10} ili $0,2 \times D_{10}$ u izrazu (9)) da je usis vode iz pora na ulazu zraka za krupni pijesak s $D_{10} = 1 \text{ mm}$ u rasponu od 0,28 do 1,4 kPa, dok da je za glinu s $D_{10} = 0,001 \text{ mm}$ 1000 puta veći. Posljedica toga je da će krupnozrnasta tla iznad freatske razine podzemne vode, na kojima je pritisak vode u porama jednak nuli, biti nezasićena, s vrlo malo vode zadržane u porama kapilarnim djelovanjem [4].

Sitnozrnasta tla (tj. prah i glina) mogu ostati zasićena nekoliko metara iznad freatske linije razine podzemne vode, pri čemu se pritisak vode u porama nastavlja smanjivati sve dok se ne postigne ulazna vrijednost zraka (slika 10). Ako podzemna voda miruje, stopa smanjenja pritiska porne vode s visinom iznad razine podzemne vode bit će približno hidrostatska (tj. $9,81 \text{ kPa/m}$). U stvarnosti, tečenje kroz kapilarno zasićenu i nezasićenu zonu može se odvijati infiltracijom oborine (prema dolje) i isparavanjem (prema gore). Voda se također gubi iz tla transpiracijom iz biljaka [4].



Slika 10: Porni pritisak vode u sitnozrnastom tlu iznad freatske linije razine podzemne vode [4]

3.3. Karakteristične gustoće i zapreminske težine tla

Ovisno o porozitetu, gustoći čvrstih čestica od kojih se sastoji tlo i količini vode u tlu, razlikujemo sljedeće karakteristične gustoće tla [3]:

- gustoća suhog tla: $\rho_d = (1 - n) \times \rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)},$ (10)

- gustoća vlažnog tla: $\rho = (1 - n) \times \rho_s + n \times S \times \rho_w \text{ (kg/m}^3\text{)},$ (11)

- gustoća zasićenog tla: $\rho_{sat} = (1 - n) \times \rho_s + n \times \rho_w \text{ (kg/m}^3\text{)},$ (12)

gdje je:

n - relativni porozitet [%]

S - stupanj zasićenosti tla [%]

ρ_w - gustoća vode [kg/m^3]

ρ_s - gustoća čvrstih čestica [uobičajeni raspon od 2600 do 2800 kg/m^3]

Vrlo slično, mogu se definirati karakteristične zapreminske težine tla [3]:

- zapreminska težina suhog tla: $\gamma_d = (1 - n) \times \gamma_s$ (kN/m^3), (13)

- zapreminska težina vlažnog tla: $\gamma = (1 - n) \times \gamma_s + n \times S \times \gamma_w$ (kN/m^3), (14)

- zapreminska težina zasićenog tla: $\gamma_{sat} = (1 - n) \times \gamma_s + n \times \gamma_w$ (kN/m^3), (15)

gdje je:

n - relativni porozitet [%]

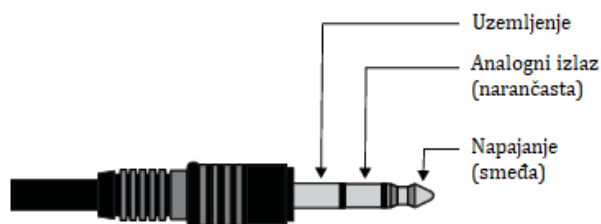
S - stupanj zasićenosti tla [%]

γ_w - zapreminska težina vode [kN/m^3]

γ_s - zapreminska težina čvrstih čestica [kN/m^3]

4. SENZORI ZA MJERENJE VLAŽNOSTI TLA I PORNIH PRITISAKA U TLU

Senzori za mjerenje vlažnosti tla TEROS 10 i TEROS 12 (METER Group, Inc.) dizajnirani su za ugradnju u porozne materijale, poput tla. U laboratorijskim uvjetima senzori su prikladni za ugradnju i mjerenja u sitnozrnastim i krupnozrnastim tlima. Imaju standardnu dužinu kabela od 5 m i dolaze s 3,5-mm stereo konektorom (slika 11) kako bi se olakšala veza s ZL6 Data Loggerima (METER Group, Inc.).



Slika 11: 3,5 - mm stereo konektor [5]

Oba senzora imaju veliku preciznost i široki raspon mjerenja koji pokriva različite vrste tala, od pijesaka do glina. Tvornička kalibracijska krivulja se po potrebi može modificirati za mjerenja u specifičnim vrstama tla. Osnovna prednost senzora TEROS 10 (slika 12) prilikom primjene u laboratorijskim uvjetima su manje fizičke dimenzije i manji utjecajni mjerni volumeni, dok robusniji senzor TEROS 12 (slika 13) osim volumetrijske vlažnosti tla pruža informaciju i o električnoj provodljivosti i temperaturi tla [5].



Slika 12: Senzor TEROS 10 [5]



Slika 13: Senzor TEROS 12 [5]

Senzor TEROS 31 (METER Group, Inc.) mjeri potencijal vode i temperaturu vode u tlu. Osnovna prednost TEROS 31 mini-tenziometara (slika 14) je u vrlo malenim dimenzijama, zbog čega su iznimno pogodni za korištenje u laboratorijskim uvjetima. Senzor omogućuje mjerenje pozitivnog i negativnog pritiska u rasponu od +50 do -85 kPa, odnosno do pojave heterogene kavitacije, uz mjerenje temperature u rasponu od -30°C do +60°C. S obzirom na minijaturne dimenzije, uređaji reagiraju vrlo brzo na promjene pritiska vode u tlu. Uz uređaje su dostupne i stanice za kondicioniranje i pripremu senzora te ekstenzijski kabeli duljine 5 m. Senzor ima standardnu dužinu kabela od 1.5 m i 3.5-mm stereo konektor za spajanje na data logger. Uređaji su kompatibilni s ZL6 Data Loggerima (METER Group, Inc.) [5].



Slika 14: Senzor TEROS 31 [5]

4.1. TEROS 10 senzor vlažnosti tla

Mjerne specifikacije senzora TEROS 10 prikazane su u tablici 1.

Tablica 1: Mjerne specifikacije senzora TEROS 10 [6]

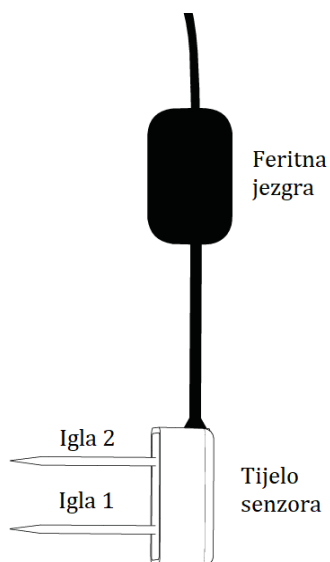
Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon vrijednosti	
Kalibracija u mineralnom tlu	0.00 - 0.64 m ³ /m ³
Kalibracija u medijima bez tla	0.0 - 0.7 m ³ /m ³
Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a)	1 (zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: VWC raspon ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će prilagoditi potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0.001 m ³ /m ³
Preciznost	
Kalibracija u mineralnom tlu	± 0.03 m ³ /m ³ tipično u mineralnim tlima koja imaju rješenje EC < 8 dS/m
Kalibracija u medijima bez tla	± 0.05 m ³ /m ³ tipično u medijima koji imaju rješenje EC < 8 dS/m
Srednje specifično kalibriranje	± 0.01 - 0.02 m ³ /m ³ u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a)	1-40 (raspon u tlu), ± 1 ϵ_a (bezdimenzionalno) 40-80, 15% mjerenja
Frekvencija dielektričnog mjerenja	
70 MHz	

Fizičke značajke senzora TEROS 10 prikazane su u tablici 2.

Tablica 2: Fizičke značajke senzora TEROS 10 [6]

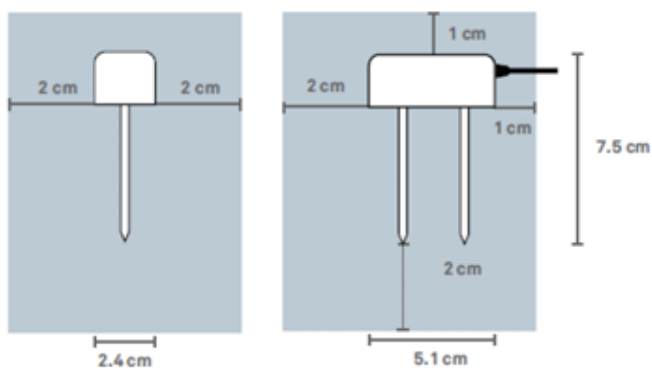
Dimenzije	
Duljina	5.1 cm
Širina	2.4 cm
Visina	7.5 cm
Duljina igle	
5.4 cm	
Duljina kabela	
5m (standardno)	
40m (maksimalna prilagođena duljina kabela)	
Promjer kabela	
4.20 ± 0.10 mm s minimalnom utičnicom od 0,76 mm	
Vrste konektora	
Stereo konektor ili ogoljene i pokositrene žice	
Promjer stereo konektora	
3.50 mm	
Mjerač vodiča	
22 AWG/24 AWG odvodna žica	

Senzor TEROS 10 mjeri volumetrijski sadržaj vode u tlu pomoću igli od nehrđajućeg čelika. Feritna jezgra postavljena na kabel senzora TEROS 10, 7.6 cm od glave senzora koristi se za izolaciju senzora od bilo kakvih smetnji u sustavu. Time se ublažava svaki potencijalni šum sustava na izmjerenim podacima senzora. Prema uputama proizvođača, važno je ne pričvršćivati ništa na dio kabela između glave senzora i feritne jezgre prilikom ugradnje, budući da isto može utjecati na rezultate mjerenja [6].



Slika 15: Komponente senzora TEROS 10 [6]

Osjetljivost mjerenja senzora TEROS 10 sadržana je u volumenu od 430 mL koji je prikazan na slici 16 [6].



Slika 16: Volumen utjecaja senzora TEROS 10 [6]

Senzori TEROS 10 koriste elektromagnetsko polje za mjerenje prividne dielektrične permitivnosti (ϵ_a) okolnog medija. Senzori opskrbljuju igle senzora oscilirajućim valom od 70 MHz, koje se pune prema dielektriku materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je dielektriku supstrata i VWC supstrata. Mikroprocesor mjeri vrijeme punjenja i daje neobrađenu vrijednost na temelju vrijednosti ϵ_a . Neobrađena vrijednost se zatim pretvara u VWC pomoću kalibracijske jednadžbe [6].

4.1.1. Kalibracija

Slijede objašnjenja kalibracija u mineralnom tlu, u medijima bez tla i dielektričnih kalibracija za senzor TEROS 10, gdje je θ volumetrijski sadržaj vode (VWC), ϵ_a je dielektrik, a RAW je neobrađeni izlaz senzora, kada se očitava METER data loggerom.

Prema METER testovima, jedna kalibracijska jednadžba općenito će biti dovoljno precizna za širok raspon različitih vrsta tla. Volumetrijski sadržaj vode (θ) dan je izrazom (16):

$$\theta(m^3/m^3) = 1.895 \times 10^{-10} \times RAW^3 - 1.222 \times 10^{-6} \times RAW^2 + 2.855 \times 10^{-3} \times RAW - 2.154 \quad (16)$$

Jednadžba trećeg reda koristi se za kalibraciju u mineralnim tlima jer daje najbolja predviđanja volumetrijskog sadržaja vode u rasponu koji se nalazi u mineralnim tlima, ali ova jednadžba doseže maksimum na približno $0,77 m^3/m^3$ u čistoj vodi prema izrazu (16). Za prikaz podataka na skali od 0,0 do $1,0 m^3/m^3$, volumetrijski sadržaj vode treba modelirati kvadratnom jednadžbom (što bi rezultiralo s $1,0 m^3/m^3$ u vodi). Međutim, proizvođač opreme to ne preporučuje za mineralna tla jer često čini kalibraciju u rasponu koja se nalazi u mineralnom tlu manje točnom [6].

Za veću točnost od $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$, koju podrazumijeva korištenje generičke krivulje predložene od proizvođača opreme, specifična kalibracija za konkretnu vrstu tla trebala bi poboljšati točnost mjerenja na $0,01$ do $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Razlike između kalibracija u medijma s mineralnim tlom i bez tla uzrokovane su velikim volumenom zraka u organskim tlima koji snižava početni dielektrik senzora.

Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a) može se koristiti za određivanje volumetrijskog sadržaja vode (*VWC*). Dielektrična permitivnost također se koristi za izračunavanje elektromagnetske vodljivosti (*EC*) vode u porama. Dielektrična permitivnost dana je izrazom (17) [6].

$$\epsilon = 1.054 \times 10^{-4} \times e^{2.071 \times 10^{-3} \times RAW} \quad (17)$$

4.2. TEROS 12 senzor vlažnosti, električne vodljivosti i temperature tla

Mjerne specifikacije senzora TEROS 12 prikazane su u tablici 3.

Tablica 3: Mjerne specifikacije senzora TEROS 12 [7]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon vrijednosti	
Kalibracija u mineralnom tlu	0.00 - 0.70 m ³ /m ³
Kalibracija u medijima bez tla	0.0 - 1.0 m ³ /m ³
Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a)	1 (zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: VWC raspon ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će prilagoditi potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0.001 m ³ /m ³
Preciznost	
Generično kalibriranje	± 0.03 m ³ /m ³ tipično u mineralnim tlima koja imaju rješenje EC < 8 dS/m
Srednje specifično kalibriranje	± 0.01 - 0.02 m ³ /m ³ u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a)	1-40 (raspon u tlu), ± 1 ϵ_a (bezdimenzionalno) 40-80, 15% mjerenja
Frekvencija dielektričnog mjerenja	
70 MHz	
Temperatura	
Raspon vrijednosti	-40 do 60 °C
Rezolucija	0.1 °C
Preciznost	± 1 °C
Skupna električna vodljivost (EC_b)	
Raspon vrijednosti	0 - 10 dS/m
Rezolucija	0.001 dS/m
Preciznost	$\pm 5\%$ mjerenja
Izlaz	
DDI serijski ili SDI-12 komunikacijski protokol	
Kompatibilnost data loggера	
Svaki sustav za prikupljanje podataka sposoban za napajanje od 4,0 do 15 VDC i serijsku ili SDI-12 komunikaciju	

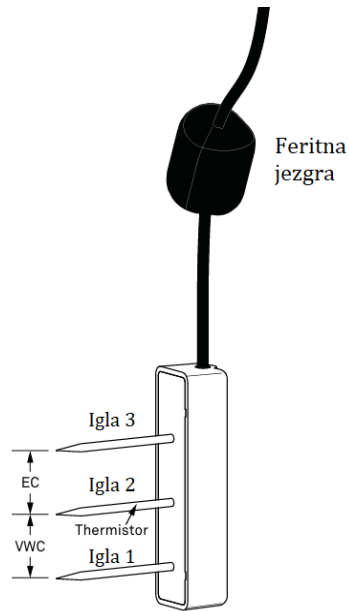
Fizičke značajke senzora TEROS 12 prikazane su u tablici 4.

Tablica 4: Fizičke značajke senzora TEROS 12 [7]

Dimenzije	
Duljina	9.4 cm
Širina	2.4 cm
Visina	7.5 cm
Duljina igle	
5.5 cm	
Duljina kabela	
5 m (standardno)	
75 m (maksimalna prilagođena duljina kabela)	
Vrste konektora	
3.5 mm stereo konektor ili ogoljene i pokositrene žice	

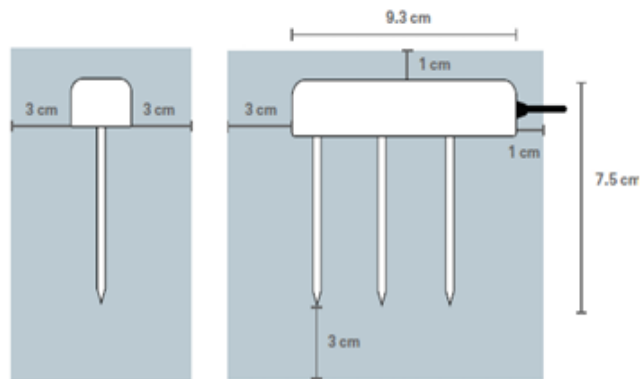
Senzor TEROS 12 mjeri vlažnost tla, električnu provodljivost i temperaturu tla pomoću igala od nehrđajućeg čelika (slika 17). Između igle 1 i igle 2 mjeri se vlažnost tla, dok se električna vodljivost (*EC*) mjeri između igle 2 i igle 3. Temperatura se mjeri ugrađenim termistorom u igli 2. Ovi senzori zahtijevaju malu količinu energije, što ih čini idealnim za trajno ukopavanje u tlo i kontinuirano očitavanje s uređajem za bilježenje podataka ili periodično čitanje s ručnim čitačem.

Slično kao i kod prethodnog senzora, feritna jezgra postavljena na kabel senzora TEROS 12, 7.6 cm od glave senzora koristi se za izolaciju senzora od bilo kakvih smetnji u sustavu. Time se ublažava svaki potencijalni šum sustava na izmjerenim podacima senzora. Prema uputama proizvođača, važno je ne pričvršćivati ništa na dio kabela između glave senzora i feritne jezgre prilikom ugradnje, budući da isto može utjecati na rezultate mjerenja [7].



Slika 17: Komponente senzora TEROS 12 [7]

Osjetljivost mjerenja senzora TEROS 12 sadržana je u volumenu od 1010 *mL* koji je prikazan na slici 18 [7].



Slika 18: Volumen utjecaja senzora TEROS 12 [7]

Senzori TEROS 12 koriste elektromagnetsko polje za mjerenje dielektrične permitivnosti okolnog medija. Senzor daje oscilirajući val od 70 MHz na igle senzora, koje se pune prema dielektriku materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je dielektriku supstrata i VWC supstrata. Mikroprocesor TEROS 12 mjeri vrijeme punjenja i daje neobrađenu vrijednost na temelju dielektrične permitivnosti supstrata. Neobrađena vrijednost se zatim pretvara u VWC pomoću kalibracijske jednadžbe specifičnom za supstrat [7].

TEROS 12 koristi termistor u središnjoj igli za očitavanje temperature. Ovo je važnije za mjerenja blizu površine gdje se promjene temperature brže odvijaju [7].

Električna vodljivost (EC) je sposobnost tvari da provodi elektricitet i može se koristiti za zaključivanje o količini iona koji su prisutni u otopini. Električna vodljivost se mjeri primjenom izmjenične električne struje na dvije elektrode i mjerenjem otpora između njih. Ukupna električna vodljivost se izvodi množenjem obrnutog otpora (vodljivosti) s konstantom ćelije (omjer udaljenosti između elektroda i njihove površine). Mjerenja ukupne električne vodljivosti senzora TEROS 12 normalizirana su na 25 °C. Ukupno mjerenje električne vodljivosti tvornički je kalibrirano da bude točno unutar $\pm 3\%$ mjerenja od 0 do 20 dS/m . Ovaj raspon je prikladan za većinu vrsta tla i supstrata. Električna vodljivost mjerenja iznad 10 dS/m osjetljiva su na kontaminaciju elektroda uljima kože, itd. [7].

Za mnoge primjene, korisno je znati električnu vodljivost otopine sadržane u porama tla (σ_p), što je dobar pokazatelj koncentracije otopljene tvari u tlu. Tradicionalno, σ_p se dobiva izvlačenjem vode iz pora iz tla i izravnim mjerenjem σ_p , što je dugotrajan i radno intenzivan proces. Senzor TEROS 12 mjeri električnu vodljivost rasute zemlje koja okružuje senzore (σ_b). Provedeno je mnogo istraživanja kako bi se utvrdio odnos između σ_b i σ_p . Hilhorst (2000.) je iskoristio prednost linearnog odnosa između dielektrične permitivnosti tla (ϵ_b) i σ_b za točnu pretvorbu σ_b u σ_p ako je ϵ_b poznat. Senzor TEROS 12 mjeri ϵ_b i σ_b gotovo istovremeno u istom volumenu tla, što uređaj čini vrlo prikladnim za ovu metodu mjerenja [7].

Vodljivost vode u porama tla (σ_p) određena je izrazom (18):

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_p \times \sigma_b}{\varepsilon_b - \varepsilon_{ab=0}} \quad (18)$$

gdje je:

σ_p - električna vodljivost porne vode [dS/m]

ε_p - stvarni dio dielektrične permitivnosti vode iz pora tla [∕]

σ_b - ukupna električna vodljivost izmjerena izravno senzorom TEROS 12 [dS/m]

ε_b - stvarni dio dielektrične permitivnosti rasutog tla [∕]

$\varepsilon_{ab=0}$ - stvarni dio dielektrične permitivnosti tla kada je ukupna električna vodljivost jednaka 0 [∕]

Dielektrična permitivnost vode iz pora tla (ε_p) izračunava se iz temperature tla pomoću izraza (19):

$$\varepsilon_p = 80.3 - 0.37 \times (T_{tlo} - 20) \quad (19)$$

gdje je:

T_{tlo} - temperatura tla mjerena senzorom TEROS 12 [°C]

$\varepsilon_{ab=0}$ je pomak koji slobodno predstavlja dielektričnu permitivnost suhog tla. Hilhorst (2000) je preporučio da se $\varepsilon_{ab=0} = 4,1$ koristi kao generički pomak. Hilhorst (2000) nudi jednostavnu metodu za određivanje $\varepsilon_{ab=0}$ za pojedinačne tipove tla, što poboljšava točnost izračuna σ_p u većini slučajeva [7].

Električna vodljivost vode u porama može se izračunati iz ukupne električne vodljivosti korištenjem dielektrične permitivnosti medija mjerene senzorom. Međutim, električna vodljivost porne vode nije isto što i električna vodljivost zasićenog ekstrakta.

Električna vodljivost pora je električna vodljivost vode u porama tla. To se može izravno izmjeriti ako se tlo stisne pod visokim pritiskom kako bi se voda istisnula iz strukture tla i ta se voda skupi i testira na električnu vodljivost.

Električna vodljivost ekstrakta zasićenja je električna vodljivost vode iz pora uklonjene iz zasićene paste. Električna vodljivost ekstrakta zasićenja može se mjeriti izravno ako se koristi destilirana voda za vlaženje tla dok se tlo ne zasiti. Tlo se zatim stavlja na filter papir u vakuumski lijevak i primjenjuje se usis. Mjerenje električne vodljivosti vode ekstrahirane iz zasićenog uzorka dat će električnu vodljivost ekstrakta zasićenja.

Teoretski, električna vodljivost porne vode i električna vodljivost ekstrakta zasićenja povezani su sa stupnjem saturacije tla (volumetrijski sadržaj vode podijeljen s ukupnom poroznošću). Primjer izračuna prikazan je u nastavku [7].

Tlo ima vlažnost (θ) od $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, električnu vodljivost porne vode (σ_p) od $0,7 \text{ dS/m}$ i suhu nasipnu gustoću (ρ_b) od $1,5 \text{ t/m}^3$.

Ukupna poroznost tla može se izračunati pomoću izraza (20):

$$n = \frac{\rho_b}{\rho_s} = 1 - \frac{1,5}{2,65} = 0,43 \quad (20)$$

Električna vodljivost ekstrakta zasićenja može se izračunati pomoću izraza (21):

$$EC = \frac{\sigma_p \times \theta + \sigma_p(n - \theta)}{n} = \frac{0,7 \times (0,7 + 0)}{0,43} = 0,162 \text{ dS/m} \quad (21)$$

gdje je:

n - porozitet tla

ρ_b - nasipna gustoća tla u suhom stanju

ρ_s - gustoća minerala (pretpostavlja se da je $2,65 \text{ t/m}^3$)

σ_d - električna vodljivost destilirane vode (0 dS/m)

θ - volumetrijski sadržaj vode

4.2.1. Kalibracija

Prema rezultatima pokusa proizvođača opreme, jedna kalibracijska jednadžba općenito će biti dovoljna za većinu vrsta mineralnih tala s električnom vodljivošću od 0 dS/m do 8 dS/m zasićenog ekstrakta. Volumetrijski sadržaj vode (θ) je dan izrazom (22):

$$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3) = 3.879 \times 10^{-4} \times RAW - 0.6956 \quad (22)$$

Za kalibraciju mineralnog tla koristi se linearna jednadžba jer daje najbolja predviđanja volumetrijskog sadržaja vode u rasponu koji se nalazi u mineralnim tlima, ali ova jednadžba doseže maksimum na približno $0,70 \text{ m}^3/\text{m}^3$ u čistoj vodi. Za prikaz podataka na skali od $0,0$ do $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^3$, volumetrijski sadržaj vode treba modelirati kvadratnom jednadžbom (što bi rezultiralo s $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^3$ u vodi). Međutim, proizvođač opreme to ne preporučuje za mineralna tla jer često čini kalibraciju u rasponu koja se nalazi u mineralnom tlu manje točnom.

Za veću točnost od $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$, koju podrazumijeva korištenje generičke krivulje predložene od proizvođača opreme, specifična kalibracija za konkretnu vrstu tla trebala bi poboljšati točnost mjerenja na $0,01$ do $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Razlike između kalibracija u medijima s mineralnim tlom i bez tla uzrokovane su velikim volumenom zraka u organskim tlima koji snižava početni dielektrik senzora.

Prividna dielektrična permitivnost (ϵ_a) može se koristiti za određivanje volumetrijskog sadržaja vode pomoću objavljenih jednažbi, kao što je jednažba prema Topp-u (1980). Dielektrična permitivnost također se koristi za izračunavanje električne vodljivosti vode u porama. Dielektrična permitivnost dana je izrazom (23) [7].

$$\epsilon = 1.112 \times 10^{-18} \times RAW^{5.607} \quad (23)$$

4.3. TEROS 31 mini tenziometar

Mjerne specifikacije senzora TEROS 31 prikazane su u tablici 5.

Tablica 5: Mjerne specifikacije senzora TEROS 31 [8]

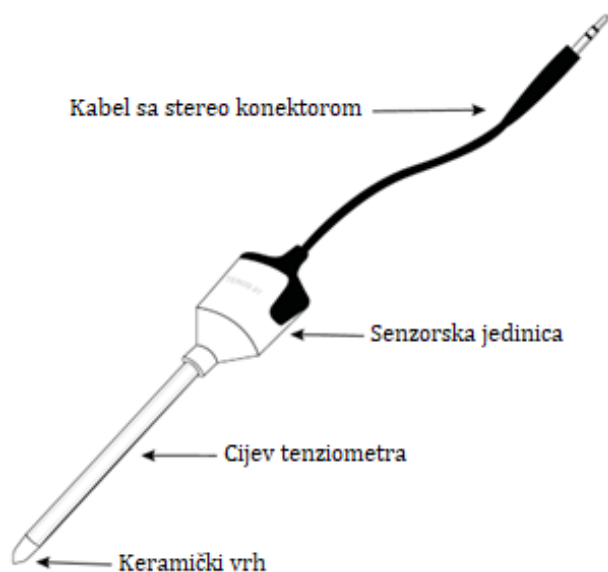
Potencijal vode	
Raspon vrijednosti	-85 do +50 kPa (do -150 kPa tijekom usporavanja vrenja)
Rezolucija	∓ 0.0012 kPa
Preciznost	∓ 0.15 kPa
Temperatura	
Raspon vrijednosti	-30 do +60 °C
Rezolucija	∓ 0.01 °C
Preciznost	∓ 0.5 °C
NAPOMENA: Ako senzor nije ukopan, izmjerena temperatura može odstupati od temperature tla	

Fizičke značajke senzora TEROS 31 prikazane su u tablici 6.

Tablica 6: Fizičke značajke senzora TEROS 31 [8]

Dimenzije	
Širina	23.5 mm
Dubina	17.5 mm
Visina	49.0 mm
Promjer osovine	
5 mm	
Duljina osovine	
2, 5, 7, 10, 15 ili 20 cm	
Raspon radne temperature	
Minimum	0 °C
Maksimum	50 °C
Materijali	
Keramika	Al ₂ O ₃ , točka mjehurića 500 kPa
Osovina	PMMA
Senzorska jedinica	PMMA i TPE
Duljina kabela	
1.5 m	
Promjer kabela	
3.0 mm	
Vrste konektora	
4-pinski stereo konektor	
Promjer stereo konektora	
3.50 mm	
Mjerač vodiča	
31 AWG odvodna žica	

Senzor TEROS 31 (slika 19) mjeri potencijal vode i temperaturu vode u tlu. Potencijal vode mjeri se pomoću cijevi ispunjene vodom s poroznim keramičkim vrhom na kraju koji se vodi do pretvarača apsolutnog tlaka. Temperatura tla se mjeri pretvaračem tlaka unutar senzorske jedinice. Ako jedinica senzora nije ukopana, izmjerena temperatura može odstupati od temperature tla.



Slika 19: Komponente senzora TEROS 31 [8]

TEROS 31 ima nisku potrošnju energije, što ga čini idealnim za dugotrajno ukopavanje u tlo. Senzor se može očitavati kontinuirano pomoću uređaja za bilježenje podataka ili povremeno pomoću ručnog čitača [8].

Sve tehnike mjerenja potencijala vode u tlu mjere potencijalnu energiju vode u ravnoteži s vodom u tlu. Drugi zakon termodinamike kaže da se povezani sustavi s različitim razinama energije kreću prema ravnotežnom stanju energije. Kada predmet, kao što je keramički vrh TEROS 31 senzora, dođe u hidraulički kontakt s tlom, vodni potencijal senzora dolazi u ravnotežu s potencijalom vode u tlu. Voda u cijevi tenziometra prenosi ukupni potencijal porne vode kroz poroznu keramiku na pretvarač tlaka. Keramički vrh djeluje kao polupropusna dijafragma s vrlo visokom vodljivošću, zbog čega je vrlo važno postići dobar hidraulički kontakt senzora s okolnim tlom.

Izraz (24) definira ukupni potencijal vode u tlu (ψ_t):

$$\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \text{ (kPa)} \quad (24)$$

gdje je:

ψ_p - atmosferski pritisak [kPa]

ψ_g - gravitacijski potencijal [kPa]

ψ_o - osmotski potencijal [kPa]

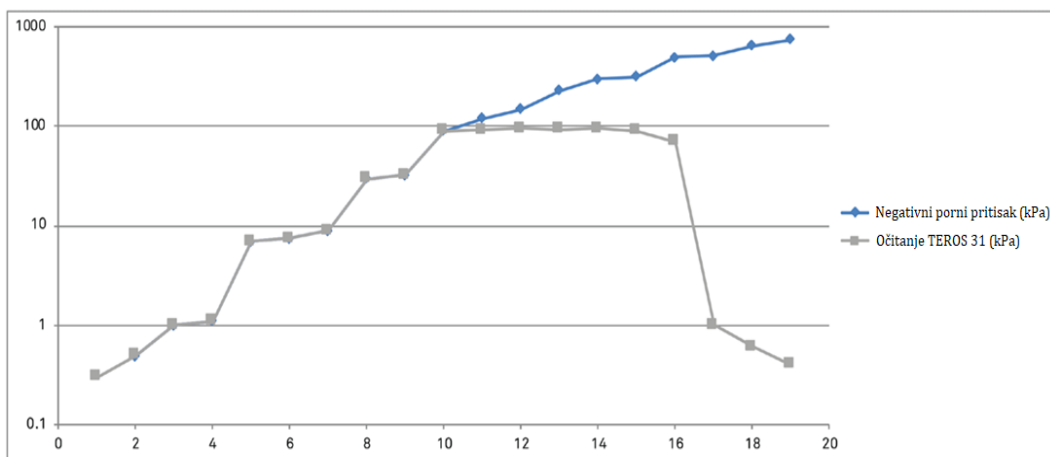
ψ_m - matrični potencijal [kPa]

Kod primjene senzora TEROS 31, ψ_g općenito nema većeg značaja. ψ_p treba mjeriti referentnim sensorom. ψ_o nastaje iz otopljenih soli u tlu i postaje važan samo ako je prisutna polupropusna barijera koja sprječava kretanje iona. Keramički vrh senzora TEROS 31 ima veličinu pora od $r = 0,3 \mu\text{m}$ i ne može blokirati ione, tako da je osmotski potencijal zanemariv. ψ_m predstavlja najvažniju komponentu vodnog potencijala u većini tala. Senzor TEROS 31 reagira na matrični potencijal tla (ψ_m) [8].

TEROS 31 mjeri zbroj matričnog potencijala i potencijala atmosferskog tlaka ($\Psi_p + \Psi_m$). Kako bi se izdvojio matrični potencijal, barometarski tlak također treba registrirati referentnim senzorom. METER ZL6 i EM60 uređaji za prikupljanje podataka uključuju senzor barometarskog tlaka i pretvaraju signal u potencijal vode u tlu. Jedan senzor atmosferskog tlaka na svakom mjernom mjestu dovoljan je za pretvaranje svih mjerenja TEROS 31 na mjestu.

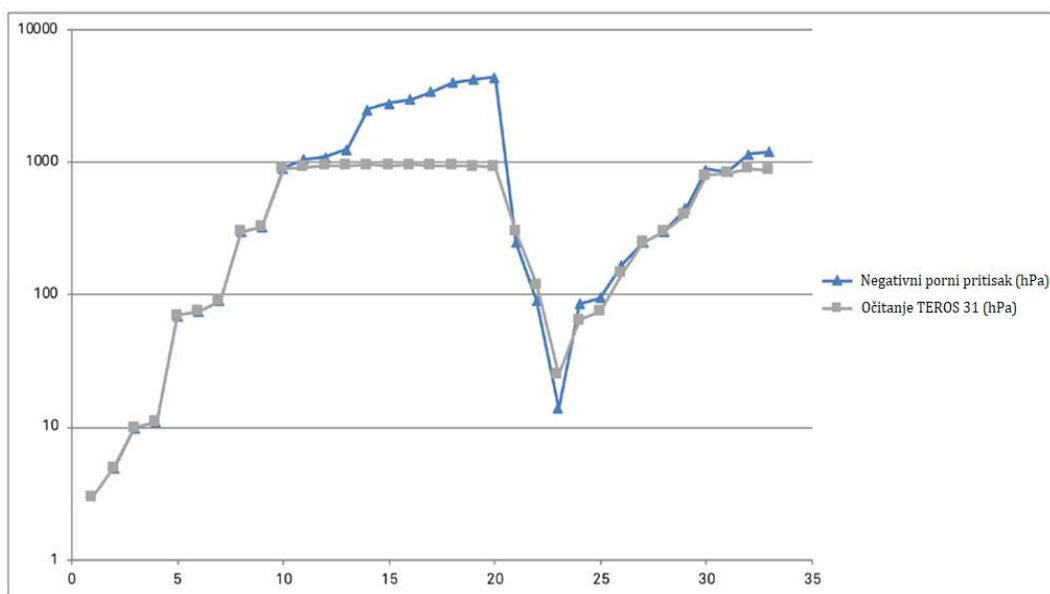
Mjerno područje tenziometra ograničeno je kavitacijom vode. Na temperaturi od 20 °C, vrelište je na 2,3 kPa iznad vakuuma. Dakle, s 20 °C i atmosferskim tlakom od 95 kPa, tenziometar ne može izmjeriti napetost ispod -92,7 kPa, čak i ako tlo postane suše od toga. Očitavanja ostaju na konstantnoj vrijednosti (slika 20, između 10. i 16. dana).

Ako tlo postane suše i dosegne -500 kPa, postignuta je točka ulaska zraka keramičkog kamena. Voda u keramičkoj čaši brzo će se isušiti, a očitavanje čaše ispunjene zrakom pasti će na 0 kPa, čak i ako se vlažnost tla i dalje smanjuje (slika 20, između 16. i 19. dana) [8].



Slika 20: Očitavanja tenziometra s napetostima do -1000 kPa [8]

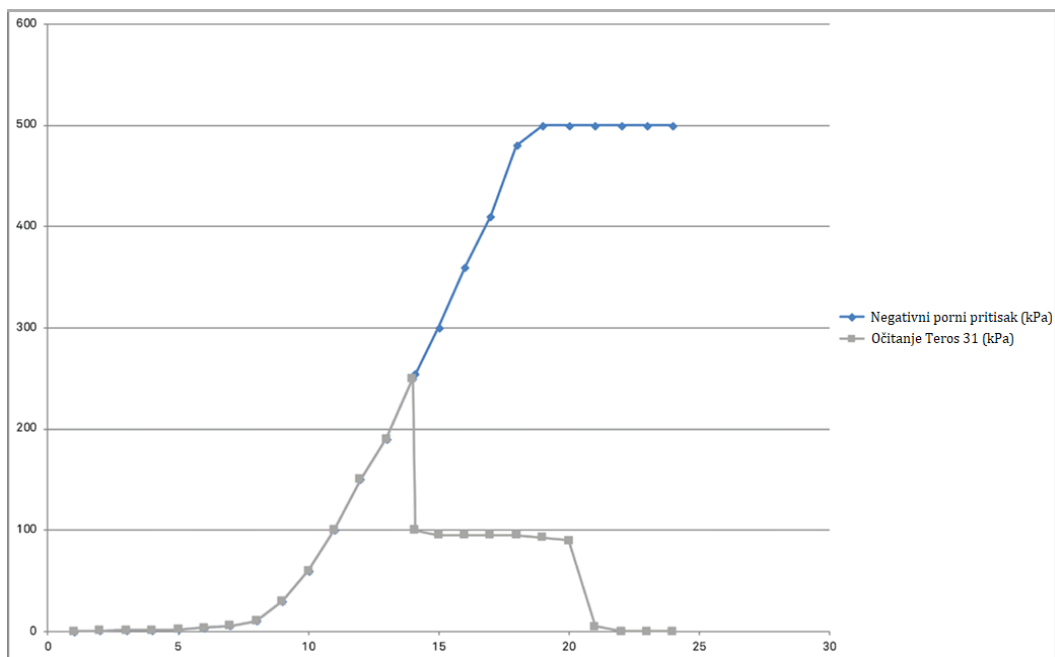
Ako će biti kiše prije nego što potencijal vode u tlu dosegne -500 kPa , vrh tenziometra će apsorbirati vodu iz tla. Voda u tlu uključuje otopljeni plin. Ako se potencijal vode u tlu poveća, otopljeni plin će se proširiti i ograničiti mjerni raspon. To će rezultirati sporim odgovorom - krivulja signala će postati ravnija, a očitavanja će se polako približavati stvarnom potencijalu vode u tlu. Ovisno o veličini razvijenog mjehurića, očitavanja će se udaljiti od stvarnog potencijala vode (slika 21, nakon 20. dana).



Slika 21: Očitavanja tenziometra s napetostima do -400 kPa [8]

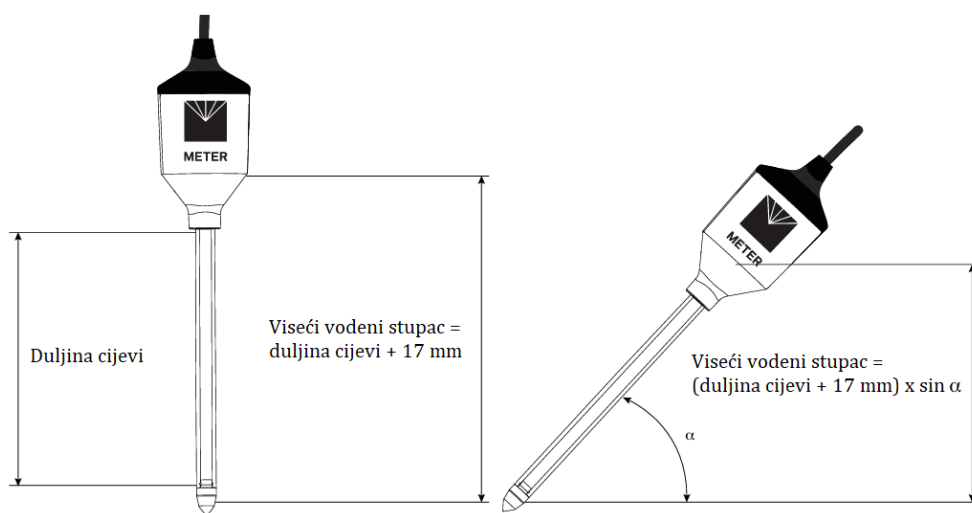
Ako napetost vode u tlu poraste više od mjernog raspona TEROS 31 (oko -85 kPa), može doći do odgođene pojave kavitacije (slika 22). Ispravno napunjeni tenziometri TEROS 31 mogu mjeriti pojavu kavitacije do -250 kPa [8].

U zasićenim tlima ili mjernim mjestima s vodom, senzor TEROS 31 će mjeriti potencijale tlaka. TEROS 31 koristi integrirani senzor temperature senzora tlaka za očitavanje temperature. TEROS 31 mjeri temperaturu tla samo ako je senzorska jedinica ukopana u tlo [8].



Slika 22: Očitavanja tenziometra uz odgodu pojave kavitacije [8]

Cijev senzora djeluje kao viseći vodeni stupac (slika 23). Integrirani senzor orijentacije kompenzira pomak koji nastaje zbog visećeg vodenog stupca. Duljina cijevi senzora TEROS 31 tvornički je registrirana u postavkama senzora. Ako se duljina cijevi promijeni, postavke se moraju prilagoditi novoj duljini korištenjem programa za prikupljanje i interpretaciju rezultata mjerenja [8].



Slika 23: Položaj referentne točke za mjerenje vodnog potencijala [8]

5. FIZIČKI MODEL KOSINE

U nastavku dan je pregled pokusa provedenih u sklopu završnog rada. Pokusi su provedeni u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci, od 25. do 28. ožujka 2024. Biti će prikazani detalji provedbe pokusa na fizičkom modelu kosine (umanjeni model kosine izgrađen od uniformno graduiranog pijeska), opterećenog različitim intenzitetima simulirane kiše. Pokusi su provedeni kako bi se utvrdilo kako se mijenjaju vlažnost i porni pritisci u tlu, ovisno o različitim početnim i rubnim uvjetima u modelu. Prikazati će se i objasniti detalji vezani uz izgradnju modela i ugradnju mjerne opreme. Biti će prikazane i objašnjene značajke simulatora oborina i simulirane kiše, te položaj i karakteristike mjernih profila. Rezultati pokusa biti će prikazani i interpretirani u zasebnom poglavlju.

5.1. Značajke fizičkog modela

Vrsta tla koja se koristila u ovom pokusu je uniformno graduirani fini pijesak, osnovnih značajki opisanih u tablici 7. Fizički model kosine izveden je u nagibu od 35° u odnosu na horizontalnu os. Suhi pijesak temeljito je pomiješan s vodom iz slavine kako bi se postigla ciljana početna vlažnost tla (w) od 2%. Unaprijed definirana masa tla je zatim ugrađena u pojedine segmente platforme i zbijana u 5 slojeva prema Laddovoj metodi podkompakcije [10], kako bi se stvorio model kosine izgrađene od pijeska, visine 30 cm s čim više jednoličnim uvjetima u smislu početnog poroziteta i vlažnosti [9].

Tablica 7 pokazuje da ciljana početna poroznost od 0,44 odgovara 50% relativne gustoće pjeskovitog tla korištenog u pokusu. Zbijanje je izvedeno na način da se broj zbijenih slojeva tla povećao od donjeg prema gornjem dijelu kosine, čime je osigurana stabilnost modela tijekom izrade [9].

Tablica 7: Osnovne značajke tla [5]

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Specifična gustoća	G_s (/)	2.70
Suha gustoća	ρ_d (g/cm ³)	1.52
Ukupna gustoća	ρ_t (g/cm ³)	1.55
Veličine zrna	D_{10} / D_{60} (mm)	0.19 / 0.37
Koef. uniformnosti	c_u (/)	1.95
Min./Max. koef. pora	e_{min} (/) / e_{max} (/)	0.64 / 0.91
Koef. propusnosti	k_s (m/s)	1E-05
Kut unutarnjeg trenja	φ (°)	34.9
Kohezija	c (kPa)	0
Inicijalni porozitet	n_i (/)	0.44
Inicijalni koeficijent pora	e_i (/)	0.78
Inicijalna relativna gustoća	D_{ri} (/)	0.5
Inicijalna vlažnost	w_i (%)	2

Model je izgrađen s 5 cm šljunka postavljenog na nepropusno dno platforme ispod pjeskovitog materijala. Na taj su način poboljšani drenažni uvjeti u modelu, čime je osigurano da mjerne točke daju podatke o hidrauličkom odzivu u djelomično zasićenim uvjetima, pri različitim intenzitetima oborina. Foliya od geosintetika postavljena je na vrh šljunčanog sloja kako bi se odvojili materijali i spriječilo ispiranje finog pjeskovitog materijala u grublji šljunčani materijal tijekom procesa infiltracije i protoka vode.

Geometrija fizičkog modela je modificirana, u odnosu na klasični fizički model kosine s materijalom u podnožju, kako bi se izbjegao ili odgodio porast razine podzemne vode i zasićenje u mjernim točkama u nagnutom dijelu modela. Na slici 24 može se vidjeti da je podnožje kosine izostavljeno, a nagnuti dio je produžen do dna platforme, čime je geometrija modela kosine slična modelu „beskonačne“ kosine. Gabionski zid koji je postavljen na dnu kosine služi kako bi se povećala stabilnost modela i spriječilo erodiranje kosine tijekom simuliranja oborine [9].



Slika 24: Detalj podnožja kosine [fotografirao autor]

Ispitivanje fizičkog modela kosine značilo je praćenje uvjeta vlažnosti i pornih pritisaka tijekom i nakon simuliranih oborina. Promjene vlažnosti tla praćene su sensorima TEROS 10 i TEROS 12, dok su mini-tenziometri TEROS 31 (METER Group, Inc.) omogućili mjerenje pornog pritiska vode u pozitivnoj i negativnoj domeni (tj. matrična sukcija). Središnji (kosi) dio modela kosine okomito je zasječen na tri lokacije radi ugrađivanja mjerne opreme, pri čemu su utvrđena tri mjerna profila, koji će detaljnije biti opisani u poglavlju 5.4. Na slici 25 prikazan je fizički model kosine razmatran u ovom radu [9].

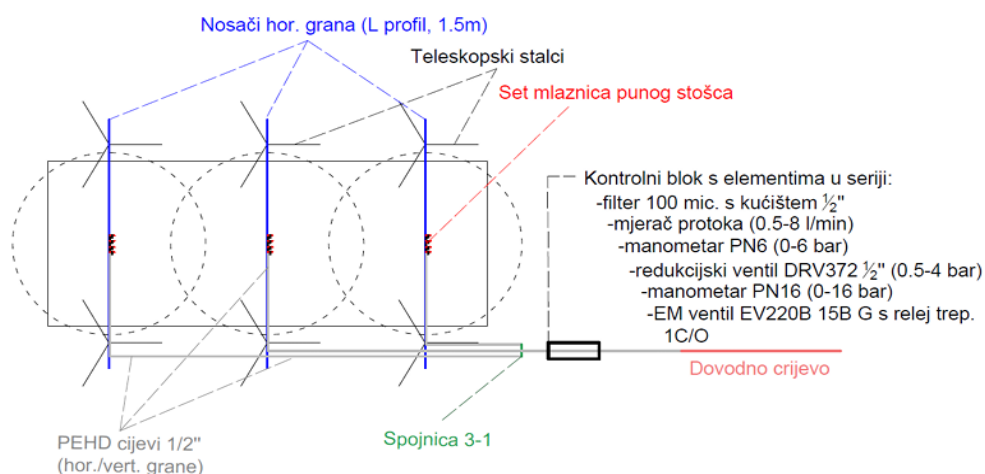


Slika 25: Fizički model kosine s nagibom od 35° izrađen od uniformno graduiranog sitnog pijeska iznad sloja šljunka debljine 5 cm za poboljšanje drenažnih svojstava tijekom ispitivanja [fotografirao autor]

5.2. Značajke simulatora oborina

Simulator oborina konstruiran je od standardnih elemenata koji se koriste za navodnjavanje, u industriji ili vodoopskrbi, te ima mogućnost kontrole svih potrebnih elemenata kod simuliranja oborine (kontrola intenziteta, protoka, pritiska, uniformnost oborine, mjerenje protoka, programabilnost i automatizacija). Simulator oborine dimenzioniran je na način da se omogući velika varijabilnost sustava u smislu značajki i intenziteta simulirane kiše. Osnovni zahtjev pri dimenzioniranju i odabiru komponenti simulatora oborina bio je pokriti čim širi raspon intenziteta (I) (od $I < 20 \text{ mm/h}$ do $I > 200 \text{ mm/h}$ po kvadratnom metru površine modela) uz osiguravanje čim homogenije distribucije oborine. Potrebno je bilo odabrati elemente i radne pritiske u sustavu koji će osigurati realne veličine kapljica simulirane oborine i relativno niske impaktne brzine kako bi se spriječilo erodiranje površinskog materijala za vrijeme trajanja pokusa.

Na slici 26 prikazano je da se sustav bazira na simultanom korištenju 3 aksijalne mlaznice punog stošca, od kojih svaka pokriva po jedan dio modela (gornji, središnji i donji dio). Za postizanje željenih protoka moguće je kombinirati različite tipove mlaznica (4 seta mlaznica koje pokrivaju protoke od 0.4 l/min do 2 l/min pri radnom pritisku od 2 bara) s redukcijским ventilom kojim je moguće regulirati pritisak vode u sustavu (od 0.5 do 4 bara) [5].



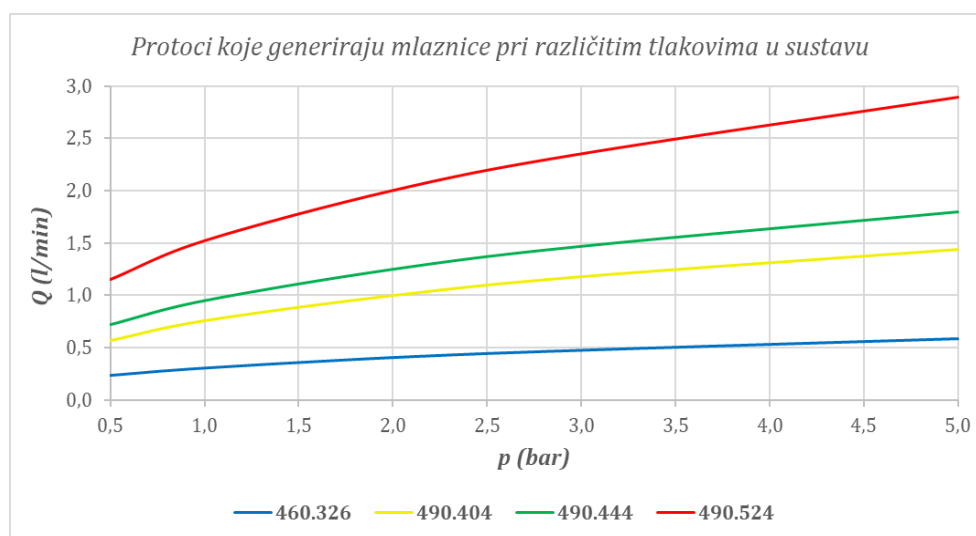
Slika 26: Shematski prikaz sustava za simuliranje oborina [5]

5.2.1. Mlaznice i nosači horizontalnih grana

Moguće je koristiti ukupno 5 različitih tipova aksijalnih mlaznica punog stošca (Lechler GmbH) serije 460 ili 490 (slika 28). Mlaznice serije 490 izrađene su od nehrđajućeg čelika otpornoga na koroziju i imaju kut prskanja od 60°. Kod provedbe pokusa korištene su 3 vrste mlaznica serije 490 (490.404, 490.444, 490.524), koje se mogu simultano koristiti na sve 3 grane simulatora, odnosno postoji ukupno 9 aksijalnih mlaznica punog stošca tipa 490. Najmanji protok (1 l/min) generira mlaznica oznake 490.404, dok je za najveći protok (2 l/min) zadužena mlaznica oznake 490.524. Navedeni protoci odnose se na radni pritisak u sustavu od 2 bara. Navedene intenzitete moguće je mijenjati promjenom tlaka u sustavu kako je prikazano u tablici 8 i na slici 27 [5].

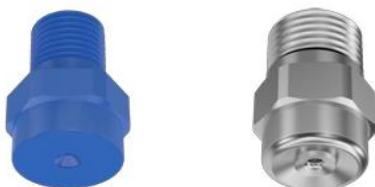
Tablica 8: Protoci koje generiraju mlaznice pri različitim tlakovima u sustavu [5]

Tip mlaznice	Kut prskanja	Q (l/min)				
		0.5 bar	1 bar	2 bar	3 bar	5 bar
460.326	90°	0.23	0.3	0.4	0.47	0.58
490.404	60°	0.57	0.76	1.00	1.18	1.44
490.444	60°	0.72	0.95	1.25	1.47	1.80
490.524	60°	1.15	1.52	2.00	2.35	2.89



Slika 27: Protoci koje generiraju mlaznice pri različitim tlakovima u sustavu [izradio autor]

Tijekom ispitivanja pri minimalnim intenzitetima, u sustav je implementirana mlaznica serije 460 (460.326) koja je izrađena od plastike i ima kut prskanja od 90°. Ukupno postoje tri mlaznice serije 460 (460.326) koje mogu istovremeno generirati protok od 0.4 l/min na svakoj od tri grane sustava.



Slika 28: Aksijalne mlaznice punog stošca (Lechler GmbH) serije 460 (lijevo) i 490 (desno) [5]

Tri metalna nosača (slika 29) pokrivaju gornji, središnji i donji dio modela, te mogu prihvatiti do 4 mlaznice. Nosači imaju ugrađene ventile za otvaranje i zatvaranje pojedine mlaznice. Spojeve je potrebno dobro pričvrstiti kako ne bi došlo do puštanja pri radnim pritiscima u sustavu.

Tlocrtni raspored i visinu s koje kapljice simulirane kiše padaju na površinu modela moguće je mijenjati pomoću 3 teleskopska nosača na kojima se nalazi nosač PEHD cijevi (metalni L profil) i mlaznica. Prije samog izvođenja pokusa na modelu, potrebno je bilo eliminirati zrak iz simulatora oborine otvaranjem svih mlaznica na sve tri horizontalne grane ispuštanjem vode u posudu dok se protok na mlaznicama nije ustalio [5].



Slika 29: Elementi simulatora oborina: nosač mlaznica s ventilima, spojeni na horizontalnu granu simulatora [fotografirao autor]

5.2.2. Kontrolni blok za mjerenje i kontrolu značajki simulirane oborine

Kontrolni blok (slika 30) predstavlja niz serijski spojenih elemenata kojima se upravlja i kontrolira rad simulatora oborina. Kako bi se osigurao nesmetani rad mjerača i spriječila eventualna vrtložnja uslijed strujanja vode, svi elementi u seriji spojeni su na krutu PEHD cijev promjera $\frac{1}{2}$ " (20 mm). Voda se dovodi do simulatora oborina, odnosno do prvog elementa simulatora – kontrolnog bloka, fleksibilnim vrtnim crijevom [5].

Elementi kontrolnog bloka su sljedeći:

- Kuglasta slavina R $\frac{1}{2}$ " s navojem za pričvršćivanje dovodnog fleksibilnog crijeva
- Elektromagnetski ventil EV220B 15B G, $\frac{1}{2}$ ", NBR, NC (Danfoss) 0.3–16 bar u kompletu sa svitkom 230V AC i priključnicom te ET20M električnim timerom
- Manometar PN16 s cjevastom oprugom 0-16 bar za kontrolu dolaznog pritiska
- Redukcijski ventil DRV372 (PN 25) sa zaslonom za regulaciju radnog pritiska u sustavu 0.5 do 4 bara
- Manometar PN6 s cjevastom oprugom 0-6 bar za kontrolu pritiska u sustavu simulatora oborina
- Mjerač protoka sa zaslonom (Meister) mjernog raspona 0.5 do 8 l/min
- Kućišta i uloška filtera 100 μ m za zaštitu mlaznica od onečišćenja



Slika 30: Primjer kontrolnog bloka [5]

5.2.3. PEHD cijevi i spojevi

PEHD (alkaten) cijevi promjera $\frac{1}{2}$ " (20 mm) koriste se za opskrbu mlaznica vodom pod radnim tlakom. Korištene cijevi su relativno krute, pa se mreža cijevi razvodi korištenjem „kutnih“ spojnica na mjestima pregiba uz teleskopske nosače ili „T“ spojnicama na mjestima račvanja prema horizontalnim granama simulatora oborina. Spojnice je bilo potrebno dobro pritegnuti da ne dođe do izbacivanja segmenata za vrijeme trajanja pokusa. Gubicama, teflonskim trakama ili drugim prikladnim elementima trebalo je osigurati spojeve da ne dođe do propuštanja vode. PEHD cijevi bilo je potrebno vezicama ili drugim elementima pričvrstiti za metalne nosače kako ne bi došlo do vibriranja, rotiranja ili pištanja pri radu simulatora oborina. Mreža cijevi razvedena je po podu na način da se omogući nesmetano kretanje po laboratoriju.

Sustav za simuliranje oborina, može se po potrebi automatizirati (kod dugotrajnijih pokusa gdje je potrebno simulirati različite intenzitete kiše) i nadograđivati (ugradnjom drugog tipa mlaznica ili mlaznica različitih protoka). Mjerač protoka osigurava kontrolu nad stvarno ispuštenim količinama vode na mlaznicama, dok elektromagnetski i ručni ventili na mlaznicama pružaju mogućnost variranja značajki i rasporeda oborina tijekom pokusa. Različiti tipovi mlaznica, mogućnost prilagodbe radnog pritiska pomoću redukcijskog ventila i elektromagnetski ventil, osiguravaju pokrivenost vrlo širokih raspona intenziteta koje je moguće simulirati. Teleskopski nosači omogućavaju promjene u smislu tlocrtnih i visinskih uvjeta simulirane oborine u modelu. Budući da je sustav sastavljen od niza komponenti, potpuno je prijenosan, te ga je moguće rastaviti i ponovno sastaviti na drugoj lokaciji. Detalji spojeva i elemenata koji se koriste za spajanje PEHD cijevi prikazani su na slici 31 [5].



Slika 31: Detalji spojeva i elemenata, koji se koriste za spajanje PEHD cijevi simulatora oborina [5]

5.3. Značajke simulirane oborine

U svrhu ispitivanja hidrauličkog odziva modela kosine, provedena su tri različita pokusa. Sva tri pokusa imala su približno jednake početne uvjete u smislu početne distribucije vlažnosti tla u modelu i iste ukupne količine vode korištene pri svakom pokusu, ali je karakteristika oborine bila različita za svaki pokus. Oborina je za vrijeme prvog pokusa pokrenuta s najmanjim intenzitetom kojega se postepeno povećavalo do maksimalne vrijednosti. Kod drugog pokusa oborina je imala konstantan intenzitet, dok je kod trećeg pokusa oborina imala veliki intenzitet u početku pokusa, kojeg se postepeno smanjivalo. Svaki pokus trajao je 60 minuta, a razmak između pokusa bio je točno 24 sata. Kod svakog pokusa, količina oborine koja je pala na model bila je jednaka i iznosila je 80 litara.

5.3.1. Uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine

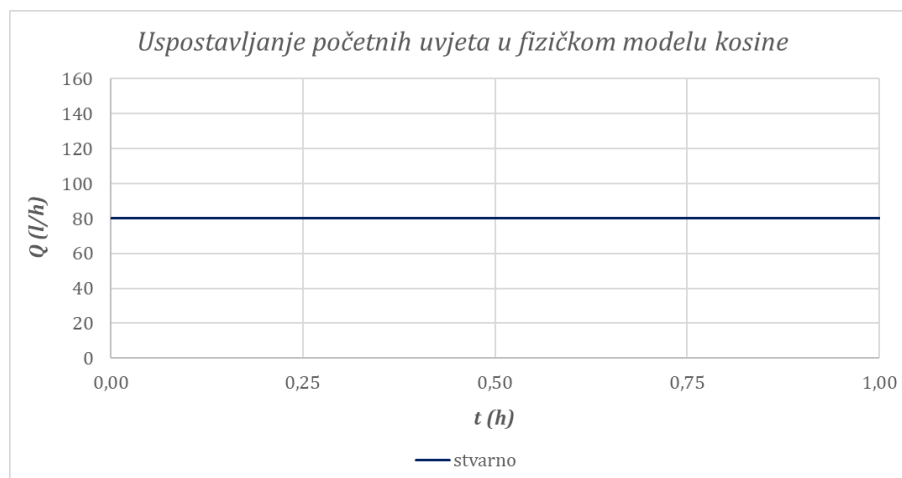
Kako bi se moglo započeti s pokusima, bilo je važno uspostaviti jednake početne uvjete kod svakog pokusa. Prije provedbe 2. i 3. pokusa već su bili uspostavljeni jednaki početni uvjeti jer je prije tih pokusa tlo u modelu već bilo vlažno. Međutim, prije provedbe 1. pokusa tlo u modelu je bilo relativno suho, stoga ga je trebalo navlažiti dan ranije. Za ostvarivanje početnih uvjeta prije 1. pokusa puštala se simulirana oborina konstantnog intenziteta od $1,0 \text{ l/min}$ na svakoj mlaznici tijekom 60 minuta, koji se nije mijenjao. Stvarne značajke oborine za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine prikazuje slika 32. Važno je napomenuti da je ukupna količina oborine (površina ispod krivulje) kod uspostavljanja početnih uvjeta prije 1. pokusa jednaka onoj kod provedbe svih ostalih pokusa i iznosi 80 litara. U tablici 9 prikazani su osnovni podaci o pokusu za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine.

Tablica 9: Osnovni podaci o pokusu za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine [izradio autor]

25.3.2024. Uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine					
	Vrijeme	Mlaznica	Tlak	Intenzitet	Protok
Početak	12:45:00	490.404	2,0 bar	1,0 l/min	80,0 l/h
Kraj	13:45:00	/	/	/	/

Stvarni volumen oborine za uspostavljanje početnih uvjeta dan je izrazom (25):

$$V_{0-60 \text{ min}} = 1,0 \text{ h} \times 80 \text{ l/h} = 80 \text{ l} \quad (25)$$



Slika 32: Stvarne značajke oborine za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine [izradio autor]

5.3.2. Pokus 1

Ukupno vrijeme trajanja pokusa od 60 minuta, podijeljeno je u 4 jednaka intervala po 15 minuta. U svakom se intervalu puštala simulirana oborina konstantnog intenziteta, ali se intenzitet povećavao svaki naredni interval. Radi jednostavnosti provedbe pokusa, puštala se oborina konstantnog intenziteta, jer je linarno povećanje intenziteta bilo teže izvedivo. Stvarne i idealizirane značajke oborine prikazuje slika 33. Važno je napomenuti da je količina oborine (površina ispod krivulje) kod stvarne i idealizirane krivulje jednaka. U tablici 10 prikazani su osnovni podaci o pokusu 1.

Tablica 10: Osnovni podaci o pokusu 1 [izradio autor]

26.3.2024. Povećanje oborina					
Pokus 1	Vrijeme	Mlaznica	Tlak	Intenzitet	Protok
Početak	13:00:00	460.326	0,75 bar	0,25 l/min	20,0 l/h
	13:15:00	490.404	1,0 bar	0,76 l/min	60,0 l/h
	13:30:00	490.444	2,0 bar	1,25 l/min	100,0 l/h
	13:45:00	490.524	1,5 bar	1,78 l/min	140,0 l/h
Kraj	14:00:00	/	/	/	/

Stvarni volumen oborine u pokusu 1 dan je izrazom (26):

$$V_{0-15 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 20 \text{ l/h} = 5 \text{ l}$$

$$V_{15-30 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 60 \text{ l/h} = 15 \text{ l}$$

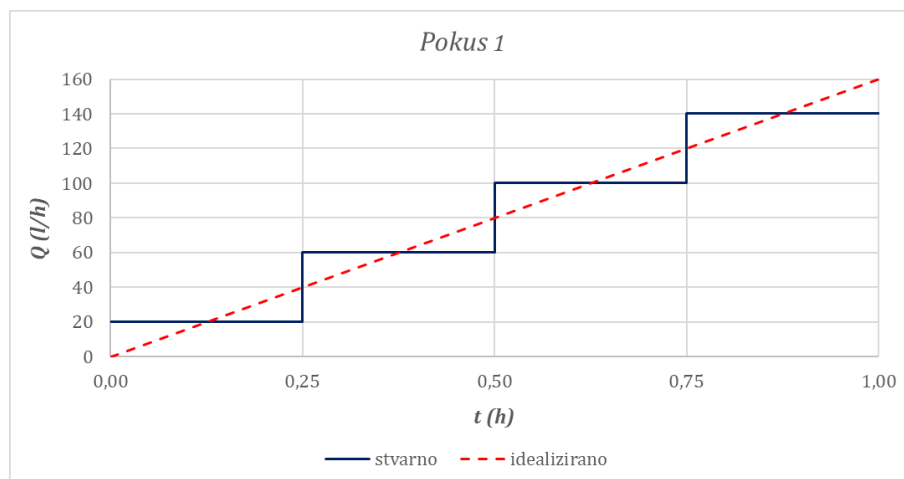
$$V_{30-45 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 100 \text{ l/h} = 25 \text{ l}$$

$$V_{45-60 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 140 \text{ l/h} = 35 \text{ l}$$

$$V_{0-60 \text{ min}} = 5 \text{ l} + 15 \text{ l} + 25 \text{ l} + 35 \text{ l} = 80 \text{ l} \quad (26)$$

Idealizirani volumen oborine u pokusu 1 dan je izrazom (27):

$$V_{0-60 \text{ min}} = \frac{1,0 \text{ h} \times 160 \text{ l/h}}{2} = 80 \text{ l} \quad (27)$$



Slika 33: Stvarne i idealizirane značajke oborine u pokusu 1 [izradio autor]

5.3.3. Pokus 2

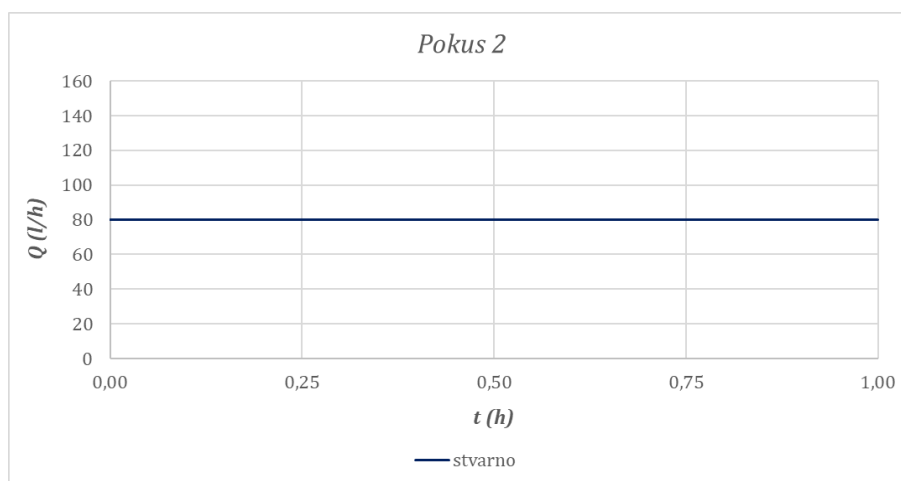
Ukupno vrijeme trajanja pokusa bilo je 60 minuta. Za vrijeme pokusa puštala se simulirana oborina konstantnog intenziteta od 1,0 l/min, koji se nije mjenjao. Stvarne značajke oborine prikazuje slika 34. Važno je napomenuti da je količina oborine (površina ispod krivulje) kod stvarne krivulje jednaka kao u pokusu 1. U tablici 11 prikazani su osnovni podaci o pokusu 2.

Tablica 11: Osnovni podaci o pokusu 2 [izradio autor]

27.3.2024. Konstantne oborine					
Pokus 2	Vrijeme	Mlaznica	Tlak	Intenzitet	Protok
Početak	13:00:40	490.404	2,0 bar	1,0 l/min	80,0 l/h
Kraj	14:00:40	/	/	/	/

Stvarni volumen oborine u pokusu 2 dan je izrazom (28):

$$V_{0-60 \text{ min}} = 1,0 \text{ h} \times 80 \text{ l/h} = 80 \text{ l} \quad (28)$$



Slika 34: Stvarne značajke oborine u pokusu 2 [izradio autor]

5.3.4. Pokus 3

Ukupno vrijeme trajanja pokusa od 60 minuta, podijeljeno je u 4 jednaka intervala po 15 minuta. U svakom se intervalu puštala simulirana oborina konstantnog intenziteta, ali se intenzitet smanjivao svaki naredni interval. Radi jednostavnosti provedbe pokusa, puštala se oborina konstantnog intenziteta, jer je linarno smanjenje intenziteta bilo teže izvedivo. Stvarne i idealizirane značajke oborine prikazuje slika 35. Važno je napomenuti da je količina oborine (površina ispod krivulje) kod stvarne i idealizirane krivulje jednaka kao u pokusu 2. U tablici 12 prikazani su osnovni podaci o pokusu 3.

Tablica 12: Osnovni podaci o pokusu 3 [izradio autor]

28.3.2024. Smanjenje oborina					
Pokus 3	Vrijeme	Mlaznica	Tlak	Intenzitet	Protok
Početak	13:05:00	490.524	1,5 bar	1,78 l/min	140,0 l/h
	13:20:00	490.444	2,0 bar	1,25 l/min	100,0 l/h
	13:35:00	490.404	1,0 bar	0,76 l/min	60,0 l/h
	13:50:00	460.326	0,75 bar	0,25 l/min	20,0 l/h
Kraj	14:05:00	/	/	/	/

Stvarni volumen oborine u pokusu 3 dan je izrazom (29):

$$V_{0-15 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 140 \text{ l/h} = 35 \text{ l}$$

$$V_{15-30 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 100 \text{ l/h} = 25 \text{ l}$$

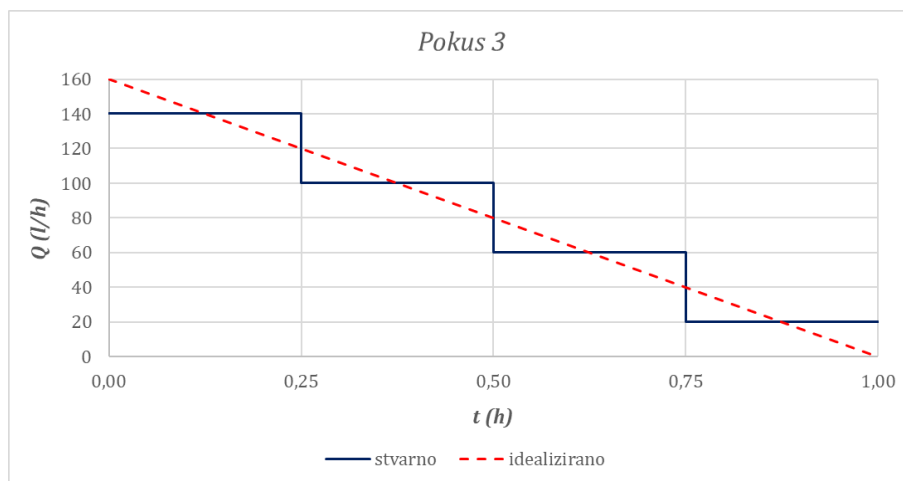
$$V_{30-45 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 60 \text{ l/h} = 15 \text{ l}$$

$$V_{45-60 \text{ min}} = 0,25 \text{ h} \times 20 \text{ l/h} = 5 \text{ l}$$

$$V_{0-60 \text{ min}} = 35 \text{ l} + 25 \text{ l} + 15 \text{ l} + 5 \text{ l} = 80 \text{ l} \quad (29)$$

Idealizirani volumen oborine u pokusu 3 dan je izrazom (30):

$$V_{0-60 \text{ min}} = \frac{1,0 \text{ h} \times 160 \text{ l/h}}{2} = 80 \text{ l} \quad (30)$$



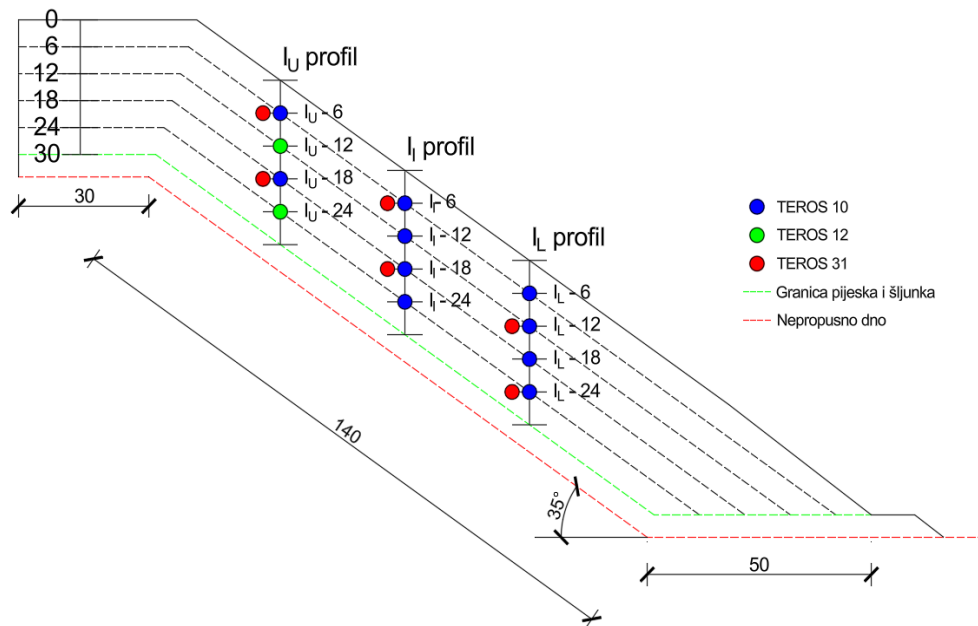
Slika 35: Stvarne i idealizirane značajke oborine u pokusu 3 [izradio autor]

5.4. Mjerni profili

Središnji (kosi) dio fizičkog modela kosine okomito je zasječen na tri lokacije, pri čemu su utvrđena tri mjerna profila: jedan u gornjem dijelu (I_U -profil), jedan u srednjem dijelu (I_I -profil) i jedan u donjem dijelu (I_L -profil). Položaji mjernih profila u kosom dijelu modela postavljeni su na jednu četvrtinu duljine kosog presjeka. Nakon što je napravljen okomiti rez (slika 36), senzori su utisnuti u model kosine na dubine koje odgovaraju spoju slojeva nastalih tijekom faze izgradnje modela, odnosno svakih 6 cm okomito na površinu kosine. Prilikom ugradnje senzora u model vodilo se računa o tome da se što manje poremeti materijal tla u kosini, a pritom je osiguran dobar hidraulički kontakt između senzora i okolnog tla. Ukupno je postavljeno 18 senzora duž tri mjerna profila, koji su smješteni u središnjem (kosom) dijelu modela kosine. Na slici 37 prikazana je geometrija fizičkog modela kosine i shematski prikaz položaja mjernih profila, gdje se može vidjeti na kojoj poziciji je ugrađen pojedini senzor [9].



Slika 36: Detalj instalacije senzora vlažnosti tla TEROS 10 i mini-tenziometra TEROS 31 na promatranoj točki I₁-6 [9]



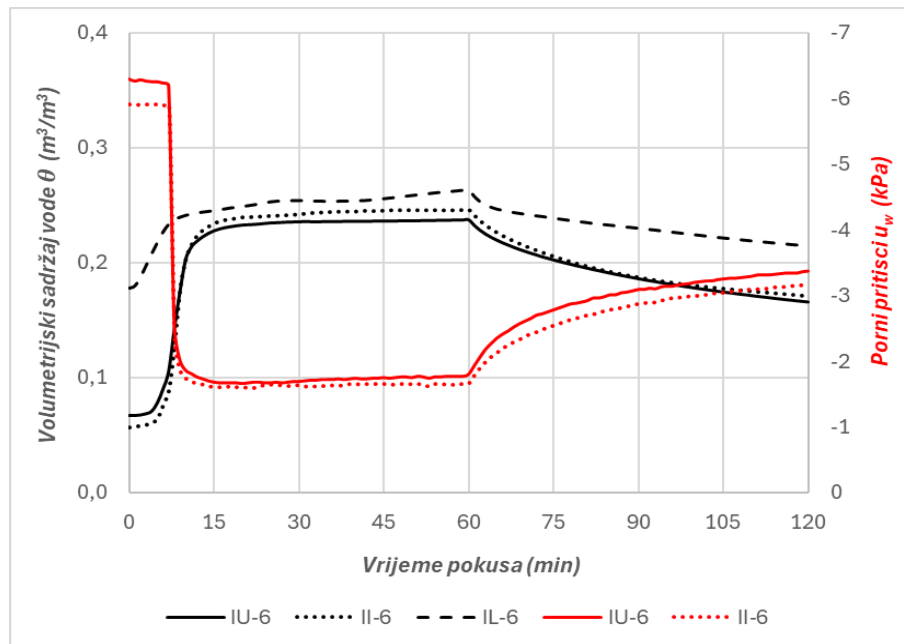
Slika 37: Geometrija fizičkog modela kosine i shematski prikaz položaja mjernih profila [izradio autor]

6. REZULTATI POKUSA

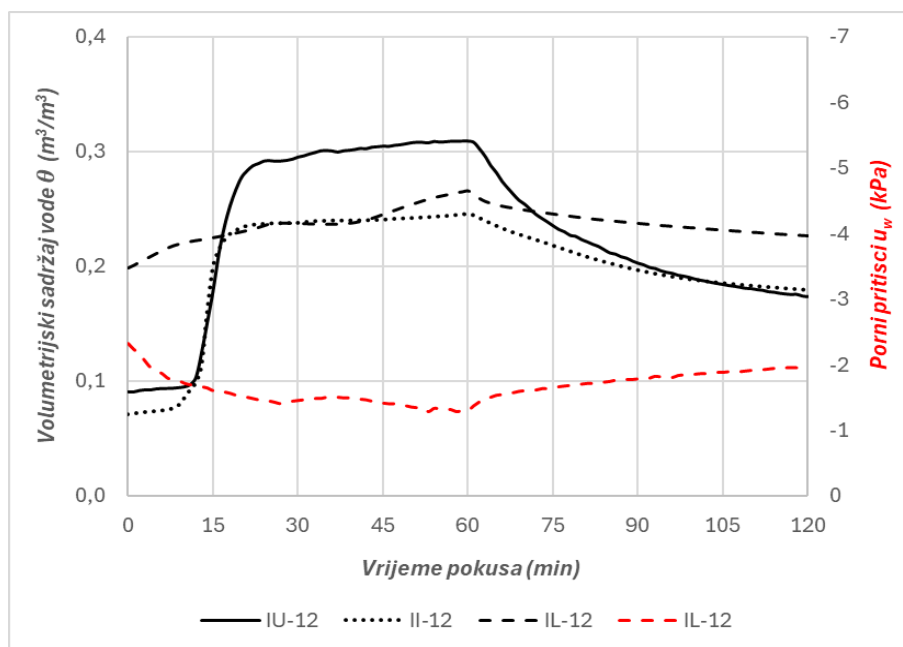
U ovom poglavlju biti će prikazani i interpretirani rezultati provedenih pokusa. Rezultati pokusa prikazuju kako se mijenjaju vlažnost tla i porni pritisci u vremenu na određenim dubinama, ovisno o različitim značajkama simulirane kiše. Rezultati pokusa prikazani su u obliku dijagrama gdje je na primarnoj vertikalnoj osi volumetrijski sadržaj vode u tlu (odnos volumena vode i ukupnog volumena tla), na sekundarnoj vertikalnoj osi porni pritisci (matrična sukucija u uvjetima parcijalne saturacije) i na horizontalnoj osi proteklo vrijeme u minutama. Na dijagramu je vrijednost volumetrijskog sadržaja vode u tlu (θ) prikazana crnom bojom, dok crvena boja prikazuje vrijednost pornog pritiska (u_w). Različite vrste linija (puna, točkasta i crtkana) prikazuju različite mjerne profile (IU, I_I, I_L).

6.1. Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine

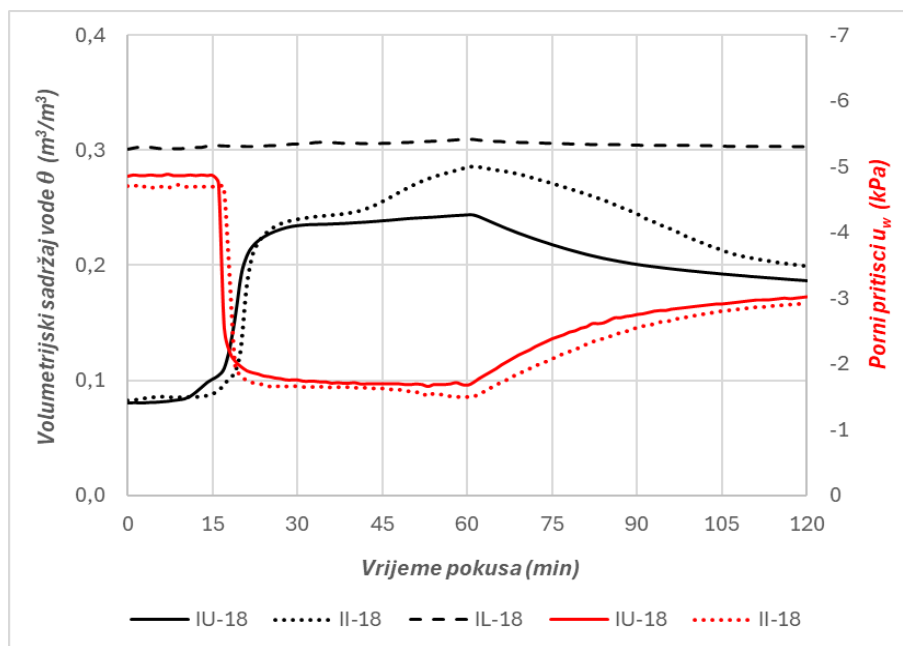
Datum i vrijeme trajanja pokusa: 25.3.2024. 12:45:00-13:45:00



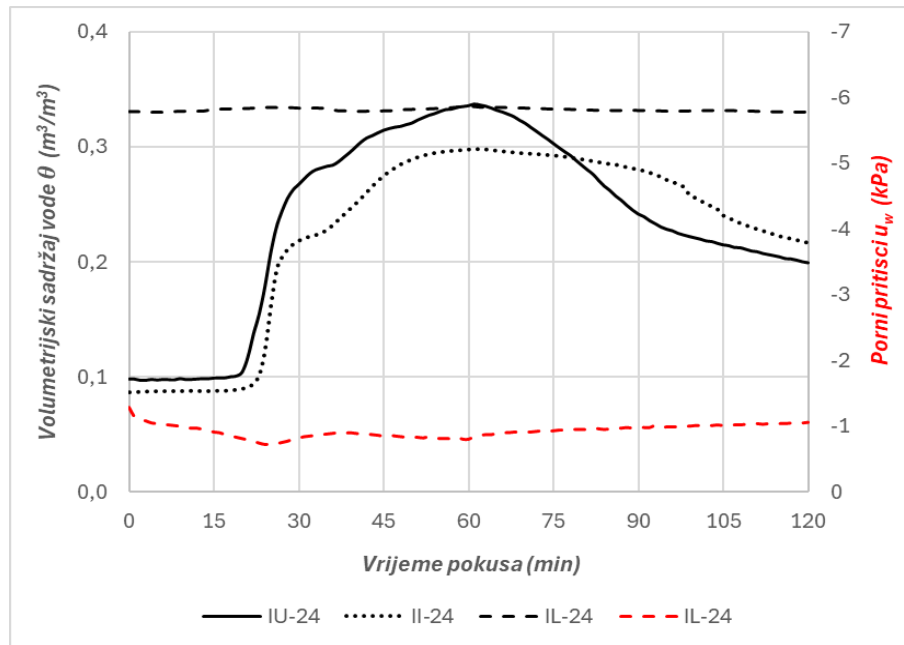
Slika 38: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 6 cm [izradio autor]



Slika 39: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 12 cm [izradio autor]



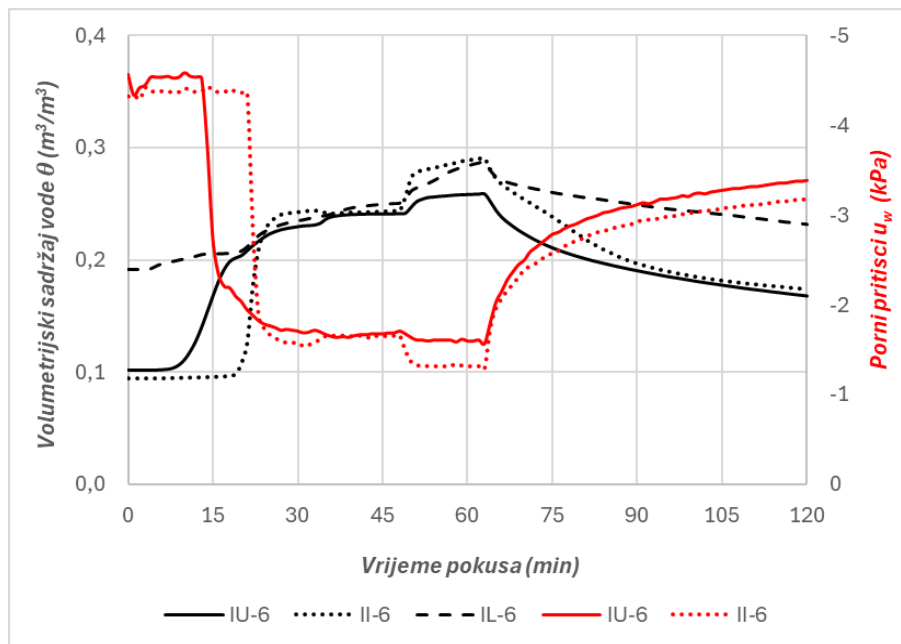
Slika 40: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 18 cm [izradio autor]



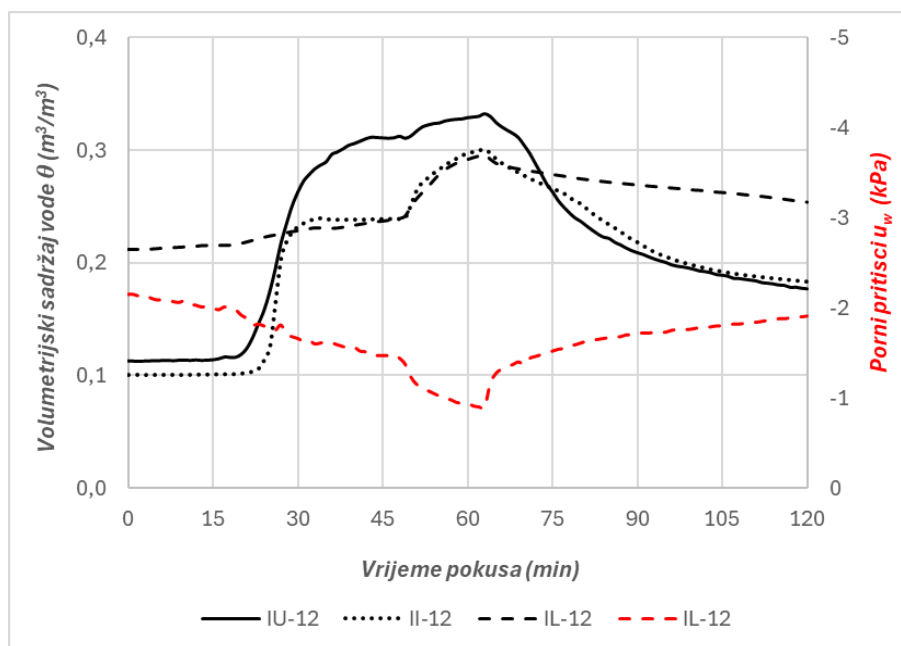
Slika 41: Rezultati pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine na dubini 24 cm [izradio autor]

6.2. Rezultati 1. pokusa

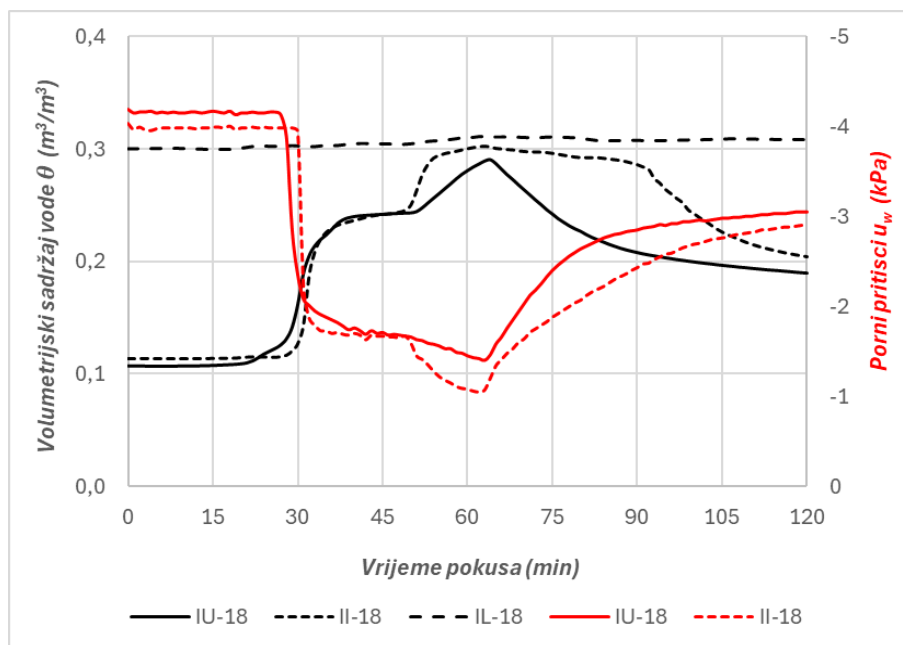
Datum i vrijeme trajanja pokusa: 26.3.2024. 13:00:00-14:00:00



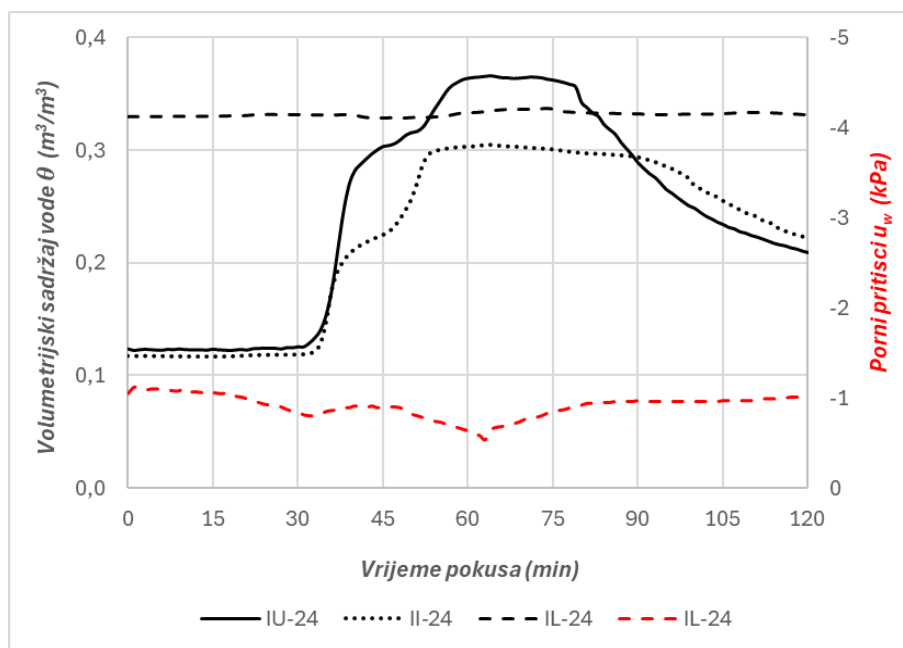
Slika 42: Rezultati 1. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]



Slika 43: Rezultati 1. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor]



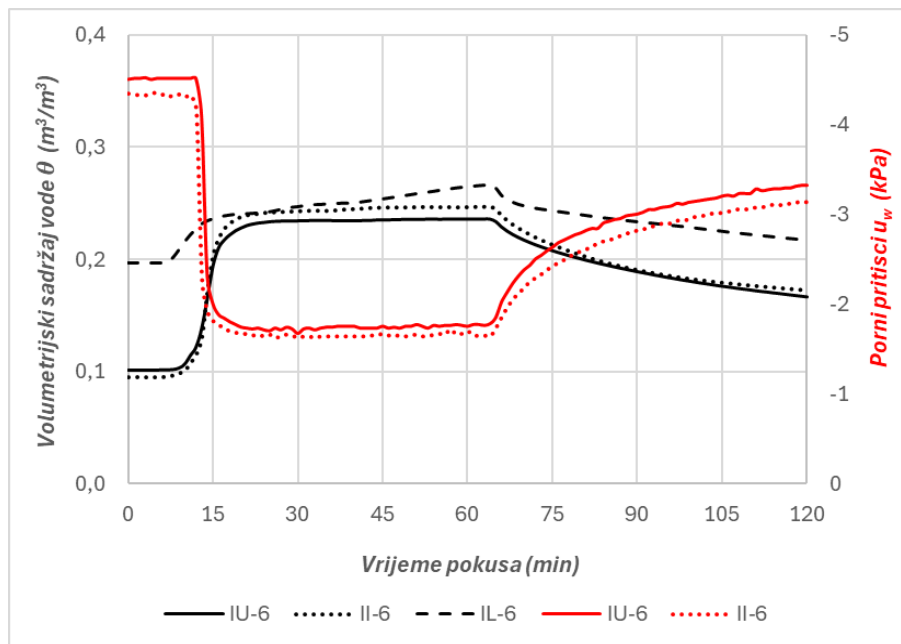
Slika 44: Rezultati 1. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor]



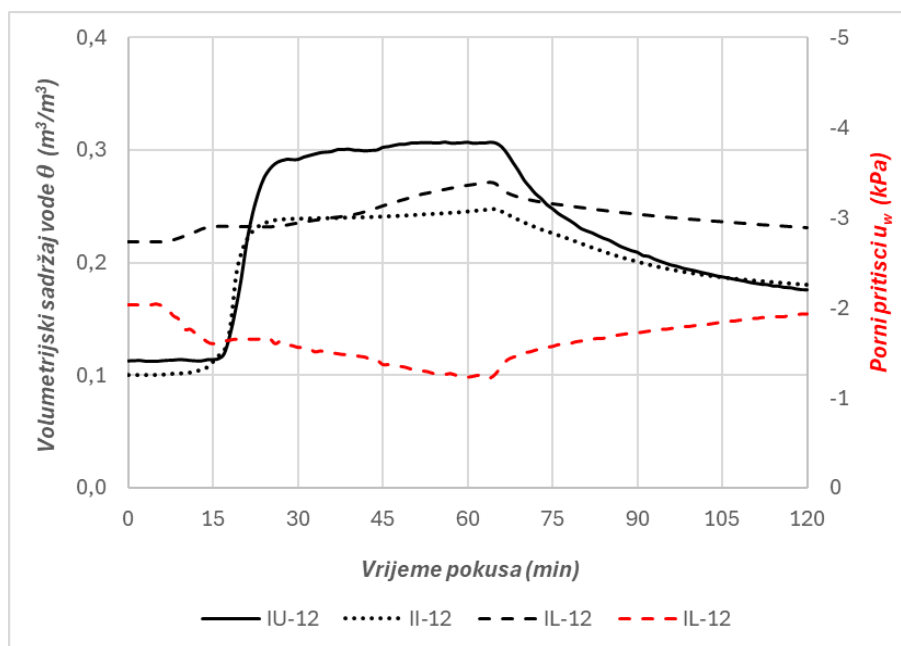
Slika 45: Rezultati 1. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor]

6.3. Rezultati 2. pokusa

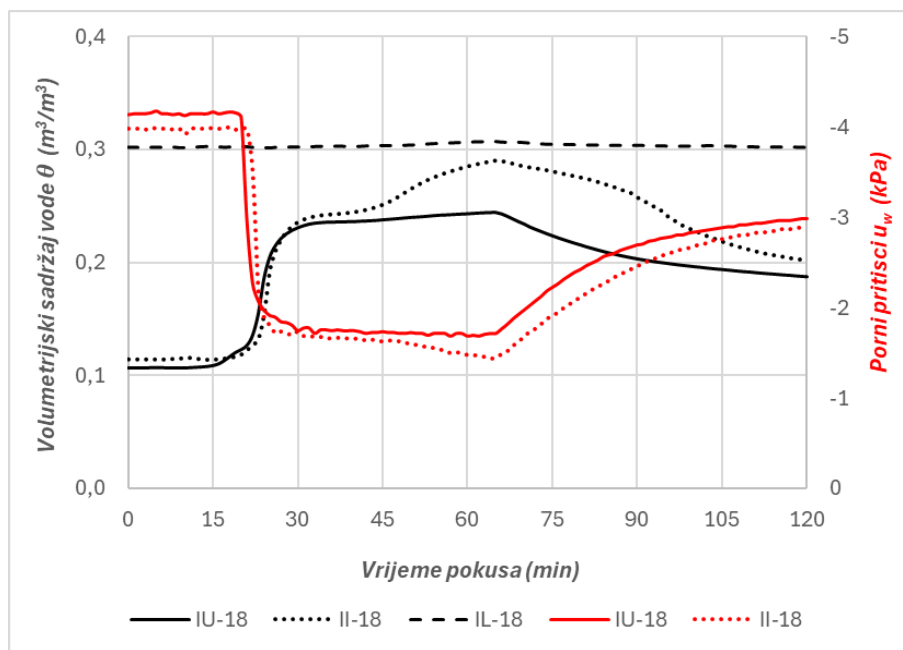
Datum i vrijeme trajanja pokusa: 27.3.2024. 13:00:40-14:00:40



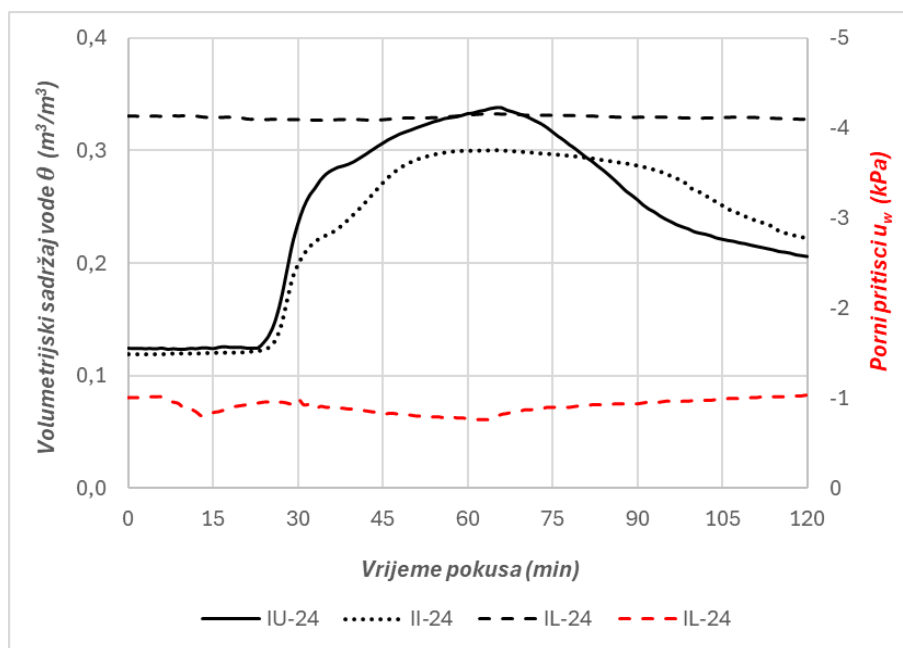
Slika 46: Rezultati 2. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]



Slika 47: Rezultati 2. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor]



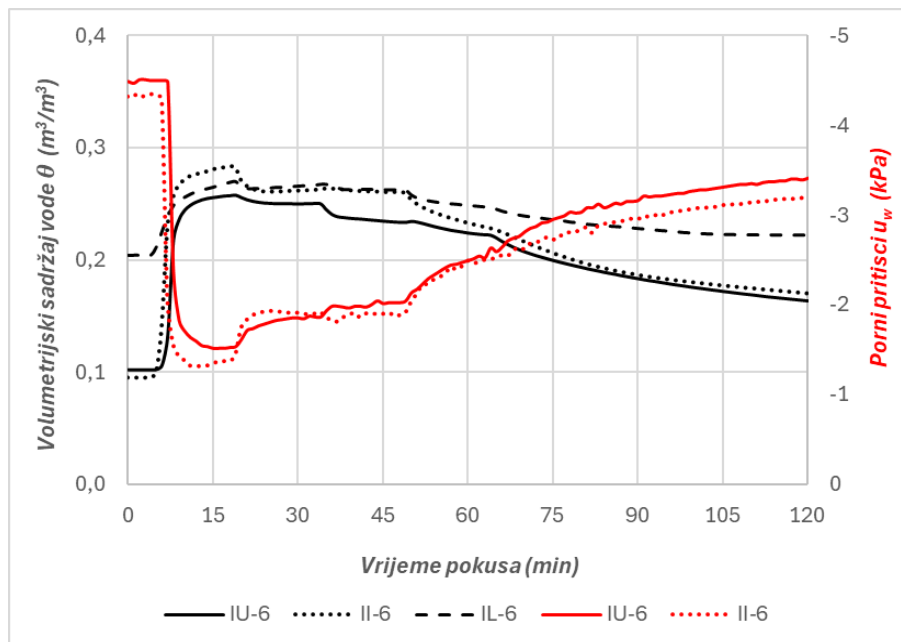
Slika 48: Rezultati 2. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor]



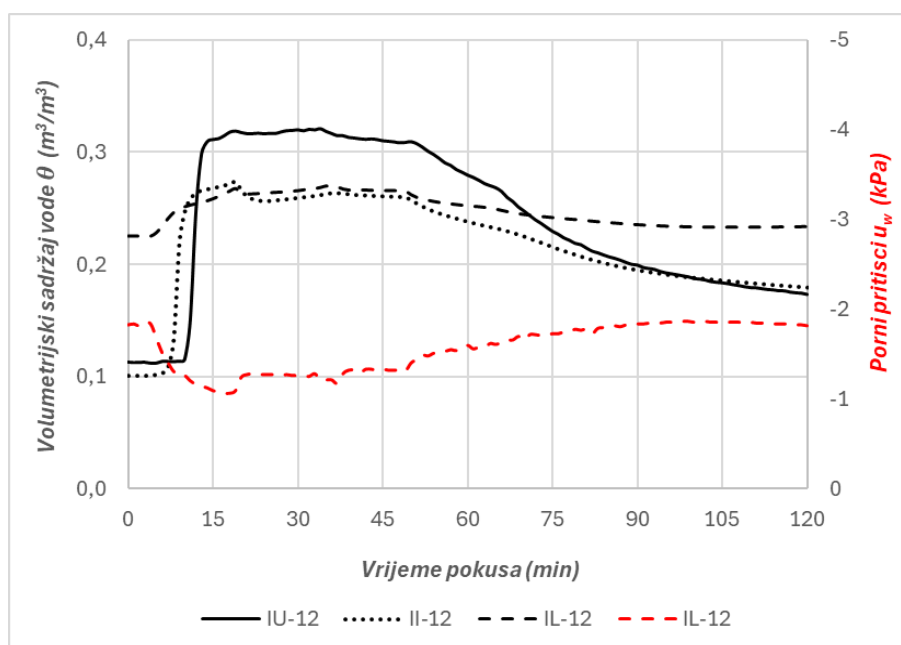
Slika 49: Rezultati 2. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor]

6.4. Rezultati 3. pokusa

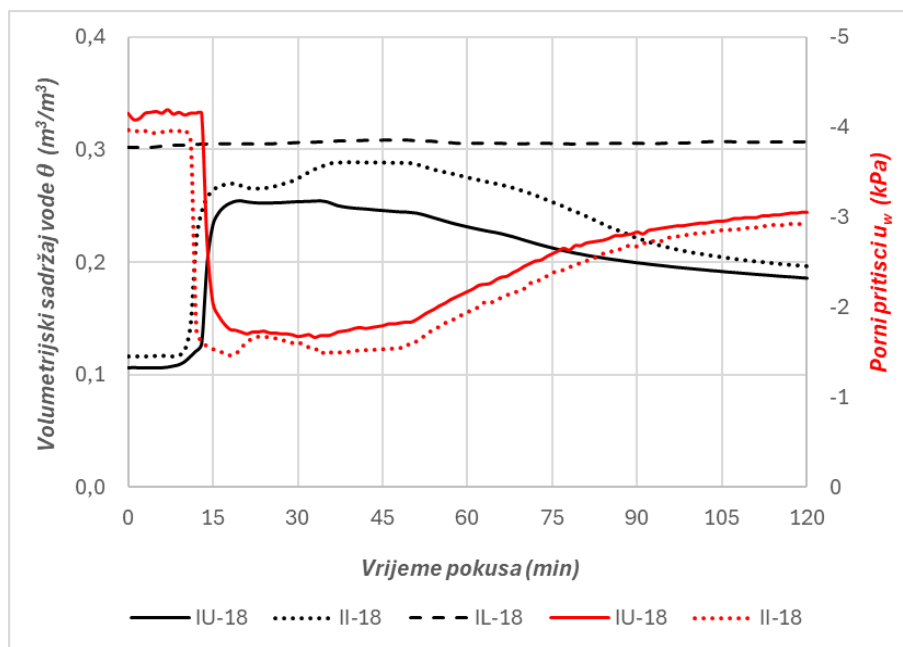
Datum i vrijeme trajanja pokusa: 28.3.2024. 13:05:00-14:05:00



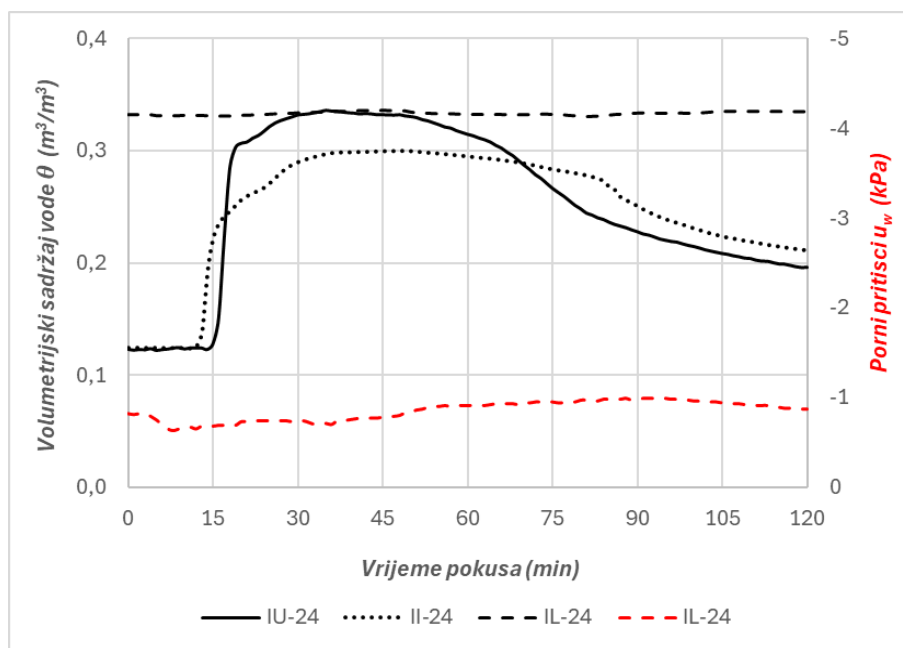
Slika 50: Rezultati 3. pokusa na dubini 6 cm [izradio autor]



Slika 51: Rezultati 3. pokusa na dubini 12 cm [izradio autor]



Slika 52: Rezultati 3. pokusa na dubini 18 cm [izradio autor]



Slika 53: Rezultati 3. pokusa na dubini 24 cm [izradio autor]

6.5. Interpretacija rezultata pokusa

U nastavku, interpretacija rezultata pokusa odnosi se na slike br. 42, 46 i 50 gdje se uspoređuju mjerne veličine za tri različita provedena pokusa na mjernom profil I_U na dubini od 6 cm. Kod 1. pokusa vidljiv je porast volumetrijske vlažnosti tla na mjernom profilu I_U , na dubini od 6 cm (I_U-6) nakon 10 minuta. Na istoj poziciji, porni pritisak je počeo rasti (matrična sukucija je počela padati) nakon 14 minuta. Kod 2. pokusa, na lokaciji I_U-6 , vidljiv je porast volumetrijske vlažnosti tla nakon 9 minuta, dok je porni pritisak počeo rasti (matrična sukucija pada) nakon 13 minuta. Kod 3. pokusa, na lokaciji I_U-6 , vidljivo je da porast volumetrijske vlažnosti tla počinje nakon 7 minuta, dok porni pritisak počinje rasti (matrična sukucija pada) nakon 8 minuta.

Može se uočiti da je kod 3. pokusa vrijeme potrebno da voda dođe do mjerne točke I_U-6 najkraće, što je posljedica puštanja najvećeg intenziteta oborine u početku pokusa, dok je kod 1. pokusa vrijeme dolaska vode do mjerne točke I_U-6 bilo je najduže, kao posljedica puštanja najmanjeg intenziteta oborine u početku pokusa.

Oblik krivulja I_U-6 (između 20' i 60') kod 1. pokusa pokazuje da se volumetrijska vlažnost tla postepeno povećava i da matrična sukucija postepeno opada. Kod 2. pokusa vidljivo je da vrijednosti imaju otprilike konstantan karakter, dok se kod 3. pokusa vidi da se volumetrijska vlažnost tla postepeno smanjuje, a matrična sukucija postepeno raste. Najveća vrijednost volumetrijske vlažnosti tla (θ) uočava se u 1. pokusu i iznosi $\theta = 0,259 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a najveća vrijednost pornog pritiska (u_w) uočava se u 3. pokusu i iznosi $u_w = -1,51 \text{ kPa}$. Također, zanimljiva je činjenica da se tlo ugrađeno u fizičkom modelu kosine brže vlaži nego što se suši. U početku pokusa vrijednost volumetrijske vlažnosti tla brže naraste (0'-15') u odnosu na završetak pokusa (60'-120') gdje je vidljivo sporije opadanje vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla.

U nastavku, interpretacija rezultata pokusa odnosi se na slike br. 46, 47, 48 i 49 gdje se uspoređuju mjerne veličine na četiri različite dubine na mjernom profilu I_U za isti provedeni pokus. Kod 2. pokusa vidljiv je porast volumetrijske vlažnosti tla na mjernom profilu I_U, na dubini od 6 cm (I_U-6) nakon 9 minuta, dok je na dubini od 12 cm (I_U-12) vidljiv porast volumetrijske vlažnosti tla nakon 17 minuta. Na dubini od 18 cm (I_U-18) uočava se porast volumetrijske vlažnosti tla nakon 18 minuta, a na dubini od 24 cm (I_U-24) se uočava porast volumetrijske vlažnosti tla nakon 24 minute.

Na poziciji I_U-6, porni pritisak je počeo rasti (matrična sukcijska je počela padati) nakon 13 minuta, dok je na poziciji I_U-18 porni pritisak počeo rasti (matrična sukcijska je počela padati) nakon 21 minutu. Za pozicije I_U-12 i I_U-24 nema dostupnih podataka o pornim pritiscima jer na tim pozicijama nije bilo ugrađenih senzora TEROS 31.

Oblik krivulje I_U-6 (između 20' i 60') za 2. pokus pokazuje konstantnu vrijednost volumetrijske vlažnosti tla, dok se kod krivulja I_U-12 i I_U-18 uočava blagi porast vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla, a kod krivulje I_U-24 nešto izaženiji porast vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla. Najveća vrijednost volumetrijske vlažnosti tla (θ) uočava se na dubini od 24 cm (I_U-24) i iznosi $\theta = 0,338 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Najveća vrijednost pornog pritiska (u_w) uočava se na dubini od 6 cm (I_U-6) i iznosi $u_w = -1,68 \text{ kPa}$.

Također, moguće je interpretirati rezultate pokusa različitih mjernih profila na istoj dubini za isti provedeni pokus (slika 46). Kod 2. pokusa vidljiv je porast volumetrijske vlažnosti tla na mjernom profilu I_U, na dubini od 6 cm (I_U-6) nakon 9 minuta, dok se na mjernom profilu I_I, na dubini od 6 cm (I_I-6) vidi porast volumetrijske vlažnosti tla nakon 10 minuta. Porni pritisci za lokaciju I_U-6, počinju rasti (matrična sukcijska počinje padati) nakon 13 minuta. Za lokaciju I_I-6 uočava se porast pornih pritiska (pad matrične sukcijske) također nakon 13 minuta.

Može se uočiti da su krivulje I_U-6 i I_L-6 relativno blizu jedna drugoj, zbog toga što voda do tih lokacija dolazi otprilike jednakom brzinom jer se točke nalaze na jednakoj dubini. Obje krivulje pokazuju konstantnu vrijednost volumetrijske vlažnosti tla i pornih pritisaka (između 20' i 60'), te se kod obe krivulje uočava smanjenje pornih pritisaka (rast matrične sukcije) nakon 65 minuta. Najveće vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla i pornih pritisaka uočavaju se na krivulji I_L-6 i iznose $\theta = 0,247 \text{ m}^3/\text{m}^3$ i $u_w = -1,62 \text{ kPa}$.

Ukoliko se promotre slike br. 42-53, najveća vrijednost volumetrijske vlažnosti tla uočava se kod 1. pokusa na mjernom profilu I_U na dubini od 24 cm (I_U-24) i iznosi $\theta = 0,366 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Najveća vrijednost pornih pritisaka (najmanja sukcija) uočava se kod 1. pokusa na mjernom profilu I_L na dubini od 24 cm (I_L-24) i iznosi $u_w = -0,53 \text{ kPa}$. Ovi rezultati posljedica su puštanja oborine s najmanjim intenzitetom u početku pokusa koji se postepeno povećava.

Ukoliko se promotre slike br. 42, 46 i 50, primjećuje se da je razlika između najmanje i najveće vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla na mjernom profilu I_U na dubini od 6 cm (I_U-6), u 1. pokusu postignuta nakon 63 minute. Kod 2. pokusa razlika je postignuta nakon 44 minute, a kod 3. pokusa razlika je postignuta nakon 18 minuta. Što se tiče pornih pritisaka, razlika između najmanje i najveće vrijednosti pornih pritisaka na istoj lokaciji (I_U-6) u 1. pokusu postignuta je nakon 63 minute. Kod 2. pokusa razlika je postignuta nakon 30 minuta, a kod 3. pokusa razlika je postignuta nakon 15 minuta.

Rezultati provedenih triju pokusa mogu se također usporediti s pokusom kojim se uspostavljalo jednake početne uvjete u fizičkom modelu kosine. Ukoliko se promotre slike br. 38, 42, 46 i 50 može se uočiti da je vrijednost volumetrijske vlažnosti tla prije početka 1., 2., i 3. pokusa iznosila $\theta \approx 0,100 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a prije početka pokusa za uspostavljanje jednakih početnih uvjeta ta je vrijednost iznosila $\theta \approx 0,060 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Vrijednost pornih pritisaka je prije početka 1., 2., i 3. pokusa iznosila $u_w \approx -4,50 \text{ kPa}$, a prije početka pokusa za uspostavljanje jednakih početnih uvjeta ta je vrijednost iznosila $u_w \approx -6,30 \text{ kPa}$. Na temelju ovih vrijednosti može se zaključiti da je u samom početku tlo u modelu bilo najsušše i porni pritisci najmanji (matrična sukcija najveća) prije puštanja prve oborine.

7. ZAKLJUČCI I DISKUSIJA

Provođenjem pokusa, dobiveni su neki zanimljivi rezultati o hidrauličkom odzivu materijala u modelu. Koristio se fizički model kosine visok 30 cm s nagibom od 35°. Izrađen je od uniformno graduiranog sitnog pijeska iznad sloja šljunka debljine 5 cm za poboljšanje drenažnih svojstava tijekom ispitivanja. Izložen je različitim značajkama simulirane oborine, stoga je instrumentiran sensorima za mjerenje volumetrijske vlažnosti tla i tlaka vode u porama.

Kod svakog pokusa moglo se uočiti da je premašena vrijednost volumetrijske vlažnosti tla od $\theta = 0,300 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a porni pritisak pao je ispod $u_w = -1,00 \text{ kPa}$ na dubini od 24 cm. Tijekom provedbe pokusa nisu postignuti potpuno zasićeni uvjeti, razlog tome je drenažni sloj šljunka debljine 5 cm, koji nije omogućio podizanje razine podzemne vode, te stvaranje pozitivnih pornih pritisaka. Potpuno i djelomično zasićeni uvjeti bili su odvojeni nekoliko kPa matrične sukcesije. Tijekom provedbe pokusa nisu zamijećene pojave značajnijih deformacija tla uslijed povećanja ili smanjenja vlažnosti tla.

Tijekom ispitivanja moglo se uočiti da simulirana oborina nije izazvala slom materijala u fizičkom modelu kosine. Utvrđeno je da na stabilnost kosine najnepovoljnije utječe tip oborine koji je započeo s najmanjim intenzitetom, koji se onda postepeno povećavao (pokus 1). U 1. pokusu su zabilježene kritične vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla i pornog pritiska. U 1. pokusu najveća zabilježena volumetrijska vlažnost tla iznosila je $\theta = 0,366 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na mjernom profilu I_U na dubini od 24 cm (I_U-24). Najveći zabilježeni porni pritisak iznosio je $u_w \approx -0,53 \text{ kPa}$ na mjernom profilu I_L na dubini od 24 cm (I_L-24). U 2. pokusu najveća zabilježena volumetrijska vlažnost tla iznosila je $\theta = 0,338 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na mjernom profilu I_U na dubini od 24 cm (I_U-24). Najveći zabilježeni porni pritisak iznosio je $u_w \approx -0,76 \text{ kPa}$ na mjernom profilu I_L na dubini od 24 cm (I_L-24). U 3. pokusu najveća zabilježena volumetrijska vlažnost tla iznosila je $\theta = 0,336 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na mjernom profilu I_U na dubini od 24 cm (I_U-24), a najveći zabilježeni porni pritisak iznosio je $u_w \approx -0,63 \text{ kPa}$ na mjernom profilu I_L na dubini od 24 cm (I_L-24).

Kod pokusa za uspostavljanje početnih uvjeta u fizičkom modelu kosine najveća zabilježena volumetrijska vlažnost tla iznosila je $\theta = 0,337 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na mjernom profilu I_U na dubini od 24 cm (I_U-24), a najveći zabilježeni porni pritisak iznosio je $u_w \approx -0,72 \text{ kPa}$ na mjernom profilu I_L na dubini od 24 cm (I_L-24). Ukoliko te rezultate usporedimo s rezultatima 2. pokusa, može se uočiti da su vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla i pornog pritiska približno jednake. Tijekom provedbe tih dvaju pokusa puštala se simulirana oborina konstantnog intenziteta od $1,0 \text{ l/min}$, ali je početna vlažnost u modelu bila različita.

8. LITERATURA

- [1] Nonveiller, Ervin, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [2] Szavits-Nossan, Vlasta, *Mehanika tla i stijena*, Građevinski fakultet Zagreb, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/2. Predavanje MT.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/2.Predavanje%20MT.pdf), pristup 7.4.2024.
- [3] Peranić, Josip, *Fizičko - mehaničke značajke tla*, Građevinski fakultet Rijeka, [MTS 2 Fizičko mehaničke značajke tla \(p\) Web.pdf](#), pristup 7.4.2024.
- [4] Powrie, William, *Soil mechanics: Concepts and applications, 2nd edition*, Spon Press, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, 2004.
- [5] Arbanas, Željko, *Priručnik za upotrebu platforme za fizički model ispitivanja klizišta*, Građevinski fakultet Rijeka, [Priručnik Završna verzija IP-01-2018-1503.pdf](#), pristup 15.4.2024.
- [6] Meter Group Inc., *TEROS 10*, [TEROS10 Manual Web.pdf](#), pristup 15.4.2024.
- [7] Meter Group Inc., *TEROS 12*, [TEROS12 Manual Web.pdf](#), pristup 15.4.2024.
- [8] Meter Group Inc., *TEROS 31*, [20799 TEROS 31 Manual Web.pdf](#), pristup 15.4.2024.
- [9] Peranić, Josip, *Preliminary experiences on determination of soil-water characteristic curve through physical slope modelling test*, Građevinski fakultet Rijeka, [Peranic et al \(2024\) WATER fin.pdf](#), pristup 1.5.2024.
- [10] Ladd, R. S., *Preparing Test Specimens Using Undercompaction*, Geotechnical Testing Journal, 1978., <https://asmedigitalcollection.asme.org/geotechnicaltesting/article-abstract/1/1/16/1175096/Preparing-Test-Specimens-Using-Undercompaction?redirectedFrom=fulltext>, pristup 1.5.2024.