

Hidraulički odziv fizičkog modela kosine pri različitim intenzitetima kiše

Škuflić, Rea

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:669073>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Rea Škuflić

**HIDRAULIČKI ODAZIV FIZIČKOG MODELA KOSINE PRI RAZLIČITIM
INTENZITETIMA KIŠE**

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Geotehnika
Stabilnost kosina**

**Rea Škuflić
JMBAG: 0082053094**

**HIDRAULIČKI ODAZIV FIZIČKOG MODELA KOSINE PRI RAZLIČITIM
INTENZITETIMA KIŠE**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2023.

IZJAVA

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

Rea Škuflić

U Rijeci, 16. rujna 2023.

IZJAVA

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

dr.sc. Josip Peranić

U Rijeci, 15. rujna 2023.

SAŽETAK

Jedan od važnijih izazova u geotehnici smatra se stabilnost kosina bilo da govorimo o prirodno nastalim ili umjetnim. Prisutnost oborinskih voda tj. njihova infiltracija u tlo uzrokuje povećanje razine podzemne vode kao najčešći uzrok pojave nestabilnosti. U ovom je radu prikazano laboratorijsko ispitivanje na umanjenom modelu klizišta koje je simulirano različitim intenzitetima oborina. Ispitivanje je provedeno na Građevinskom fakultetu u Rijeci u okviru znanstveno-istraživačkog projekta „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS)“. Projekt je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost. U prvom je ciklusu umjetna kosina nagiba 35 stupnjeva načinjena od sitnozrnatog dravskog pijeska prskana umjetnim oborinama prethodno određenog intenziteta u određenom vremenskom periodu trajanja pokusa. U drugom ciklusu intenzitet oborina je pojačan te se bilježe nastale promijene vlažnosti i pornih pritisaka u modelu pomoću mjerne opreme. U trećem ciklusu, intenzitet oborina ponovo se povećava prateći nastale promjene u mjerenjima. U zadnjem četvrtom ciklusu intenzitet se smanjuje na onaj iznos iz početnog tj. prvog ciklusa kako bi se mogle usporediti nastale promijene te utjecaj istih na model. Rezultati ispitivanja detaljno su opisani u nastavku ovog rada zajedno sa donesenim zaključcima.

KLJUČNE RIJEČI:

Stabilnost kosina, podzemna voda, vlažnost, porni pritisak, fizikalni model

ABSTRACT

One of the most important challenges in geotechnics is the stability of slopes, whether we are talking about natural or artificial ones. The presence of rainwater, i.e., its infiltration into the soil, causes an increase in the groundwater level, which is the most common cause of landslides. This paper presents a laboratory test on a reduced landslide model, which was simulated with different precipitation intensities. The test was conducted at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka as part of the scientific research project "Physical modeling of the behavior of structures for landslide rehabilitation under static and seismic conditions (ModLandRemSS)". The project was financed by the Croatian Science Foundation. In the first cycle, an artificial slope with a 35-degree slope made of fine-grained Drava sand was sprayed with artificial precipitation of a predetermined intensity for a certain period of time during the experiment. In the second cycle, the intensity of precipitation is increased, and the resulting changes in humidity and pore water pressure in the model are recorded using the chosen measuring equipment. In the third cycle, the intensity of precipitation increases again following the resulting changes in measurements. In the last fourth cycle, the intensity is reduced to the amount from the initial cycle, i.e. the first cycle, in order to be able to compare the impact of the resulting changes on the model. The detailed test results are described in the continuation of this paper together with the conclusions reached.

KEYWORDS:

Slope stability, groundwater, humidity, pore pressure, physical model

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	OPIS FIZIČKOG MODELA KOSINE	4
2.1.	Ugradnja materijala, mjernih uređaja i simulatora oborina	6
3.	MJERNA OPREMA	17
3.1.	Mjerači vlažnosti	18
3.2.	Mjerači pornih pritisaka	21
4.	KRIVULJA RETENCIJE VODE	24
4.1.	Hidraulička histereza	26
5.	PROVOĐENJE ISPITIVANJA	28
6.	INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA	32
6.1.	Određivanje točaka retencijske krivulje za stacionarne uvjete tečenja	36
6.2.	Određivanje parametara van Genuchtenovog modela	41
7.	ZAKLJUČAK	42
8.	LITERATURA	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Značajke pijeska korištenog pri izgradnji modela kosine.....	11
Tablica 2. Potrebne količine vode i suhog pijeska.....	12
Tablica 3. Količine materijala potrebne za ugradnju u svaki segment modela.....	12
Tablica 4. Ravnotežne vrijednosti $\theta-(ua - uw)$ za stacionarne uvjete tečenja u modelu.	36
Tablica 5. Parametri van Genuchtenovog modela dobiveni nelinearnom regresijom.	41

POPIS SLIKA

Slika 1. Distribucija pornih pritisaka i stupnja saturacije u nesaturiranom i.....	2
Slika 2. Shematski prikaz platforme za ispitivanje pri 1g statičkim (kiša) uvjetima opterećenja [4].	4
Slika 3. Skica dijelova modela.	5
Slika 4. Fizički model kosine prije ugradnje materijala [4].	5
Slika 5. Ugrađeni sloj šljunka na donjem (L) dijelu modela.	8
Slika 6. Ručni kompaktor korišten za zbijanje materijala.	8
Slika 7. Ugradnja šljunka za izradu drenažnog sloja na središnjem dijelu modela.	9
Slika 8. Geotekstil (membrana) postavljena na kontaktu slojeva.	10
Slika 9. Prikaz ugrađenih slojeva i izrezbarene površine materijala.....	13
Slika 10. Postupak zasijecanja materijala prilikom ugradnje senzora.	14
Slika 11. Ugrađeni uređaji za mjerenje pornih pritisaka i vlažnosti.	15
Slika 12. Prikaz završenog modela s gabionima smještenima u nožici kosine.	16
Slika 13. Grana simulatora s četiri mlaznice.	16
Slika 14. Mjerni profili i pozicije mjernih uređaja.....	18
Slika 15. Prikaz dijelova senzora TEROS 10 [9].	19
Slika 16. Prikaz dijelova senzora TEROS 12 [10].	20
Slika 17. Dimenzije i volumen utjecaja senzora TEROS 10 [9].	21
Slika 18. Dimenzije i utjecaj volumena senzora TEROS 12 [10].	21
Slika 19. Prikaz dijelova senzora TEROS 21 [12].	22
Slika 20. Prikaz dijelova senzora TEROS 31 [11].	23
Slika 21. Krivulja retencije vode u tlu pri vlaženju i sušenju tla [6].	24
Slika 22. Retencijska krivulja za procese povećanja i smanjenja vlažnosti dobivene van Genuchtenovom jednadžbom [6].	26
Slika 23. Histereza prisutna kod retencijskih krivulja smanjenja i povećanja vlažnosti [6].	27
Slika 24. Razina vode u nožici modela.	29
Slika 25. Prikaz modela kosine na početku pokusa.	29
Slika 26. Prikaz prodiranja vode u materijal označen crvenom linijom.	30
Slika 27. Grafički prikaz promjene intenziteta oborina tijekom trajanja pokusa.	31
Slika 28. Grafički prikaz rezultata mjerenja na dubini od 6 cm.	32
Slika 29. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 12 cm.	34

Slika 30. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 18 cm.	34
Slika 31. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 24 cm.	35
Slika 32. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ -($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete.	37
Slika 33. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.	38
Slika 34. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.	38
Slika 35. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.	39
Slika 36. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.	39
Slika 37. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.	40
Slika 38. Dijagram ravnotežnih vrijednosti θ - ($u_a - u_w$) za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.	40
Slika 39. Krivulja retencije vode za grane saturacije i desaturacije.....	41

1. UVOD

Kada je riječ o prirodnim katastrofama, pojava klizišta rijetko biva izostavljena pošto se smatraju jednom od najčešćih geoloških opasnosti. Dugotrajne i intenzivne oborine najčešći su uzrok pojave novih ili reaktivacije starih klizišta. Stalne meteorološke promjene i ekstremi s kojima se danas susrećemo uvelike su povezani sa samom magnitudom i učestalošću pojave klizišta. Problem klizišta izazvanih oborinama u posljednjim je godinama poprimio znatno veću pažnju stručnjaka zbog sve veće potrebe za implementacijom teorijskih znanja pri rješavanju praktičnih problema [3].

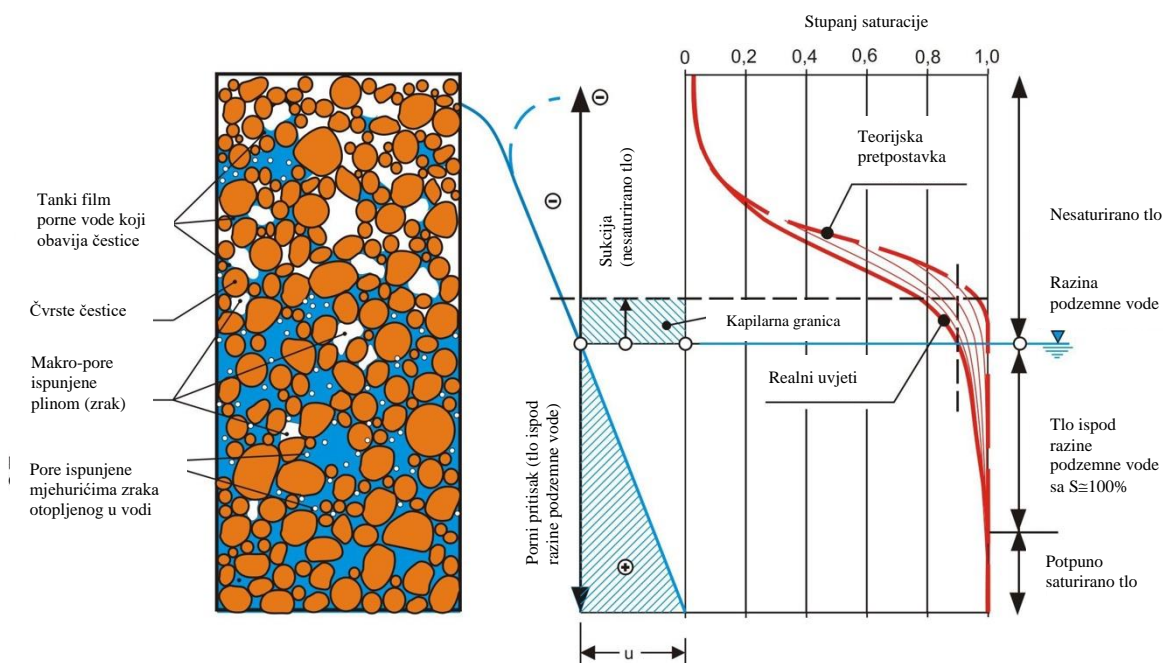
Više čimbenika doprinosi složenosti procesa klizanja tla, najvažniji među kojima su složena geološka građa i nehomogenosti materijala od kojih su izgrađene padine, materijalne značajke koje značajno variraju s dubinom geotehničkog profila, variranje razine podzemne vode i općenito složeni hidrogeološki uvjeti na promatranoj lokaciji, kao i interakcija koja se odvija između površinskog sloja koji izgrađuje kosinu i atmosfere, a koja može uključivati procese poput infiltracije oborina ili površinskog otjecanja, isparavanja i transpiracije [2].

Poseban utjecaj na odziv kosina imaju karakteristike oborine, posebice u smislu snažnih vremenskih i količinskih varijacija. Odgovor koji se javlja u tlu uslijed infiltracije oborina može varirati te utjecati na ponašanje tla ovisno o njegovim karakteristikama a posebno kada je riječ o nesaturiranim tlima. Nesaturirana tla su tla čije su šupljine djelomično ispunjene zrakom a djelomično vodom. Za tlo kažemo da je nesaturirano ako je i najmanji volumen među porama ispunjen zrakom. Promjene naprezanja dovode do promjene sadržaja vode, volumena te posljedično i posmične čvrstoće. Omjer volumena vode i volumena pora naziva se stupanj saturacije tla (S). Zbog prisutnosti zraka u porama, koji se smatra štíšljivim medijem, tj. pod povećanjem pritiska njegov volumen se značajno smanjuje, ponašanje nesaturiranih tala bitno se razlikuje od ponašanja saturiranih [6].

Porozni materijali imaju sposobnost vezivanja i zadržavanja vode u porama. Pritom se, za slučaj nesaturiranog tla, u porama javlja razlika pritisaka zraka (u_a) i pritiska vode (u_w). Razlika ($u_a - u_w$) naziva se matična sukcijska sila, budući da se kod većine problema pretpostavlja da je pritisak zraka jednak atmosferskom pritisku ($u_a = p_{atm}$), najčešće

predstavlja negativan tlak vode u porama. Slika 1 prikazuje distribuciju pornih pritisaka i stupnja saturacije u tlu iznad i ispod razine podzemne vode.

Krivulja retencije vode, jedna od najvažniji funkcija u mehanici nesaturiranih tala, predstavljaju odnos između sadržaja vode u tlu i matrične sukcije. Količina vode koju materijal zadržava prilikom smanjenja vlažnosti veća je nego što je u slučaju povećanja vlažnosti tla. Razlika u količini vode prilikom procesa vlaženja i sušenja posljedica je različitih fenomena obuhvaćenih pod terminom „hidraulička histereza“. Poznavanje retencijske krivulje tla neophodno je za rješavanje inženjerskih problema koju uključuju procjeđivanje vode kroz nesaturirano tlo. Tradicionalni pristupi analizi i projektiranju pretpostavljaju postojanje potpuno suhih ili potpuno saturiranih uvjeta u tlu što je u okviru realnih slučajeva ograničavajuće. Adekvatno geotehničko projektiranje koje će pružiti točne rezultate zahtjeva dobro poznavanje svojstava tla i parametre tečenja vode [7].



Slika 1. Distribucija pornih pritisaka i stupnja saturacije u nesaturiranom i saturiranom tlu (<http://blog.hj-koehler.de/boden-unter-wasser/>).

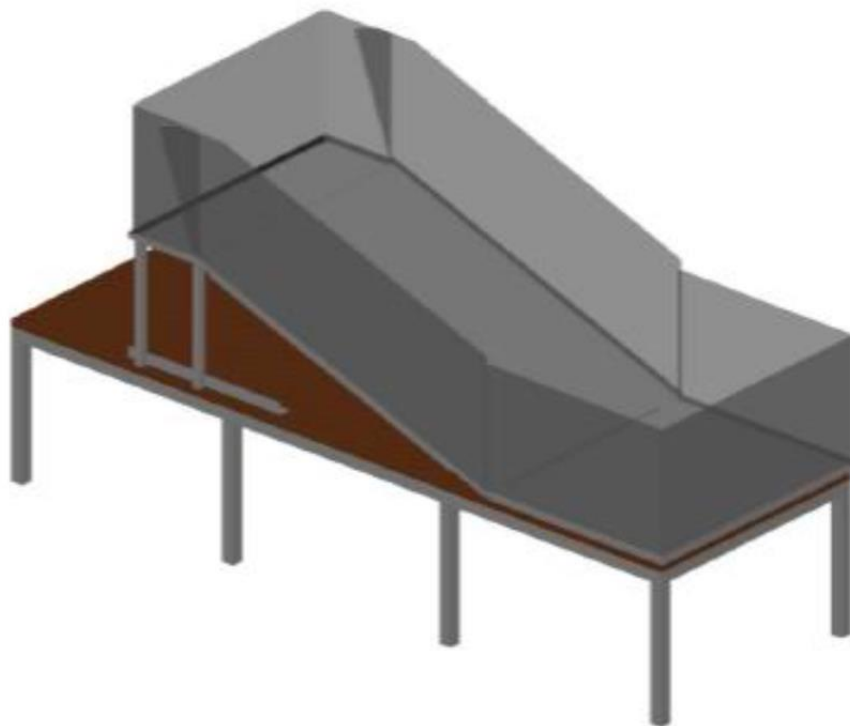
Postoje različiti pristupi koji se koriste za istraživanje mehaničkog i hidrauličkog ponašanja tla uslijed izloženosti raznim oborinskim uvjetima. Jedan od pristupa su ispitivanja na umanjenim fizičkim modelima klizišta koji daju uvid u hidro-mehanički odziv modela padine pri unaprijed definiranim i kontroliranim početnim i rubnim uvjetima.

Korištenjem adekvatnih senzora te ostale opreme za praćenje ponašanja modela kosina mogu se dobiti visokokvalitetni podatci koji se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji s numeričkim modelima. Podaci dobiveni iz posebno prilagođenih eksperimenata mogu poslužiti također i pri validaciji različitih analitičkih rješenja. Fizički modeli kosina vrlo su koristan alat pri istraživanju procesa infiltracije padalina, mehanizama pokretanja klizišta, procese propagacije klizišta, itd.

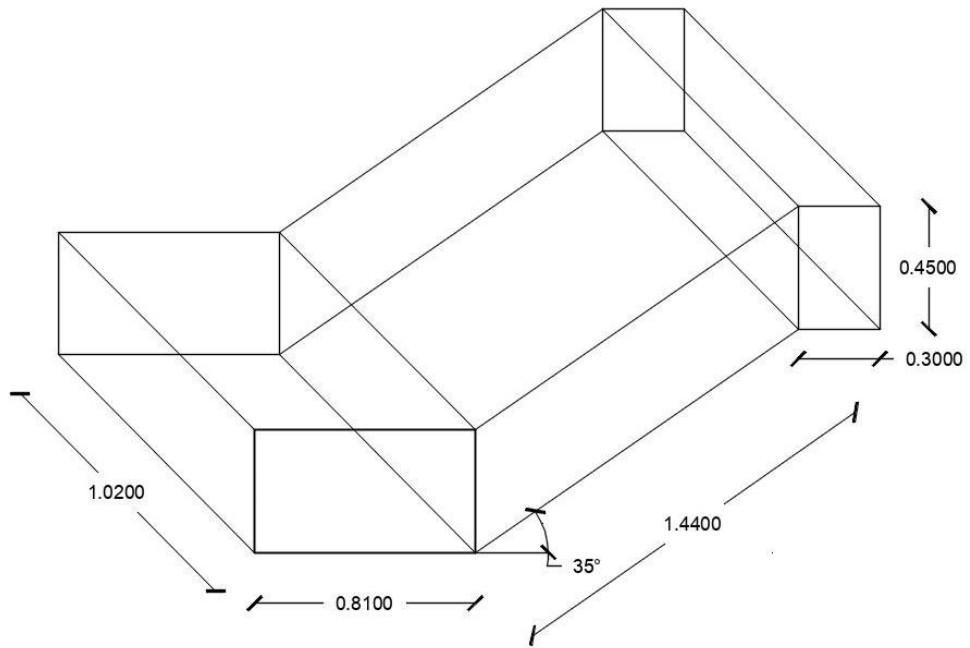
U ovom radu je opisan fizički model kosine koji je razvijen s posebnom namjenom – istraživanjem utjecaja intenziteta oborina na hidraulički odziv tla. Osim toga, svrha diplomskog rada je utvrditi prikladnost korištenja fizičkih modela za istraživanje hidrauličke histereze, odnosno razlike pri uspostavljanju stacionarnih uvjeta tečenja u modelu kosine pri različitim intenzitetima simulirane oborine. U radu je detaljno prikazana procedura gradnje modela, parametri korištenog materijala, proces ugradnje mjerne opreme i karakteristike korištenih senzora. Poseban fokus ovoga rada stavljen je na prikaz i interpretaciju rezultatima dobivenih s mjernih uređaja ugrađenih unutar modela kosine. Senzori ugrađeni u model omogućavaju nam praćenje promjena u sadržaju vlage u tlu i tlaku vode u porama materijala izloženog različitim intenzitetima simuliranih padalina. Tijekom pokusa intenzitet simuliranih oborina mijenjao se u četiri ciklusa, od početnog, postupnog povećanja intenziteta pa do smanjenja na početni iznos. Daljnjom analizom rezultata analiziran je utjecaj simulirane oborine na povećanje i smanjenje vlažnosti i pornih pritisaka u modelu, na uvjete procjeđivanja u modelu, s posebnim naglaskom na ravnotežne vrijednosti volumetrijske vlažnosti tla i matrične sukcije pri uspostavljanju stacionarnih uvjeta tečenje u modelu. Konačno, kroz diskusiju značaj dobivenih rezultata na uvjete stabilnosti kosina u modelu.

2. OPIS FIZIČKOG MODELA KOSINE

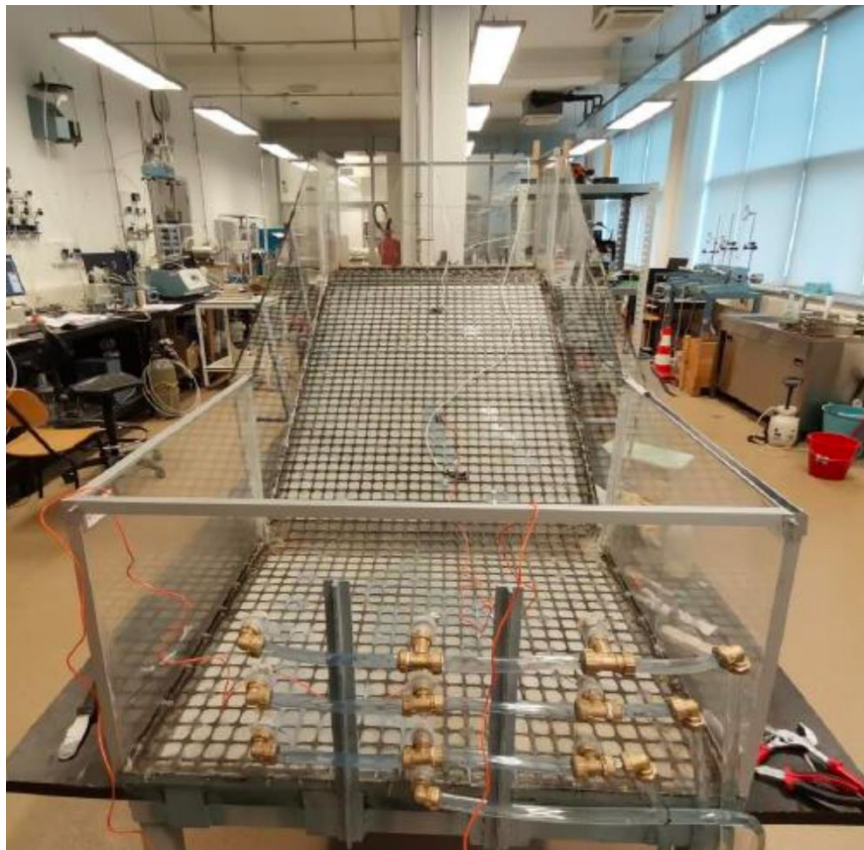
Eksperiment se izvodi na umanjenom fizičkom modelu kosine čije su dimenzije definirane prije same izrade. Model kosine nalazi se na nosivom stolu koji je napravljen od čeličnih elemenata i ploče od vodootporne blažujke. Takav tip platforme izrađen je za ispitivanje ponašanja modela kosina u 1g statičkim uvjetima, sa ili bez ugrađenih mjera sanacije. Osim spomenute platforme ostatak modela izrađen je od pleksiglasa, stijenki koje sačinjavaju okvir modela i čelične nosive konstrukcije (Slika 2.). Sveukupno se sastoji od 8 pleksiglas stijenki, 6 bočnih, 1 stražnje i 1 prednje na kojoj se nalaze otvori za drenažu. Na prednjoj pleksiglas stijenki je u cilju omogućavanja kontrole razine vode, tijekom pokusa te pražnjenja nakon završetka pokusa, izvedeno ukupno 10 otvora na koje se spajaju drenažne cijevi [4].



Slika 2. Shematski prikaz platforme za ispitivanje pri 1g statičkim (kiša) uvjetima opterećenja [4].



Slika 3. Skica dijelova modela.



Slika 4. Fizički model kosine prije ugradnje materijala [4].

2.1. Ugradnja materijala, mjernih uređaja i simulatora oborina

Prije ugradnje materijala u model potrebno je proračunima utvrditi potrebne količine materijala pijeska i šljunka od kojih se izgrađuje model, potrebnu količinu vode koju je potrebno dodati suhom materijalu kako bi se ostvarile ciljane vrijednosti početne vlažnosti pijeska, te potrebne količine materijala koji se ugrađuje u svaki pojedini sloj. Kako bi se postigla homogenost materijala i relativno ujednačeni uvjeti u čitavom modelu, ugradnja materijala i zbijanje izvodilo se u slojevima do uvjeta relativne gustoće $D_r = 50 \%$.

Kako bi se onemogućilo podizanje vode u modelu uslijed infiltracije oborina, na samo dno modela ugrađuje se sloj šljunka debljine 5 cm. Zapreminska težina šljunka određena je zbijanjem materijala u slojevima ručnim kompaktorom u tri kalupa različitih volumena i na željenu gustoću. Dimenzije kalupa poznate su unaprijed dok je masa određena nakon zbijanja materijala u kalupe. Postupak proračuna zapreminske težine materijala prikazan je u nastavku:

Kalup 1:

Dimenzije: $D=0.06981$ m, $H=0.14055$ m, $m=0.88216$ kg

Volumen: $V = r^2\pi \cdot H = 0.000538$ m³

Gustoća: $\rho = \frac{m}{V} = 1639.7$ kg/m³

Zapreminska težina: $\gamma = \rho \cdot g = 16085.46 \frac{N}{m^3} = 16.085$ kN/m³

Kalup 2:

Dimenzije: $D=0.09926$ m, $H=0.19991$ m, $m=2.586$ kg

Volumen: $V = r^2\pi \cdot H = 0.00155$ m³

Gustoća: $\rho = \frac{m}{V} = 1668.39$ kg/m³

Zapreminska težina: $\gamma = \rho \cdot g = 16366.88 \frac{N}{m^3} = 16.367$ kN/m³

Kalup 3:

Dimenzije: $D=0.14925$ m, $H=0.17108$ m, $m=4.867$ kg

Volumen: $V = r^2\pi \cdot H = 0.002993$ m³

Gustoća: $\rho = \frac{m}{V} = 1626.13$ kg/m³

Zapreminska težina: $\gamma = \rho \cdot g = 15952.31 \frac{N}{m^3} = 15.952$ kN/m³

Kao mjerodavna vrijednost uzeta je srednja vrijednost sve tri dobivene zapreminske težine $\gamma = 16.135 \text{ kN/m}^3$ koja je korištena kasnije u proračunu. Kako bi se odredile točne potrebne količine za ugradnju poslužili smo se dimenzijama modela putem kojih smo dobili volumene.

Proračun mase šljunka potrebne za sloj debljine 5cm u pojedinom segmentu modela (H, M, L) prikazan je u nastavku:

Volumen (V_H) i masa šljunka (m_H) za gornji dio modela,;

$$V_H = 0.0153 \text{ m}^3$$

$$m_H = \rho \cdot V = 1644.24 \cdot 0.0153 = 25.1568 \text{ kg} \approx 25.2 \text{ kg}$$

Volumen (V_M) i masa šljunka (m_M) za srednji dio modela,;

$$V_M = 0.060384 \text{ m}^3$$

$$m_M = \rho \cdot V = 1644.24 \cdot 0.060384 = 99.286 \text{ kg} \approx 99.3 \text{ kg}$$

Volumen (V_L) i masa šljunka (m_L) za donji dio modela,;

$$V_L = 0.024684 \text{ m}^3$$

$$m_L = \rho \cdot V = 1644.24 \cdot 0.024684 = 40.5864 \text{ kg} \approx 40.6 \text{ kg}$$

Ukupna masa šljunka potrebna za ugradnju u model kosine.

$$m_{UK} = 165.1 \text{ kg}$$

Ugradnja šljunka krenula je od najdonjeg dijela (L) modela. Nakon ugradnje materijal je jednoliko zbijen korištenjem ručnog nabijača kako bi se postigla tražena gustoća i najpovoljniji razmještaj čestica (Slika 5., 6.). Radi boljeg vezivanja, zbijanja te kako se sitnije čestice ne bi osipavale, površina materijala se prska s vodom.



Slika 5. Ugrađeni sloj šljunka na donjem (L) dijelu modela.



Slika 6. Ručni kompaktor korišten za zbijanje materijala.

Slijedila je ugradnja srednjeg dijela (M) materijala. Kako se ovaj dio modela nalazi pod nagibom bitno je da se materijal pažljivo ugrađuje kako ne bi došlo do osipavanja materijala ka donjem djelu. Kako bi se to dodatno spriječilo korištena je drvena barijera na spoju L i M segmenata (Slika 7.).

Sprječavanje osipavanja materijala pri izgradnji modela jedan od glavnih razloga zašto se s ugradnjom krenulo od najdonjeg (L) prema višim dijelovima modela. Kao završni dio ugrađen je najgornji (H) dio modela.

Prodor sitnijih čestica pijeska među krupnije čestice šljunka spriječen je ugradnjom geotekstila s funkcijom razdvajanja na kontaktu slojeva (Slika 8.). Korištena mrežica je propusna za vodu međutim onemogućava prolaz manjih čestica materijala u donje slojeve. Kako bi se ostvario bolji kontakt prilikom ugradnje pijeska, geotekstil je prskan vodom.



Slika 7. Ugradnja šljunka za izradu drenažnog sloja na središnjem dijelu modela.



Slika 8. Geotekstil (membrana) postavljena na kontaktu slojeva.

Nakon ugradnje drenažnog sloja šljunka visine 5 cm i polaganja geotekstila, slijedi, slijedi ugradnja i zbijanje pijeska u 5 slojeva, svakog 6 cm visine, do ukupne visine od 30 cm. Korišten materijal je uniformno graduirani sitni pijesak čije su značajke prikazane u Tablici 1. Materijal je zbog velike količine i radi lakšeg rukovanja i ugradnje raspodijeljen u vreće od 27 kg težine. Materijal korišten u prethodnom pokusu čuvan je u vrećama i imao je različite vrijednosti vlažnosti. Vlažnost materijala u pojedinoj vreći određena je na način da se iz svake vreće uzme mali uzorak materijala koji se zatim važe odmah pri vađenju. Nakon 24 h provedena u sušioniku na 105°C smatra se da je materijal potpuno suh te se ponovo važe kako bi se dobila suha masa. Razlika u masama prije i poslije sušenja je masa vode koju materijal ima te se iz toga dobiva vlažnost materijala (w).

Tablica 1. Značajke pijeska korištenog pri izgradnji modela kosine.

Parametar materijala	Čisti pijesak
Specifična gustoća, Gs	2,70
Suha gustoća, pd (g/cm³)	1,52
Ukupna gustoća, (g/cm³)	1,55
Efektivna veličina zrna, D10 (mm)	0,19
Efektivna veličina zrna, D60 (mm)	0,37
Koeficijent uniformnosti, cu	1,947
Minimalni koef. pora, emin	0,641
Maksimalni koef. pora, emax	0,911
Hidraulička konduktivnost, ks (m/s)	1E-05
Kut trenja, φ (°)	34,9
Kohezija, c (kPa)	0
Inicijalni porozitet, ni	0,44
Inicijalni koeficijent pora, ei	0,78
Inicijalna relativna gustoća, Dri	0,5
Inicijalna vlažnost, wi (%)	2

Potrebna vlažnost materijala za pokus određena je da bude 2%. Kako bi sav materijal bio iste vlažnosti, materijali sa vlažnošću većom od 2% miješao se s potpuno suhim materijalom u miješalici za beton, dok se u materijal vlažnosti manje od 2% dodavala proračunata količina vode. Količine su proračunate prema izrazima od 1 do 3 u nastavku:

$$m_S = \frac{m_{TOT}}{1+W} \quad (1)$$

$$m_W = m_{TOT} - m_S \quad (2)$$

$$W = \frac{m_W}{m_S + \Delta m_S} \rightarrow \Delta m_S \quad (3)$$

Tablica 2. u nastavku prikazuje potrebne količine vode i suhog pijeska kako bi se dobila željena vlažnost od 2%. Točne ukupne količine materijala pijeska kojeg je potrebno ugraditi u pojedini segment modela prikazane su u tablici 3.

Nakon što se sav materijal zamiješao u miješalici za beton krenulo se s ugradnjom u model. Ugradnja slojeva u donjem (L) i središnjem dijelu modela (M) odvijala se paralelno. Ugradnju sloja L, njegovog zbijanja, slijedila je ugradnja sloja u M dijelu te također zbijanja. Nakon što je sloj (L dio i M dio) ugrađen uslijedilo je prskanje površine materijala kako ne bi došlo do osipavanja no također kako bi površina materijala ostala vlažna. Dobro prijanjanje slojeva omogućeno je rezbarenjem površine materijala zupčastom špatulom (Slika 9.).

Tablica 2. Potrebne količine vode i suhog pijeska.

Vreća	Masa [kg]	Vlažnost w (%)	Masa suhog pijeska Δm_S [kg]	Količina vode Δm_W [mL]
1	29,72	2,68	10,06	/
2	28,99	5,86	52,5	/
3	29,06	4,65	37	/
4	27,38	2,19	2,5	/
5	28,9	5,55	48,62	/
6	30,5	1,22	/	230
7	30,58	1,32	/	200
8	28,78	1,4	/	170

Tablica 3. Količine materijala potrebne za ugradnju u svaki segment modela.

PRORAČUN MASA w = 2 %	GORNJI DIO H	m_{TOT} [kg]	144,15
	SREDNJI DIO M	m_{TOT} [kg]	674,25
	DONJI DIO L	m_{TOT} [kg]	123,28



Slika 9. Prikaz ugrađenih slojeva i izrezbarene površine materijala.

Nakon ugradnje tri sloja krenula je ugradnja mjernih uređaja. Uređaji su ugrađeni na kontaktu slojeva, na dubinama od 6 cm, 12 cm, 18 cm i 24 cm u smjeru normale na površinu modela. Prvo su ugrađeni uređaji na visinama od 24 cm i 18 cm.

Ugrađeni su uređaji za mjerenje pornih pritisaka i vlažnosti (Slika 10.). Uređaji su ugrađeni tako da se materijal zasijecao kako bi se uređaju utisnuli u neporemećeni dio materijala kosine. Na taj je način gustoća materijala ostala nepromijenjena kako bi rezultati mjerenja bili što točniji. Uređaji su pokriveni materijalom koji se dodatno zbio kako bi se osigurali približni isti uvjeti gustoće kao i u ostatku modela. Preostala dva sloja tla ugrađena su na isti način.



Slika 10. Postupak zasijecanja materijala prilikom ugradnje senzora.

Nakon ugradnje svih pet slojeva, preostali mjerni uređaji na visinama od 12 cm i 6 cm ugrađeni su na isti način, zasijecanjem materijala. Kada su svi slojevi i senzori ugrađeni na sva tri dijela modela (L, M, H dio) u podnožju modela kosine postavljeni su skalirani elementi gabionskog zida, kao dodatno osiguranje modela od sloma (Slika 12.). Završetak drenažnog sloja od šljunka izveden je u blagom nagibu, odmaknut 10 cm od završnog sloja pijeska.



Slika 11. Ugrađeni uređaji za mjerenje pornih pritisaka i vlažnosti.

U eksperimentu korišten simulator oborina sastoji se od tri grane sprinklera. Svaka od tri grane opremljena je s četiri mlaznice, mlaza oblika punog stošca i kutom prskanja od 60° ili 90° (Slika 13.). Grane su postavljene na tri profila uzduž modela te na određenim visinama kako bi mlaz vode mogao doseći rubne dijelove modela. Odabran raspored omogućava širok raspon intenziteta oborina od 30 l/h/m^2 do 160 l/h/m^2 pri radnom pritisku od 2-3 bara.



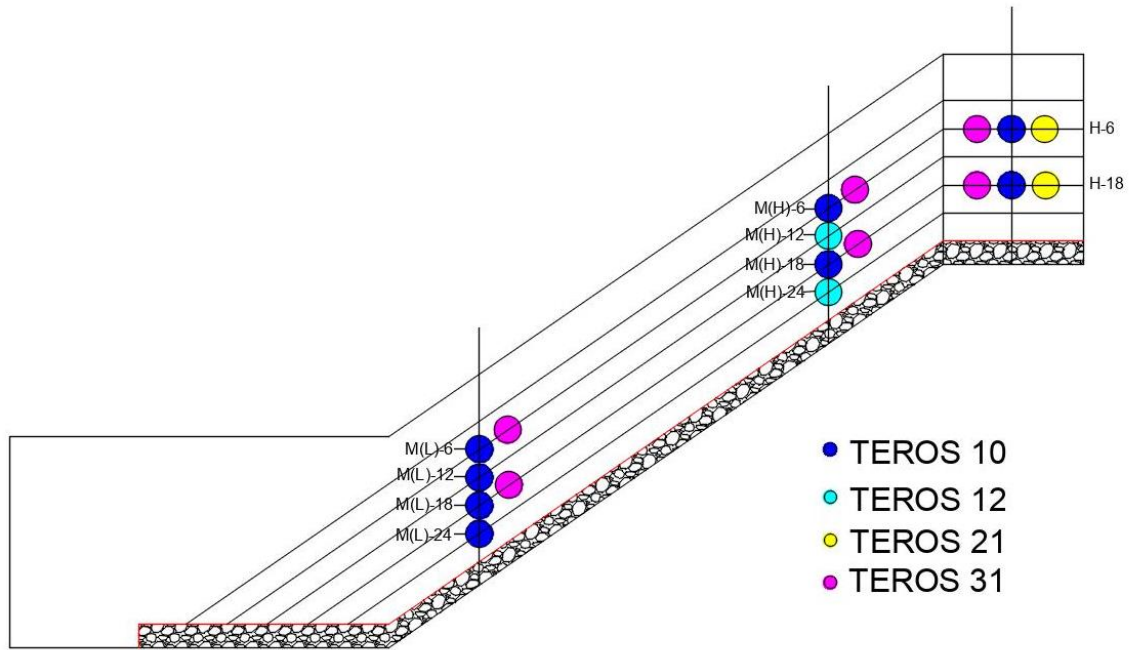
Slika 12. Prikaz završenog modela s gabionima smještenima u nožici kosine.



Slika 13. Grana simulatora s četiri mlaznice.

3. MJERNA OPREMA

Ključan korak u razvoju umanjenih fizičkih modela klizišta je pravilan odabir mjerne opreme te razvoj adekvatne mreže senzora za prethodno utvrđene uvjete ispitivanja. Sustav monitoringa slijedi iste principe koji se koriste za praćenje ponašanja stvarnih klizišta a sastoji se od geodetskog i geotehničkog sustava monitoringa. Sustav za geodetsko praćenje temelji se na fotogrametrijskoj opremi koja omogućuje multitemporalnu analizu putem serije slika dobivenih parom brzih stereo kamera. Složena mreža senzora istovjetna je geotehničkim mjernim uređajima kakvi se koriste i na terenu te spadaju u geotehnički sustav za monitoring. Informacije o sadržaju vlage u tlu i promjeni pronačnog tlaka tijekom infiltracije i podizanja razine vode trebaju biti dostupne za praćenje u odgovarajućim vremenskim intervalima, ovisno o zahtjevima eksperimenta. Korišteni su digitalizirani senzori i pretvarači pritiska s odgovarajućim snimačima podataka čiji su intervali prikupljanja podataka podesivi. Senzori su tijekom trajanja eksperimenta povezani s uređajima za pohranu i prikupljanje podataka (eng. *data logger*) Zentra data logeri, ZL6 (METER Group, Inc.) gdje svaki logger ima 6 portova za senzore. Senzori za sadržaj vode u materijalu koriste kapacitivnu metodu za predviđanje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Omogućavaju brzo prepoznavanje promjena vlage za različite poroznosti i gustoće tla. Također potrebno je istovremeno prikupiti podatke s različitih dubina i profila modela kako bi se dobila potpuna slika događanja tijekom eksperimenta. Teros 10 i 12 uređaji ugrađeni su paralelno sa slojevima, na način da su utiskivani na željenu lokaciju vertikalnim zasijecanjem prethodno ugrađenih i zbijenih slojeva. Senzori za mjerenje sadržaja vode u tlu postavljeni su na četiri različite dubine (6 cm, 12 cm, 18 cm i 24 cm ispod površine modela). Postavljeni su u središnjem dijelu modela (M), duž dva profila (M_L i M_H), i gornjem (H) dijelu modela (Slika 13.). Detaljniji opisi korištenih uređaja dani su u nastavku teksta.



Slika 14. Mjerni profili i pozicije mjernih uređaja.

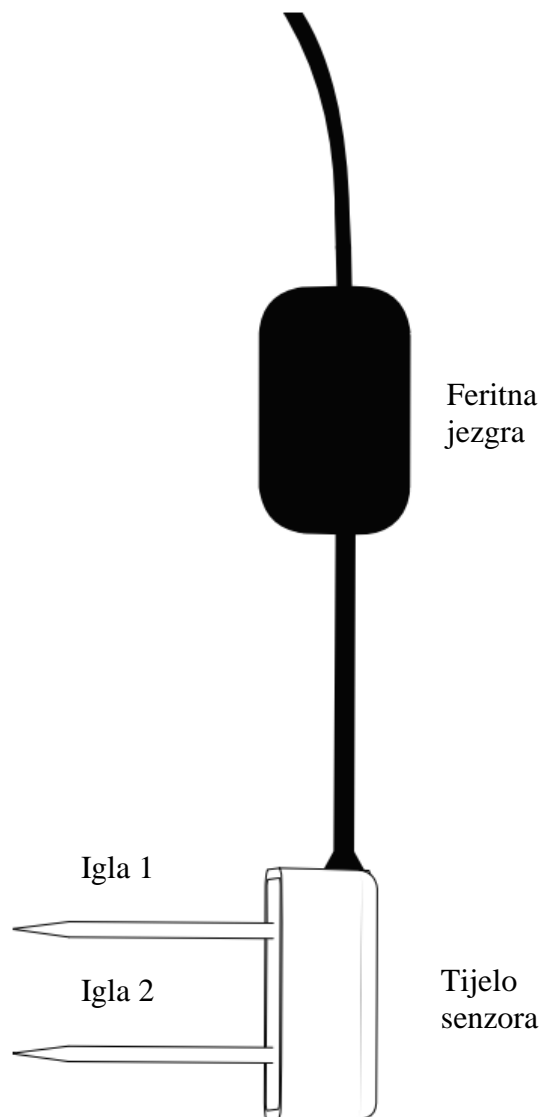
3.1. Mjerači vlažnosti

Senzori TEROS 10 i TEROS 12 implementiraju tehnike neizravnog mjerenja volumena vode sadržan u ukupnom volumenu tla ili drugim poroznim materijalima. Oba senzora temelje se na metodi predviđanja količine vode u tlu na temelju električnih svojstava tla [9].

TEROS 10 (METER Group, Inc.) pomoću igala od nehrđajućeg čelika mjeri vlažnost u tlu. Igle su duge 5,4 cm, duljina senzora je 5,1 cm, širina 2,4 cm i ukupna visina 7,5 cm. Feritna jezgra povezana je kabelom na 7,6 cm od glave senzora te služi za izolaciju senzora od smetnji u sustavu (Slika 15.). Na izmjerenim podacima sustava sprječava pojavu potencijalnih šumova [9].

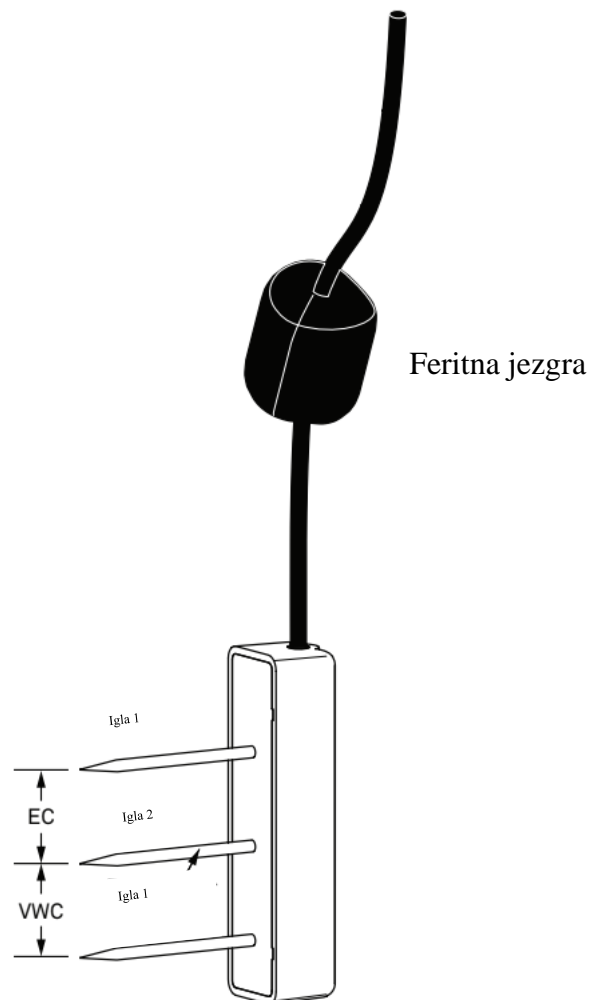
Senzori TEROS 10 koriste elektromagnetsko polje za mjerenje prividne dielektrične permitivnosti okolnog medija. Oscilirajućim valom od 70 MHz opskrbljuju igle senzora, koje se pune prema dielektričnosti materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je vlažnosti u tlu i dielektričnosti tla. Mikroprocesor mjeri vrijeme punjenja i daje neobrađenu vrijednost na temelju prividne dielektrične permitivnosti tla. Neobrađena vrijednost se pretvara u volumni udio vode kalibracijskom jednadžbom specifičnom za tlo [9].

Senzor TEROS 10 radi na visokoj frekvenciji mjerenja te nije osjetljiv na varijacije u teksturi tla i elektromagnetsku vodljivost. Općenita jednadžba kalibracije trebala bi rezultirati apsolutnom točnošću. Za većinu mineralna tla apsolutna točnost iznosi 0,03 m^3/m^3 do 8 dS/m saturiranog tla. Za dodatnu točnost potrebno je izvršiti kalibracije specifične za tlo. Vrijeme potrebno za mjerenje vrijednosti iznosi 10 ms, dok se minimalna radna temperatura kreće od -40° do 60° C [9].

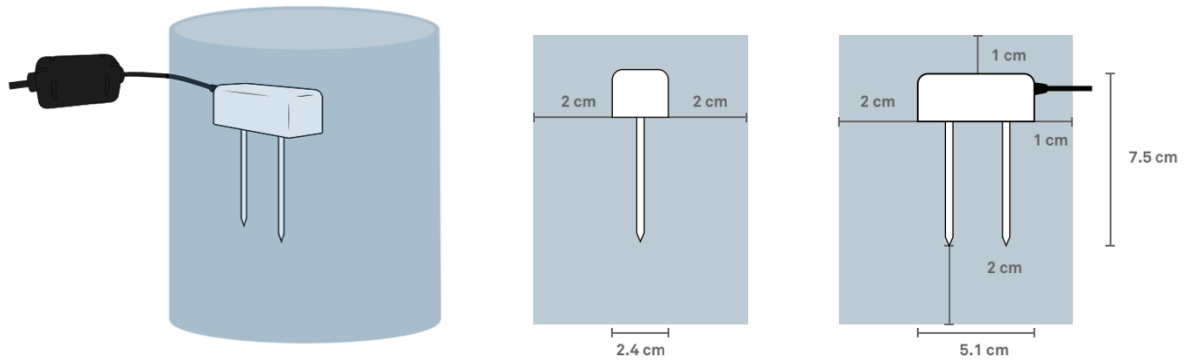


Slika 15. Prikaz dijelova senzora TEROS 10 [9].

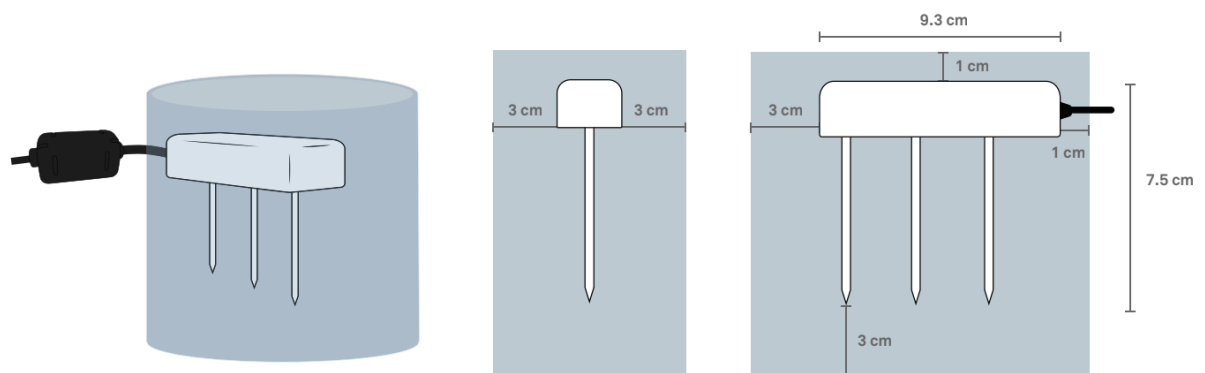
TEROS 12 slično kao i TEROS 10 mjeri vlažnost, električnu provodljivost i temperaturu tla pomoću igala od nehrđajućeg čelika. Igle su duge 5,5 cm, duljina senzora je 9,4 cm, širina 2,4 cm i ukupna visina senzora je 7,5 cm. Feritna jezgra povezana je kabelom na 7,6 cm od glave senzora te služi za izolaciju senzora od smetnji u sustavu (Slika [10]). Vlažnost tla mjeri se između igle 1 i 2 a električna provodljivost između igle 2 i 3. Ugrađenim termistorom u igli 2 mjeri se temperatura što je važno za mjerenja blizu površine gdje su promjene temperature znatno brže. Izlazna temperatura senzora je u Celzijusovim stupnjevima osim ako nije drugačije navedeno. Ovi senzori zahtijevaju malu snagu, što ih čini idealnim za trajno ugrađivanje u tlo i kontinuirano očitavanje s data loggerima ili povremeno s ručnim čitačima [10].



Slika 16. Prikaz dijelova senzora TEROS 12 [10].



Slika 17. Dimenzije i volumen utjecaja senzora TEROS 10 [9].

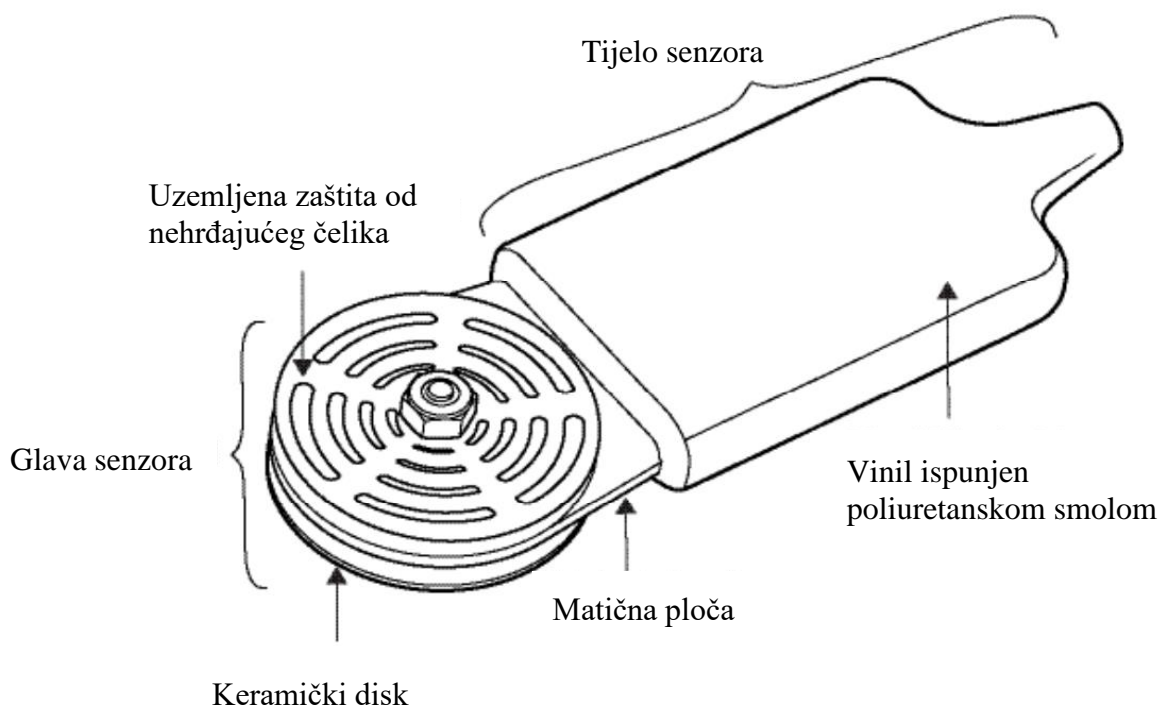


Slika 18. Dimenzije i utjecaj volumena senzora TEROS 12 [10].

Senzor šalje oscilirajući val od 70 MHz na igle senzora, koje se pune prema dielektričnosti materijala. Vrijeme punjenja igala proporcionalno je vlažnosti u tlu i dielektričnosti tla. Minimalna radna temperatura TEROS 12 senzora kreće se od -40° do 60° a vrijeme potrebno za mjerenje iznosi 10 ms. [10]

3.2. Mjerači pornih pritisaka

Jedan od senzora koji se koristi za potrebe mjerenja pornih pritisaka vode u tlu u umanjenom modelu klizišta je senzor TEROS 21, čije su dimenzije 9,6 cm, 3,5 cm i 1,5 cm (Slika 19.). Kao i senzori TEROS 10 i TEROS 12 koristi sličan pristup rada. Kako bi odredio sadržaj vode senzor mjeri električnu provodljivost poroznih keramičkih diskova. Porozni keramički diskovi nastoje ostvariti hidrauličku ravnotežu s okolnim tlom. Na temelju izmjerenog sadržaja vode i retencijske krivulje zadržavanja vode poroznog kamena



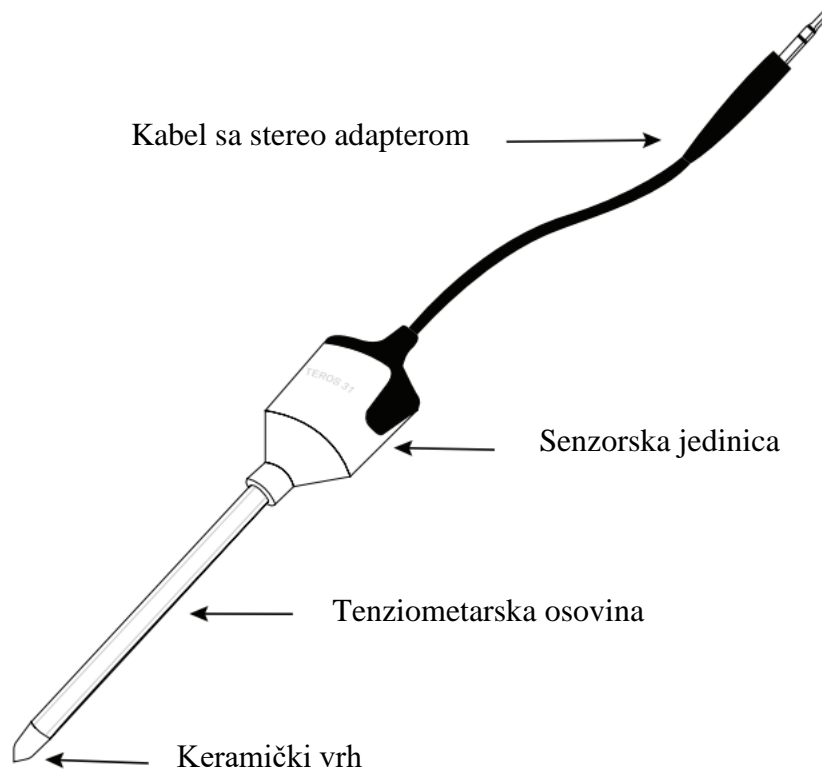
Slika 19. Prikaz dijelova senzora TEROS 21 [12].

određuje se potencijal vode u tlu. TEROS 21 ne zahtjeva održavanje i dizajniran je za kontinuirana i dugotrajna mjerenja na terenu [12].

Osim navedenog uređaja u modelu su korišteni i digitalni mini-tenziometri TEROS 31 koji mjere potencijal i temperaturu vode. Pomoću osovine, ispunjene vodom, s poroznim keramičkim vrhom na kraju koja vodi do pretvarača apsolutnog tlaka unutar senzora mjeri se potencijal vode u tlu (Slika 19.). Kada keramički vrh senzora dođe u kontakt s tlom, potencijal vode u senzoru dolazi u ravnotežu s potencijalom vode u tlu. Keramički vrh senzora funkcionira kao polupropusna dijafragma s vrlo visokom vodljivošću. Relativno male dimenzije, promjer od 5 mm i aktivna površina od samo $0,5 \text{ cm}^2$, omogućavaju postavljanje uređaja u razne položaje bez utjecaja na mjerenja i znatna poremećenja okolnog tla [11].

Senzor je zbog svoje niske potrošnje energije pogodan za dugotrajno ukopavanje u tlo. Podatci mjerenja se mogu kontinuirano očitavati putem uređaja za bilježenje podataka ili povremeno ručnim čitačem [11].

Sve dodatne tehničke karakteristike svih senzora mogu se pronaći u priručnicima proizvođača.

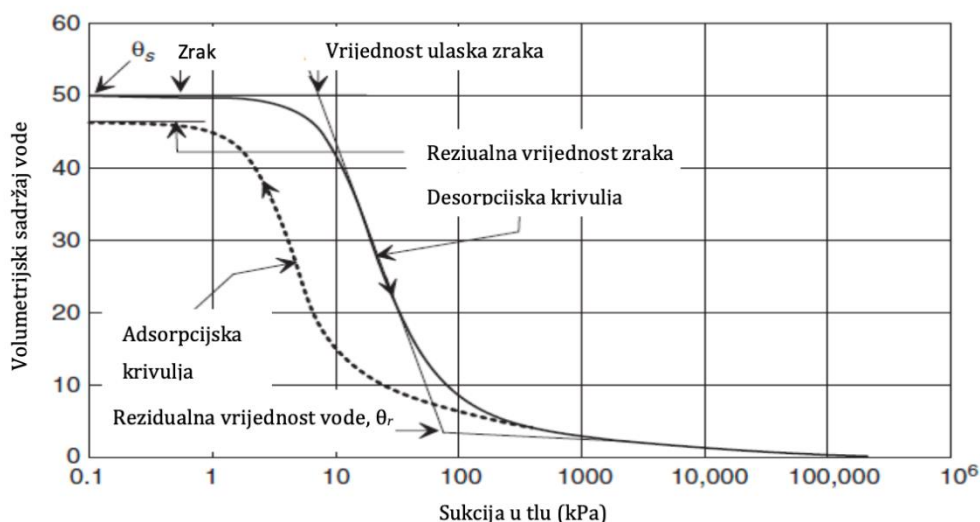


Slika 20. Prikaz dijelova senzora TEROS 31 [11].

4. KRIVULJA RETENCIJE VODE

Kako bi se mogli rješavati problemi procjeđivanja vode u nesaturiranim tlima važno je poznavati tzv. retencijske krivulje ili karakteristične krivulje retencije vode u tlu (eng. *Soli Water Retention Curve*, SWRC). Karakteristična retencijska krivulja predstavlja odnos između volumetrijske vlažnosti tla (odnos volumena vode i ukupnog volumena tla) i matrične sukcije. Sukcija (eng. *suction*) predstavlja vlačno naprezanje vode u porama tla. Matrična sukcija definira se kao razlika tlaka zraka u_a i tlaka vode u_w . Iznos matrične sukcije uvelike ovisi o veličini pora i obliku čestica tla, pri čemu manje pore rezultiraju većim vrijednostima matrične sukcije. Sa smanjivanjem sadržaja vlage u tlu matrična sukcija se povećava. U procesima smanjivanja ili povećanja sadržaja vlažnosti, količina vode koja se zadržava u tlu se razlikuje. Krivulje procesa vlaženja i sušenja predstavljaju adsorpcijsku i desorpcijsku granu retencijske krivulje, a razlika između krivulja ukazuje na hidrauličku histerezu. Više o hidrauličkoj histerezi kao jednoj od značajki biti će rečeno u nastavku [6,7].

Na slici 21 u nastavku prikazane su retencijske krivulje procesa povećanja i smanjenja vlažnosti tla u obliku slova „S“. Na opći oblik krivulja retencije vode utječu veličina zrna, veličina pora, gustoća, sadržaj gline, itd.



Slika 21. Krivulje retencije vode u tlu pri vlaženju i sušenju tla [6].

Vrijednost matrične sukcije gdje zrak iz najvećih pora počinje istiskivati vodu iz tla odgovara vrijednosti ulaska zraka prikazanoj na dijagramu. Raspodjela veličine pora unutar tla ima utjecaj na vrijednost ulaska zraka. Kod pijeska se voda iz pora može relativno lako ukloniti pri niskoj matričnoj sukciji dok je kod glina suprotno zbog znatno manjih pora i čestica. Sadržaj rezidualne vode je sadržaj vode kod kojeg je kako bi se uklonila dodatna voda potrebna veća promjena matrične sukcije tj. dolazi do promjene u brzini izvlačenja vode iz tla. Nagib pravca ovisi o raspodjeli veličine pora, ako su pore jednake pravac će biti položeniji dok će u suprotnom nagib pravca biti strmiji. Krivulja povećanja vlažnosti (adsorpcije) razlikuje se od krivulje smanjenja vlažnosti (desorpcije) kao rezultat hidrauličke histereze povezane s procesima vlaženja i sušenja materijala. Grane retencijske krivulje za procese povećanja i smanjenja vlažnosti tla imaju slične oblike. Daljnja primjena dobivenih podataka najčešće zahtjeva opise pomoću niza empirijski jednadžbi. Najčešće varijable koje se javljaju u jednadžbama su varijabla koja je povezana s brzinom izlaska vode iz pora tla te varijabla koja se odnosi na vrijednost ulaska zraka u tlo. Parametri modela koji opisuju retencijske značajke tla prilagođavaju se, ovisno o tome promatra li se inženjerski problem povezan s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti tla. Općenito, napredni modeli koji u potpunosti mogu obuhvatiti efekte hidrauličke histereze, zbog svoje složenosti nisu našli širu primjenu u inženjerskoj praksi.

U nastavku je opisan van Genuchten-ov model kao jedan od najčešće korištenih modela za opis retencijske krivulje tla [8]. Van Genuchten predlaže korištenje troparametarsku „glatku“ jednadžbu retencijske krivulje zatvorenog oblika koje je u nastavku prikazana izrazom (4):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^m} \quad (4)$$

gdje je,

α - parametar tla ovisan o vrijednosti ulaska zraka.

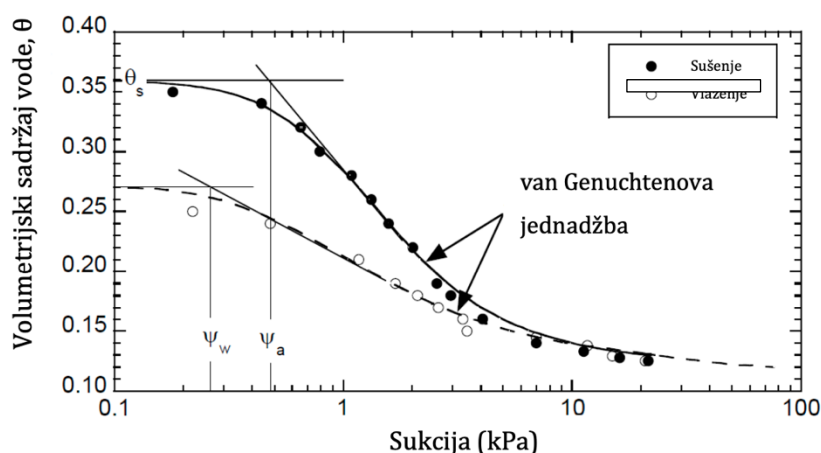
n – parametar koji opisuje nagib prijelazne zone retencijske krivulje.

m - parametar tla ovisan o rezidualnom sadržaju vode i može se procijeniti kao:
($m=1-1/n$);

θ_s - saturirani sadržaj vode.

θ_r - rezidualni sadržaj vode.

Parametar α , obrnuto je proporcionalan vrijednosti ulaska zraka. Kako čestice tla postaju sve sitnije, strmina krivulje se smanjuje, odnosno vrijednost parametra n se smanjuje. Parametri α , n i m dobivaju se nelinearnom regresijom iz mjerenih podataka (Slika 22.) [6].

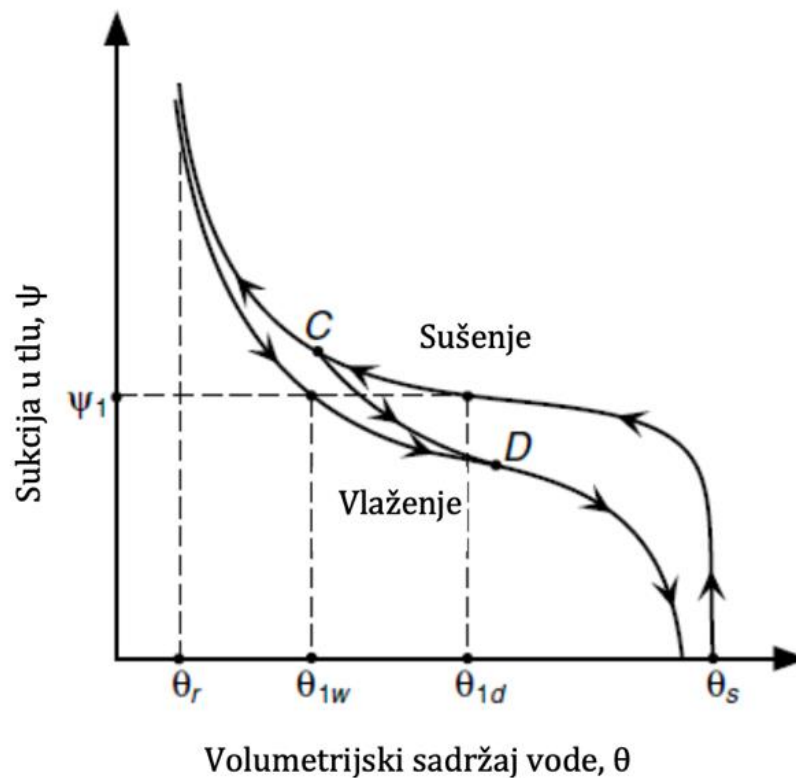


Slika 22. Retencijska krivulja za procese povećanja i smanjenja vlažnosti dobivene van Genuchtenovom jednačbom [6].

4.1. Hidraulička histereza

Hidraulička histereza ima važan utjecaj na ponašanje nesaturiranih tla. Općenito, pri jednakoj vrijednosti matrične sukcije, tlo zadržava više vode prilikom procesa isušivanja, nego prilikom povećanja vlažnosti [7]. Zbog postojanje histereze, ne postoji jedinstvena krivulja, tj. jedinstven odnos između volumetrijskog sadržaja vode i matrične sukcije. Može se reći da postoje granične krivulje za potpuni gubitak vlažnosti, od potpuno saturiranog do suhog stanja, i obratno za povećanje vlažnosti materijala, od suhog do stanja potpune saturacije. Krivulje stvarnih odnosa matrične sukcije i volumetrijskog sadržaja vode se u prirodnim uvjetima nalaze negdje između ovih krajnjih krivulja. Za histerezu je

karakteristično da tlo sadrži različitu količinu vode ovisno dali dolazi do povećanja ili smanjenja sadržaja vode u tlu [7]. Uslijed promjene vlažnosti tla tijekom infiltracije oborina ili pojačane evapotranspiracije, odnosno tijekom povećanja i smanjenja vlažnosti tla, postoji vremenski odmak kako se sadržaj vlage tla i tlak vode u porama mijenjaju kao odgovor na promjene uvjeta. Histereza utječe na nelinearnost odnosa hidrauličkih svojstava tla, volumetrijskog sadržaja vode i pornih pritisaka, što otežava predviđanje ponašanja nesaturiranog tla.



Slika 23. Histereza prisutna kod retencijskih krivulja smanjenja i povećanja vlažnosti [6].

5. PROVOĐENJE ISPITIVANJA

Nakon izgradnje modela i ugradnje svih elemenata, pristupilo se provedbi pokusa tj. ispitivanja. Prije početka potrebno je osigurati protok vode na mlaznicama koji se definira prije početka pokusa. Ispuštanjem manje količine vode iz mlaznica ujednačava se pritisak na svim mlaznicama sistema i eliminira zrak iz sustava kako bi se dobio ujednačen protok na svim granama. Pravilnim pozicioniranjem i korištenjem različitih tipova mlaznica ostvaruje se ujednačena pokrivenost oborinama cijelog modela. Također je potrebno obaviti kalibraciju mjernih uređaja te pokrenuti snimanje na dana logerima uz definiranje intervala snimanja. Kao što je prethodno navedeno, pokus se izvodi simuliranjem kiše različitih intenziteta, po cijelom modelu, te se pomoću mjernih uređaja prati hidraulički odziv modela. Mehanički odziv modela u ovom radu nije razmatran. Prije početka eksperimenta očitavanja s uređaja su konstantna, bez promjena. S eksperimentom se započinje 16.03.2023. u 10:50:30 sati otvaranjem prvih mlaznica na sve tri grane simulatora.

Plave mlaznice nalaze se na 60 cm visine iznad površine modela s kutem prskanja od 90°, tlaku od 3 bara i protokom od 36,8 l/h/m². Nakon 66 min trajanja pokusa intenzitet oborina se povećava. Intenzitet se povećava u trenutku kada očitavanja na sensorima sugeriraju ravnotežne uvjete, odnosno uspostavljanje stacionarnog tečenja u modela.

U drugom koraku pokusa otvaraju se mlaznice 404 s kutom prskanja od 60°, pri tlaku od 2 bara i protokom od 78,3 l/h/m². S obzirom na manji kut prskanja, grane mlaznica podižu se na visinu od 80 cm iznad površine modela. Uslijed porasta vlažnosti materijala i procjeđivanja oborina kroz drenažni sloj šljunka, pri dnu modela razina vode se podiže te se drenažnom cijevi odvodi iz modela kako ne bi došlo do daljnjeg podizanja razine vode u modelu i potapanja nožice koje bi ugrozilo stabilnost modela (Slika 24.).



Slika 24. Razina vode u nožici modela.



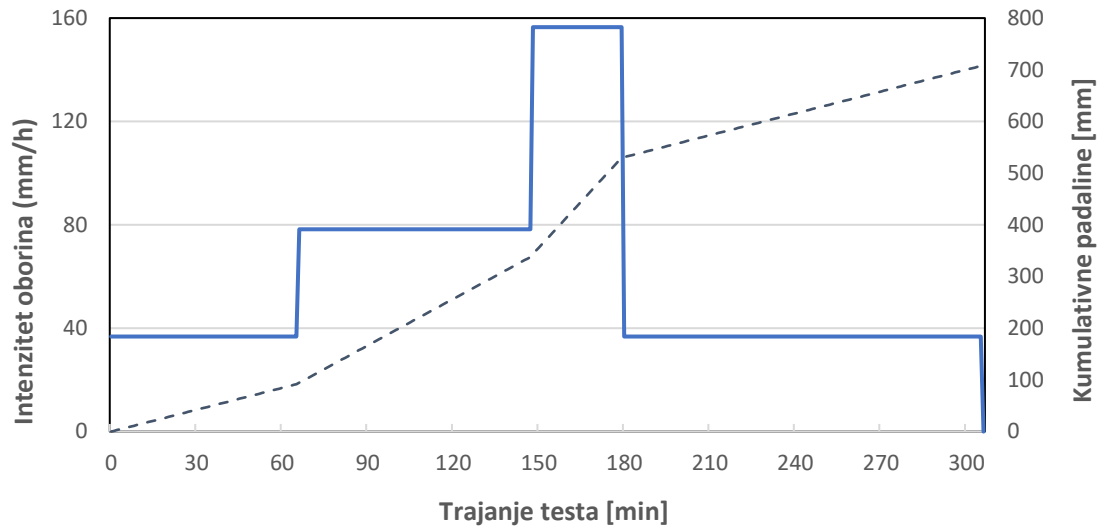
Slika 25. Prikaz modela kosine na početku pokusa.

U 13:18:30 h intenzitet oborina se dodatno pojačava otvaranjem seta mlaznica 524 s kutom prskanja od 60° i protokom od $156,5 \text{ l/h/m}^2$ pri tlaku od 2 bara. Ova mlaznice također se nalaze na visini od 80 cm. Na bočnim pleksiglas stijenkama modela vidljiva je dubina prodiranja vode u materijal. Na Slici 26. prikazana je granica napredovanja vlažne fronte nakon XY minuta od početka pokusa.

Narednih 32 min eksperimenta intenzitet oborina se ne mijenja. U 13:50:30 h intenzitet oborina se smanjuje na početnu vrijednost od $36,8 \text{ l/h/m}^2$, otvaranjem plavih mlaznica pri tlaku od 3 bara. Sve tri grane se spuštaju kako bi se mlaznice pozicionirale na visinu od 60 cm iznad površine modela s kutom prskanja od 90° . Na slici 27. dan je grafički prikaz promjene intenziteta oborina tijekom trajanja pokusa.



Slika 26. Prikaz prodiranja vode u materijal označen crvenom linijom.

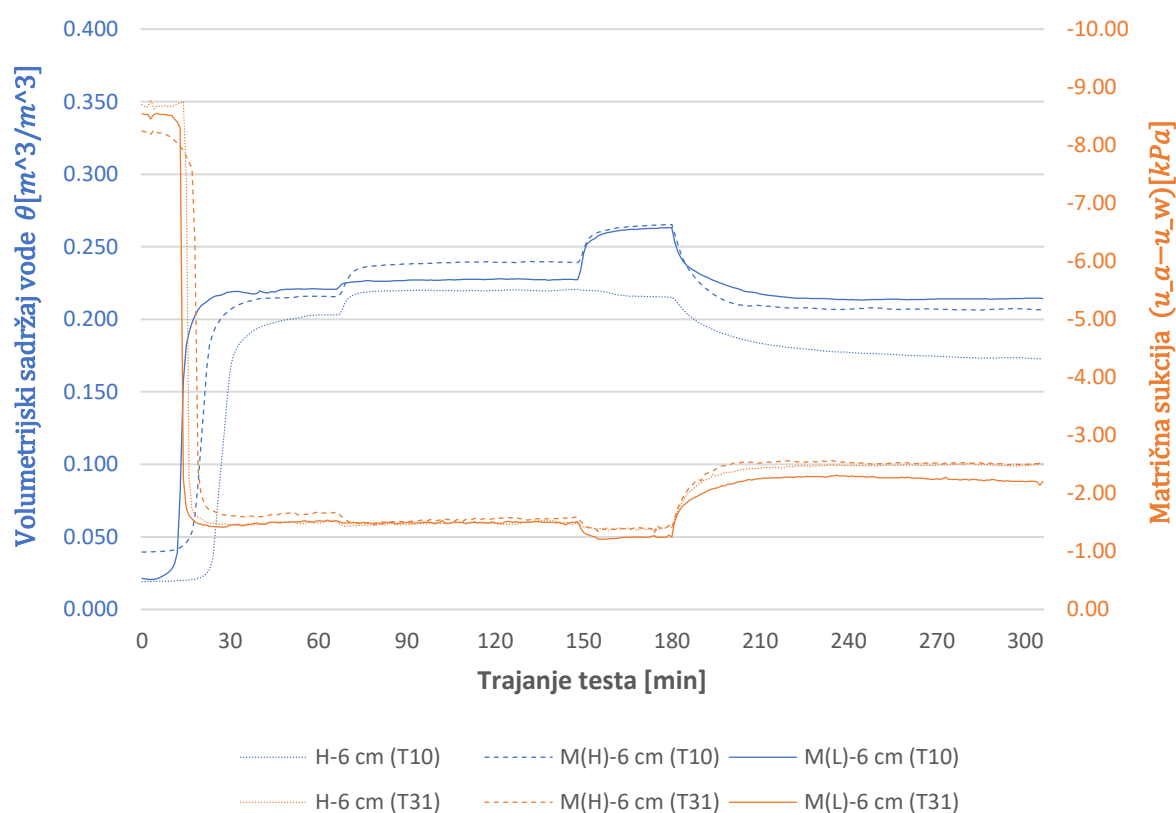


Slika 27. Grafički prikaz promjene intenziteta oborina tijekom trajanja pokusa.

Dreniranje vode u donjem dijelu (L) modela nastavljeno je do kraja pokusa. Nakon sveukupno 306 minuta trajanja eksperimenta, u 15:56:30 h, ispitivanje se privodi kraju zatvaranjem mlaznica na simulatoru oborina. Model je ostavljen da se suši dok su mjerni uređaji nastavili pratiti i bilježiti promijene.

6. INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA

Dijagram u nastavku prikazuje vrijednosti očitavanja sa senzora na ugrađenih na dubini od 6 cm na sva tri mjerna profila. Mijenjanjem intenziteta prema prethodno navedenim iznosima dešavaju se promjene (Slika 28.). Prije samoga početka pokusa, 0 minuta na prikazanom dijagramu, sadržaj vode i porni pritisci su konstantni tj. uređaji ne mjere nikakve promjene. U tom trenutku paljenjem mlaznica kreće prvi ciklus povećanja vlažnosti materijala i infiltracije vode u model, te prvi reagiraju senzori najbliži površini modela. Promjene na sensorima ne bilježe se odmah zbog vremenskog odmaka između paljenja mlaznica i dopiranja vode do senzora tj. vodi je potrebno određeno vrijeme da dođe do senzora. U dijagramu je vidljiv nagli rast mjerenih veličina: podizanje linije prema gore ukazuje na porast sadržaja vode u tlu dok se povećanje pornih pritisaka očituje iz naglog smanjenja matrične sukcije u trenutku kada je voda došla do senzora. Kada nakon nekog vremena dođe do uravnoteženja sadržaja vode i pornih pritisaka na dijagramu, grane postaju horizontalne, ostvaruju se ravnotežni uvjeti u promatranim točkama modela.



Slika 28. Grafički prikaz rezultata mjerenja na dubini od 6 cm.

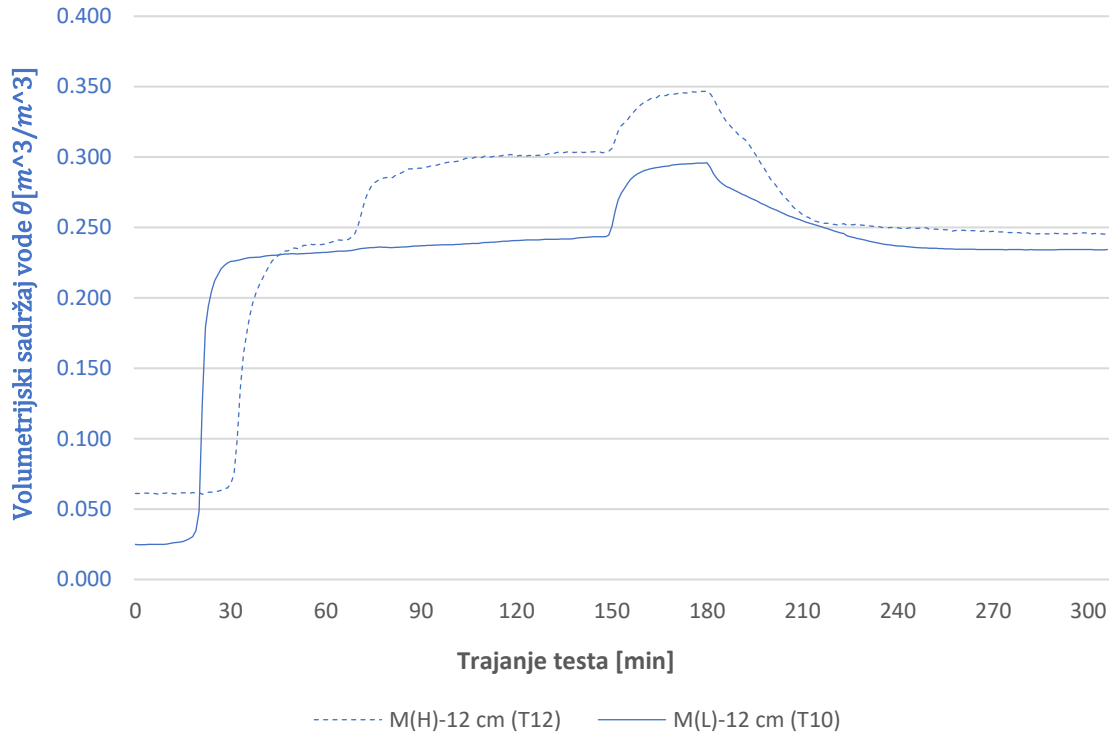
Započinje drugi ciklus povećanja intenziteta i vlažnosti materijala te se prate odgovarajuće promjene na senzorima. Postoji vremenski odmak međutim uređaji puno brže registriraju promjenu, a iznos promjena mjerenih varijabli je znatno manji. Nakon nekog vremena pritisci i vlažnost dosežu konstantne vrijednosti te grana postaje horizontalna.

Intenzitet padalina u slijedećem ciklusu je gotovo dvostruko veći te se u grafu vidi da je iznos promjene vlažnosti i pornih pritisaka veći nego u prethodnom ciklusu. Također postoji vremenski odmak s kojim senzori reagiraju u odnosu na trenutak promjene intenziteta kiše te treba više vremena da se na senzorima uspostave konstantne vrijednosti očitavanja, odnosno dosegnu ravnotežni uvjeti.

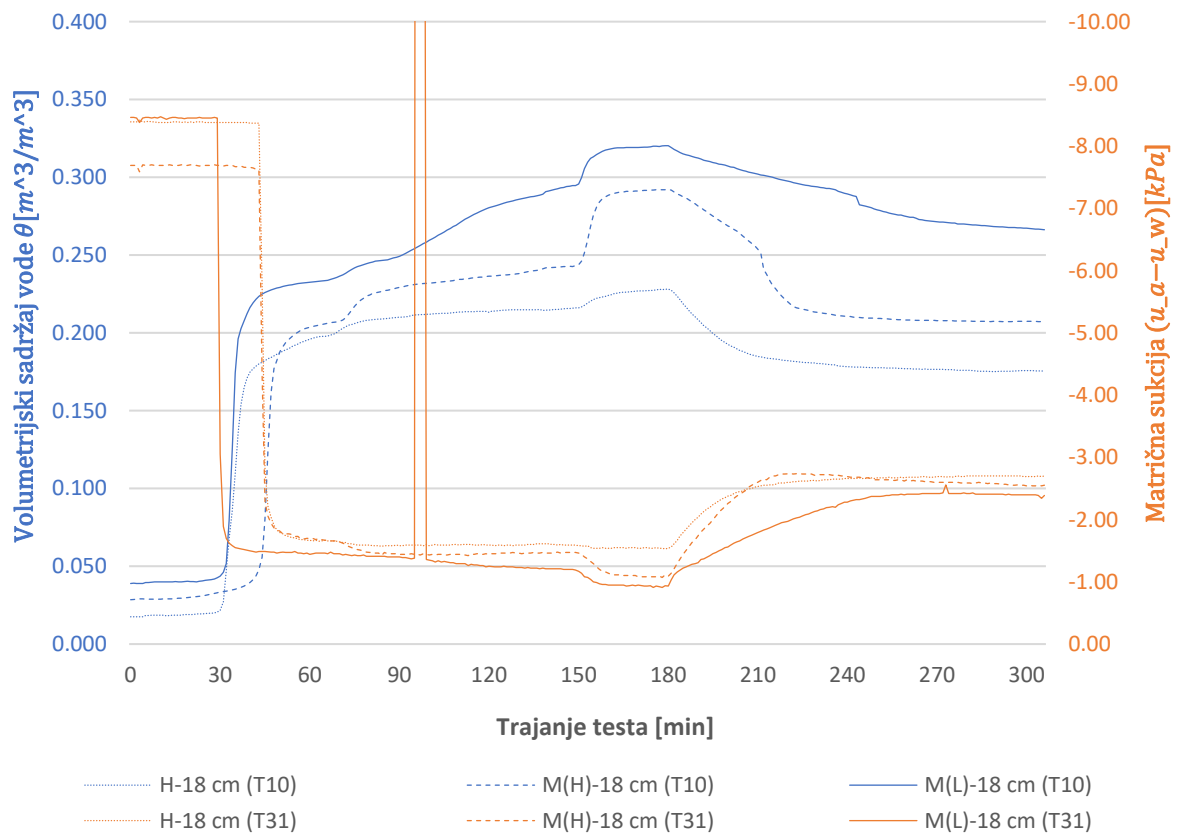
Nakon određenog vremena grane ponovno dolaze u ravnotežni, horizontalni položaj. U četvrtom ciklusu intenzitet padalina se smanjuje na početni što rezultira smanjenjem vlažnosti tla. Na grafu se ovo očituje u smanjenju volumetrijske vlažnosti tla i porastu matrične sukcije (smanjenju pornih pritisaka). Promjene se događaju s vrlo malim vremenski odmakom dok se ponovno ne ostvare ravnotežni uvjeti, odnosno dok grane ne postanu horizontalne. Poklapanje između linija i slične vrijednosti očitavanja su posljedica toga što se svi promatrani senzori nalaze na istoj dubini od 6 cm [1,3].

Sljedeći dijagram pokazuje vrijednosti očitane s senzora na referentnoj dubini od 12 cm na kojima su postavljeni samo uređaji za mjerenje vlažnosti (Slika 29.). Na ovom dijagramu su također vidljive promijene intenziteta oborina kao i na prethodnom. Uslijed mijenjanja intenziteta vidi se nagli porast, linija ide prema gore, nakon čega dolazi do uravnoteženja sadržaja vode tj. linija postaje horizontalna. Zbog malo veće dubine na kojima se nalaze senzori, vrijeme da voda dođe do njih je nešto dulje. Postupci povećanja i smanjenja vlažnosti odvijali su se u istim vremenskim intervalima, potrebno je promatrati da prilikom promjene intenziteta grane budu u ravnoteži.

Sljedeći dijagram prikazuje rezultate senzora s dubine od 18 cm od vrha modela (Slika 30.). Na mjernim profilima nalaze se i mjerači pornih pritisaka i sadržaja vode. Na dijagramu je jasno vidljiv prvi ciklus povećanja vlažnosti materijala pri početnom intenzitetu oborina od 36,7 mm/h. Tijekom prvih 30 minuta pokusa grana je praktički horizontala. Nakon dolaska infiltrirane vode do senzora linija vlažnosti tla strmo raste. U momentu dok sensor bilježi promjenu uvjeti procjeđivanja u materijalu su nestacionarni.

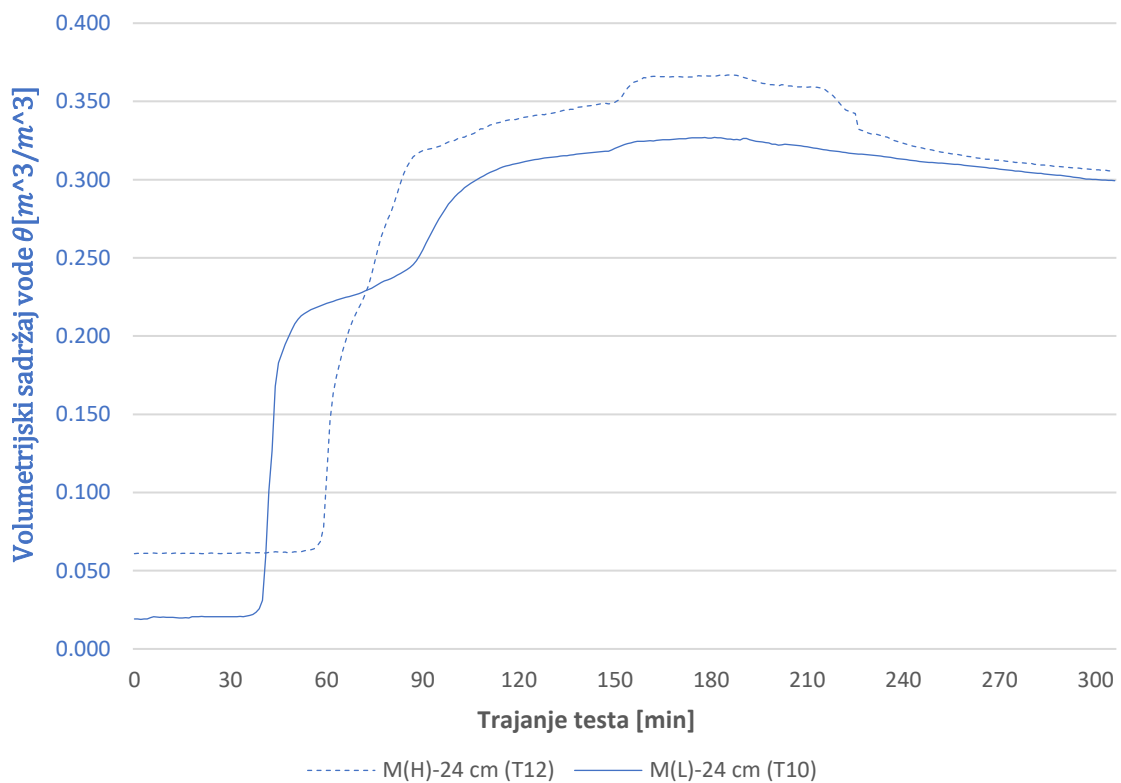


Slika 29. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 12 cm.



Slika 30. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 18 cm.

Stacionarni uvjeti tečenja javljaju se u momentu kada su grane horizontale, odnosno kada se uspostave ravnotežni uvjeti matrične sukcije i volumetrijskog sadržaja vode u promatranom volumenu tla. Sljedeći dijagram prikazuje rezultate senzora s dubine od 24 cm od vrha modela (Slika 31.). Vrijeme potrebno da voda dođe do senzora je i u ovom slučaju duže jer se senzori nalaze na još većoj dubini u modelu. Prije svake promjene intenziteta oborina koriste se zapisi sa senzora kako bi se utvrdilo da su u mjernim točkama uspostavljeni uvjeti stacionarnog tečenja. Kao i na dubini od 6 cm i ovdje se prate promjene u iznosima matrične sukcije i volumetrijske vlažnosti tla. Vrijeme do početka porasta vlažnosti od početka pokusa na dubini od 24 cm je najduže, budući da je put infiltracije kojeg voda treba proći kroz tlo do do senzora najduži. Iako su promjene slabije vidljive na dijagramu može se pratiti u kojim dijelovima je došlo do promjena intenziteta. Za svaki sljedeći ciklus povećanja i smanjenja vlažnosti materijala vremenski odmak je sve manji, senzori puno brže očitavaju i reagiraju na nastale promjene u sadržaju vode.



Slika 31. Grafički prikaz mjerenja senzora na dubini od 24 cm.

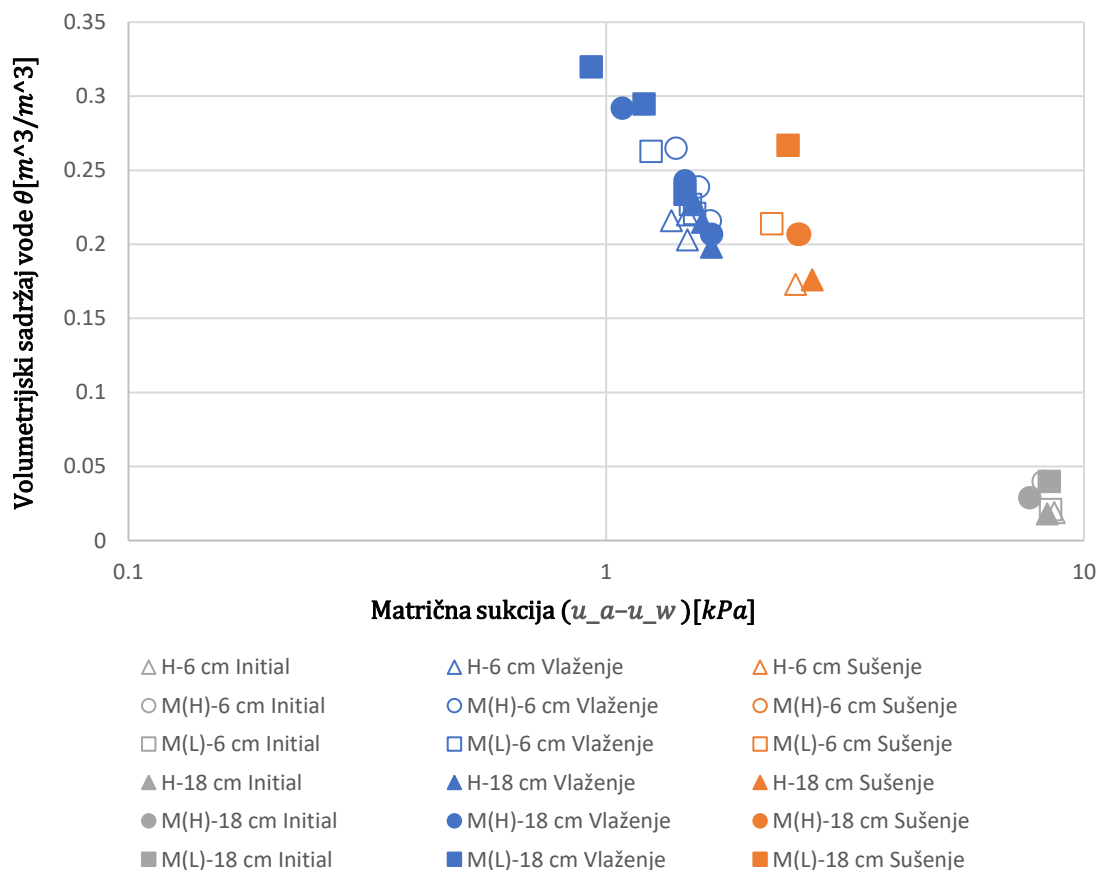
6.1. Određivanje točaka retencijske krivulje za stacionarne uvjete tečenja

Daljnjom analizom rezultata mjerenja nastoje se definirati ravnotežne vrijednosti volumetrijskog sadržaja vode i matične sukcije prilikom uspostavljanja stacionarnih uvjeta tečenja u modelu pri različitim intenzitetima oborine. Definirane vrijednosti prikazane su u tablici 4. u nastavku.

Tablica 4. Ravnotežne vrijednosti $\theta(u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete tečenja u modelu.

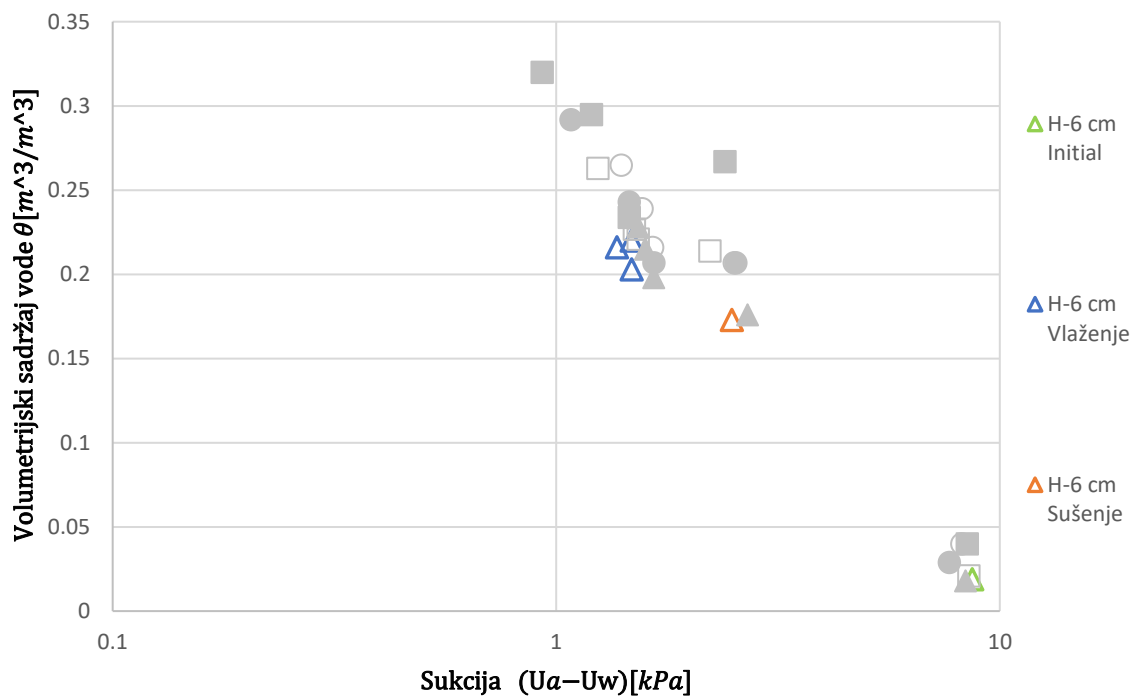
			H-6 cm	M(H)-6 cm	M(L)-6 cm	H-18 cm	M(H)-18 cm	M(L)-18 cm
Intenzitet simulirane kiše	Ir = 36,8 mm/h	Sadržaj vode θ [m ³ /m ³]	0,019	0,04	0,021	0,018	0,029	0,04
		Matrična sukcija ($u_a - u_w$) [kPa]	-8,67	-8,21	-8,51	-8,38	-7,69	-8,45
	Ir = 36,8 mm/h	Sadržaj vode θ [m ³ /m ³]	0,203	0,216	0,221	0,198	0,207	0,234
		Matrična sukcija ($u_a - u_w$) [kPa]	-1,48	-1,65	-1,53	-1,66	-1,66	-1,46
	Ir = 78,3 mm/h	Sadržaj vode θ [m ³ /m ³]	0,22	0,239	0,227	0,215	0,243	0,295
		Matrična sukcija ($u_a - u_w$) [kPa]	-1,48	-1,56	-1,5	-1,59	-1,46	-1,2
	Ir = 156,5 mm/h	Sadržaj vode θ [m ³ /m ³]	0,216	0,265	0,263	0,228	0,292	0,32
		Matrična sukcija ($u_a - u_w$) [kPa]	-1,37	-1,4	-1,24	-1,53	-1,08	-0,93
	Ir = 36,8 mm/h	Sadržaj vode θ [m ³ /m ³]	0,173	0,207	0,214	0,176	0,207	0,267
		Matrična sukcija ($u_a - u_w$) [kPa]	-2,49	-2,52	-2,22	-2,7	-2,54	-2,4

Vrijednosti definiranih parova $\theta - (u_a - u_w)$ dalje su korištene za određivanje grana retencijske krivulje ispitivanog tla za proces saturacije ili desaturacije. Točke su dobivene korištenjem prethodno prikazanih dijagrama. Na sljedećim dijagramima prikazane su točke definirane u Tablici 4 za dubine od 6 cm i 18 cm u modelu (Slika 28.). Prilikom smanjenja vlažnosti, točke na dijagramu se nalaze iznad točaka ciklusa povećanja vlažnosti materijala. Kada se u tlu smanje količina vode, odnosno pri isušivanju tla, materijal zadržava veću količinu vode nego kod procesa povećanja vlažnosti pri istoj sukuciji. Izmjerena je veća vrijednost matrične sukucije prilikom smanjenja intenziteta simulirane kiše, odnosno kod procesa smanjenja vlažnosti materijala, nego kod povećanja istih, što predstavlja hidrauličku histerezu (Slika 28. i Slika 30.). S druge strane, U nezasićenim tlima, izmjene ciklusa povećanja i smanjenja vlažnosti, mogu utjecati na promjenu stanja naprezanja u tlu [3].

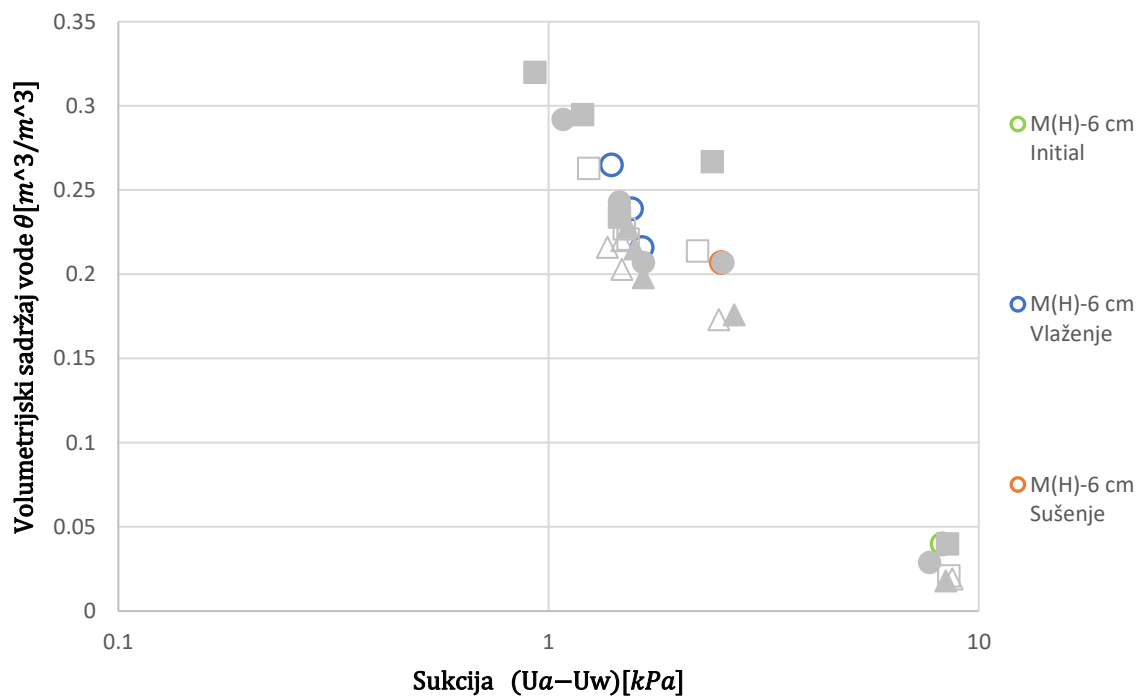


Slika 32. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za uspostavljene stacionarne uvjete tečenja u pokusu.

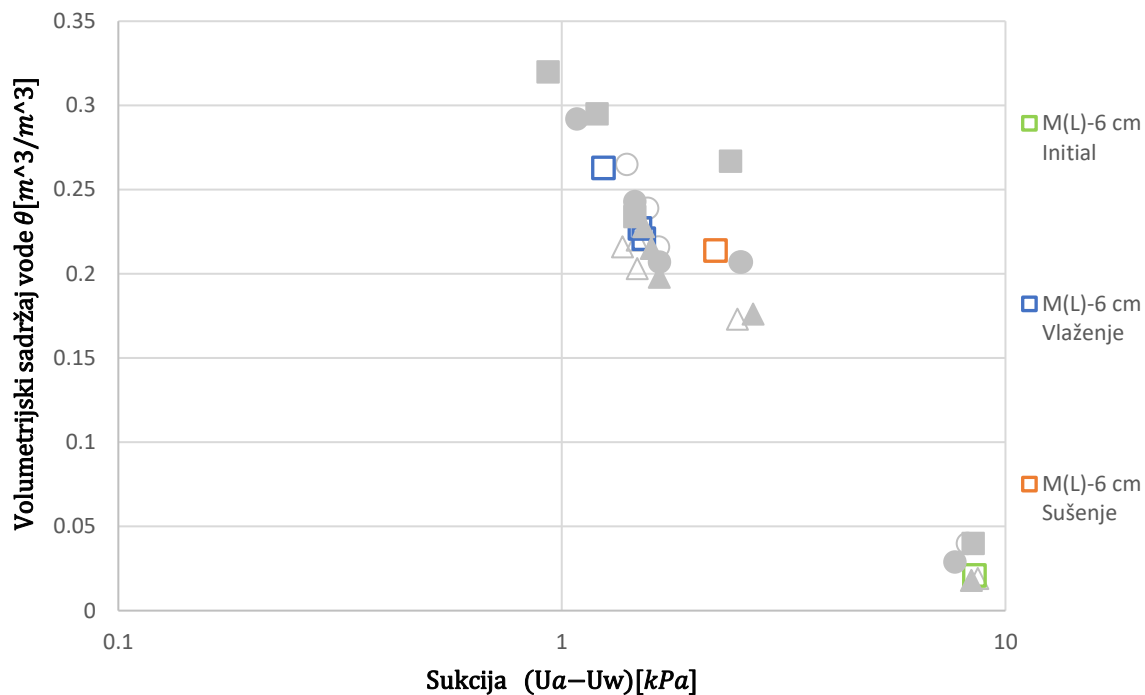
U nastavku su prikazani pojedinačni dijagrami ravnotežnih vrijednosti za stacionarne uvjete tečenja za svaku od tri mjerne grane na dubinama od 6 cm i 18 cm (Slike od 32. do 38.).



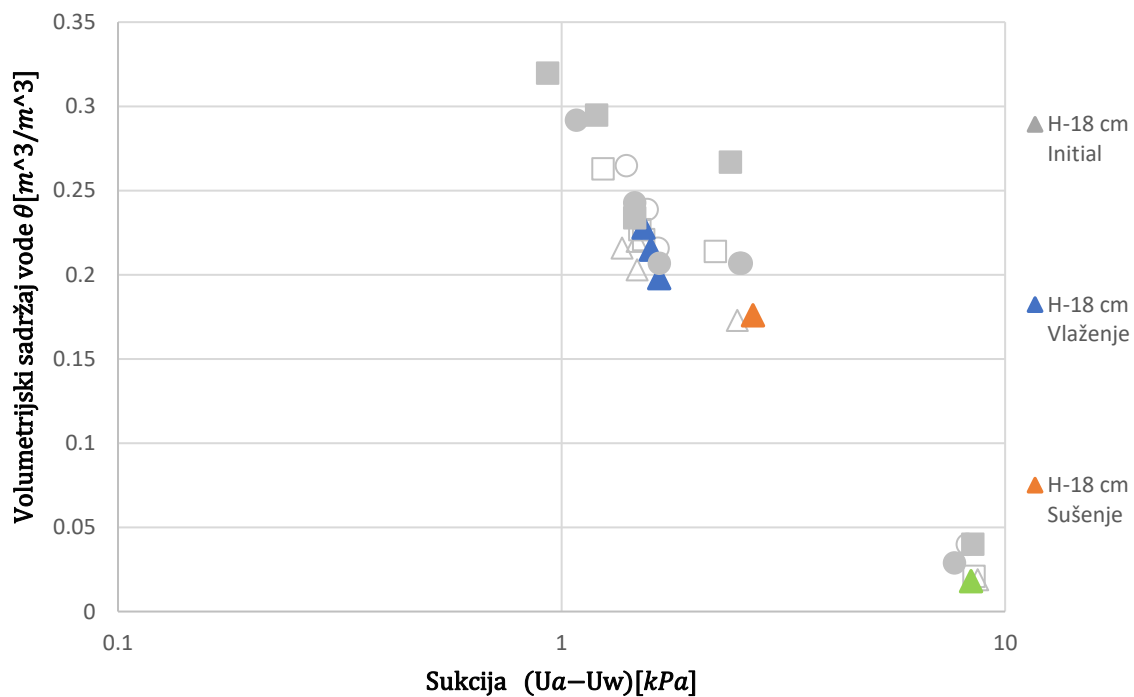
Slika 33. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.



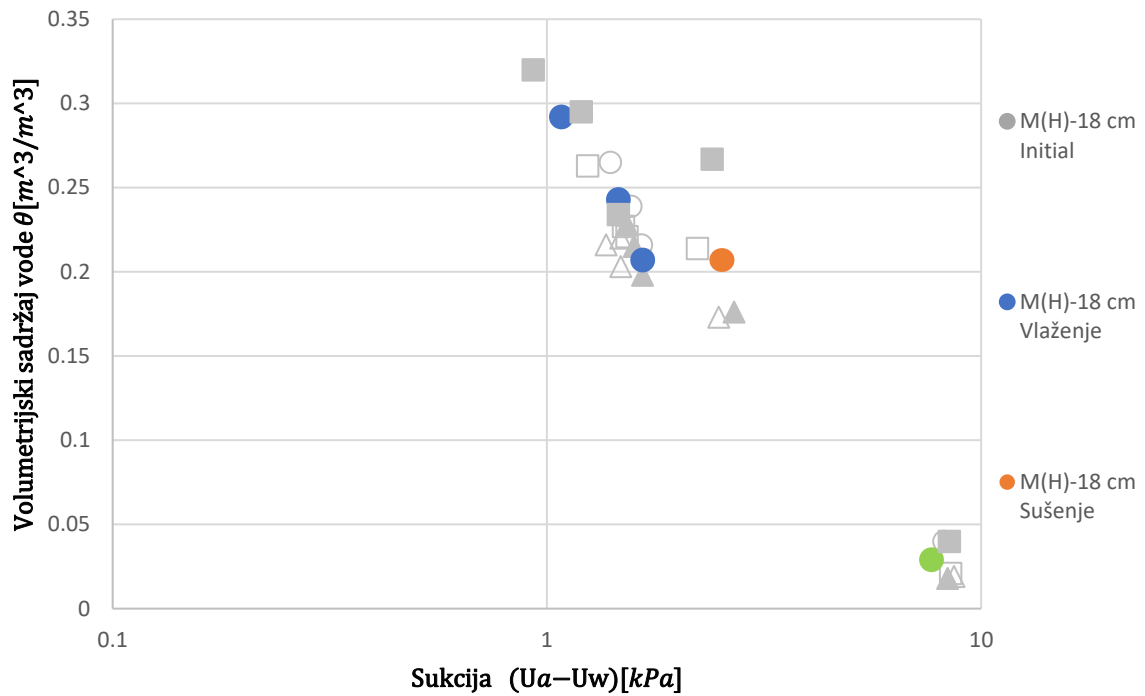
Slika 34. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.



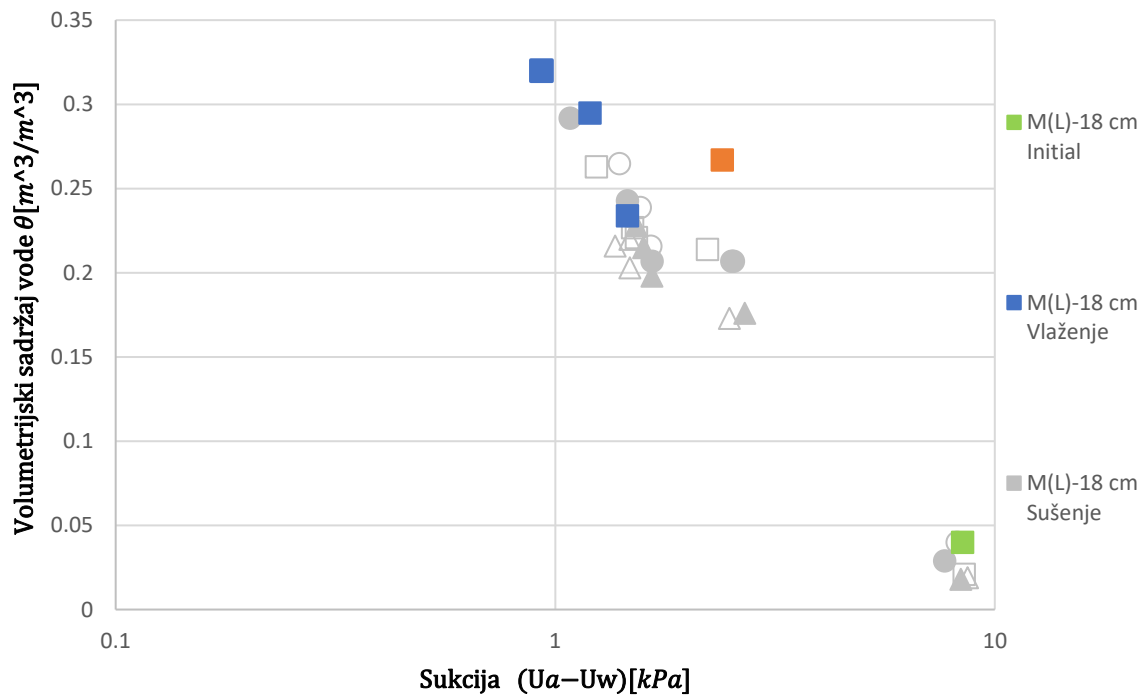
Slika 35. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 6 cm.



Slika 36. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.



Slika 37. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.



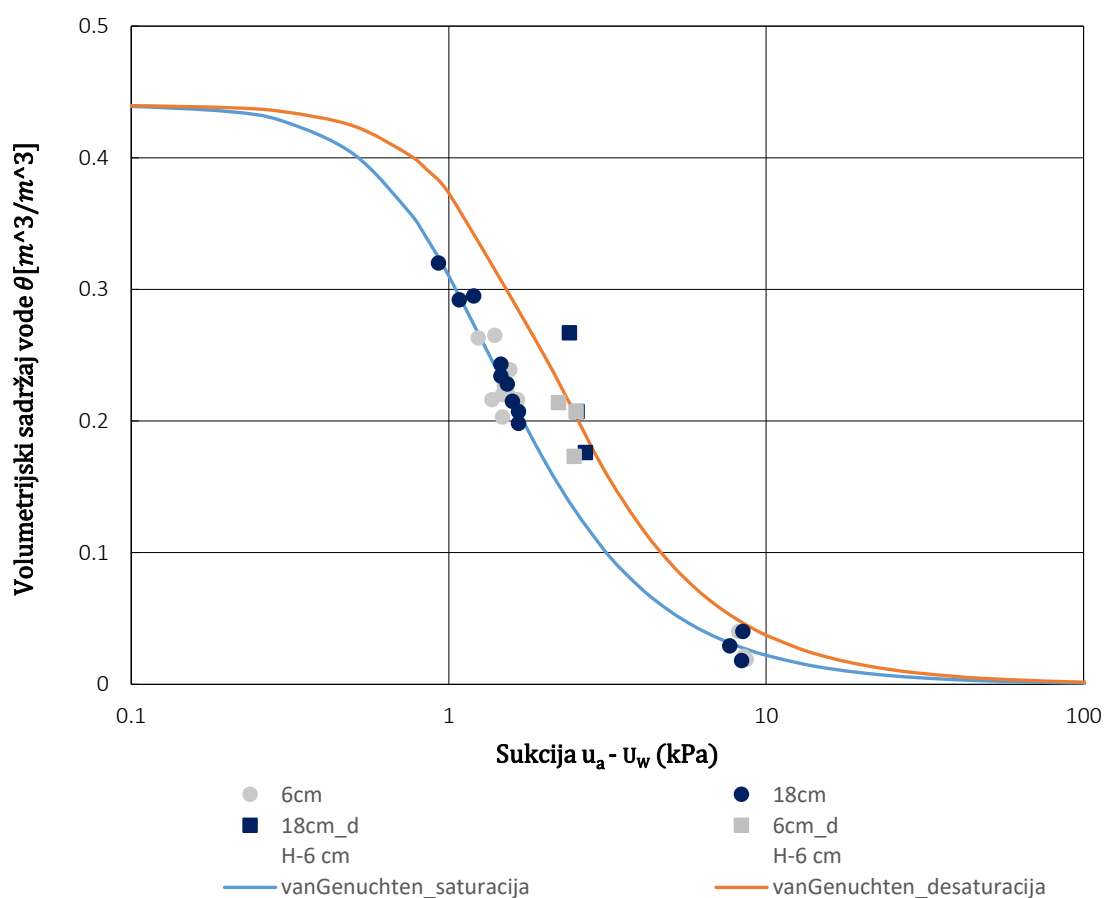
Slika 38. Dijagram ravnotežnih vrijednosti $\theta - (u_a - u_w)$ za stacionarne uvjete na dubini 18 cm.

6.2. Određivanje parametara van Genuchtenovog modela

Metodom nelinearne regresije na rezultatima mjerenja dobivene su vrijednosti parametara van Genuchtenovog modela. Parametri su dobiveni pomoću programskog dodatka programa Microsoft Excel, Alat za rješavanje (*eng. Solver*). Parametri van Genuchtenove jednadžbe krivulje retencije, za zbijenost materijala $D_r = 50\%$ prikazani su u tablici 5. u nastavku. Parametri su određeni za proces saturacije i desaturacije, kako je prikazano na slici 39. Pri određivanju obje grane retencijske krivulje pretpostavljeno je da je volumetrijska vlažnost pri saturiranim uvjetima odgovara porozitetu tla n .

Tablica 5. Parametri van Genuchtenovog modela dobiveni nelinearnom regresijom.

	θ_s (/)	θ_r (/)	AEV (kPa)	α (kPa ⁻¹)	n (/)	m (/)
Saturacija	0,44	0	0,82	0,93	2,34	0,57
Desaturacija	0,44	0	1,6	0,63	2,34	0,57



Slika 39. Krivulja retencije vode za grane saturacije i desaturacije.

7. ZAKLJUČAK

U ovom su radu prikazani dobiveni rezultati izlaganja umanjenog modela kosine, umjetnim oborinama, u laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Model kosine i rubni uvjeti prilagođeni su ispitivanju hidrauličkog odaziva modela na povećanje i smanjenje intenziteta oborina. Osobita pozornost pridaje se senzorskoj mreži pomoću koje su praćene promjene u sadržaju vlage i uvjetima pornih pritisaka u tlu. Podatci su istovremeno prikupljeni na tri mjerna profila, tijekom eksperimenta, o promjenama vlažnosti tla (TEROS 10 i 12) i pornih pritisaka (TEROS 31). Interpretirani rezultati prikazani su na dijagramima te su određene veličine za stacionarne uvjete tečenja u modelu koje su kasnije korištene za određivanje retencijskih značajki tla.

Analizom rezultata u ravnini $\theta - (u_a - u_w)$, uočava se razlika sadržaja vode i matrične sukcije pri istim intenzitetima simulirane kiše, ovisno o tome radi li se o povećanju ili smanjenju intenziteta simulirane kiše, odnosno povećanju ili smanjenju vlažnosti tla. Hidraulička histereza može biti jedan od važnijih čimbenika pri pojavi klizišta u nezasićenim tlima zbog svojeg utjecaja na nelinearne funkcije značajki tla, što otežava točno predviđanje ponašanja za realne uvjete na terenu. Hidraulička histereza fenomen je koji izravno utječe na retencijske značajke tla, time definirajući količinu vode koje se pohranjuje ili drenira iz promatranog volumena tla, kao i na značajke propusnosti tla koje, u kombinaciji s hidrauličkim gradijentima unutar kosine, kontroliraju brzinu i smjer promjene vlažnosti i pornih pritisaka u kosini. Konačno, hidraulička histereza reflektira se i na uvjete stabilnosti kosine kroz utjecaj na stanje efektivnih naprezanja u tlu iznad freatske linije.

Rezultati provedenog pokusa sugeriraju da bi za određene točke i simulirane intenzitete bila potrebna dugotrajnija izloženost simuliranom intenzitetu kiše kako bi očitavanja na dijagramu postala konstanta, odnosno kako bi se sa sigurnošću moglo utvrditi uspostavljanje stacionarnih uvjeta tečenja u modelu. Također, kako bi se dobilo više podataka za određivanje retencijske krivulje, osobito desorpcijske grane, bilo bi potrebno koristiti veći broj mjerenja, pri različitim intenzitetima oborina. Osnovna ideja rada bila je provjeriti mogućnosti korištenja fizičkih modela kosine pri istraživanju utjecaja intenziteta oborina na hidraulički odziv tla te istraživanje retencijskih svojstava tla. Porni pritisci i vlažnosti utječu na efektivna naprezanja u tlu rezultati se mogu direktno koristiti za određivanje uvjeta stabilnosti.

Eksperimentom su se pokušale simulirati realne oborine koje su najčešće povremene, različitih intenziteta, a promjenjivost uvjeta vlaženja i sušenja unutar kosine je uobičajena. U radu su opisani senzori, korištena platforma i njezine mogućnosti te postupak izrade modela. Veoma je važno bilo osigurati da se voda iz modela drenira i onemogući podizanje iste u nožici što u konačnici može rezultirati popuštanjem cijelog modela. Upotreba šljunka kao drenažnog materijala te drenažnih cijevi pokazala se kao dobar izbor jer se tijekom trajanja pokusa nisu pojavili znakovi gubitka stabilnosti kosine te je omogućeno dugo mjerenje pri relativno visokim intenzitetima simulirane oborine, odnosno uspostavljanje ravnotežnih uvjeta u modelu.

Korištenje umanjenih modela za istraživanje hidrauličke histereze i njezinog utjecaja na stabilnost kosine moguće je ukoliko se modeli pravilno koncipiraju i izvedu. Infiltracija oborina u tlo i njihov utjecaj na uvjete stabilnosti nastaviti će biti jedan od ključnih problema u geotehnici. Svaka nova saznanja esencijalna su za bolje razumijevanje pokretačkih mehanizama i varijabli koje direktno utječu na pojavu nestabilnosti. [2,3]

8. LITERATURA

- [1] Peranić, J.; Ceh, N.; Arbanas, Ž.; The Use of Soil Moisture and Pore-Water Pressure Sensors for the Interpretation of Landslide Behavior in Small-Scale Physical Models. *Sensors* 2022, 22, 7337. ; 27th September 2022.
- [2] Arbanas, Ž.; Jagodnik, V.; Peranić, J.; Pajalić, S., Prodan, M.V. and Čeh; Behaviour of sandy and clayey slopes exposed to artificial rain in small-scale model; 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 2022.
- [3] Yang, C.; Sheng, D.; Carter, J.P.; Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils; Elsevier ; 22nd November 2011.
- [4] Chen, P.; Mirus, B.; Lu, N.; Godt, J.W.; Effect of Hydraulic Hysteresis on Stability of Infinite Slopes under Steady Infiltration. ; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2017, 143, 04017041.
- [5] Fabijanić, T.; Stabilnost kosina u umanjenom modelu klizišta; diplomski rad; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; 2021.
- [6] Špoljarić, M.; Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska; diplomski rad; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; 2021.
- [7] Bago, D.; Određivanje karakteristične krivulje retencije vode metodom negativnog stupca vode; diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet ; 2017.
- [8] van Genuchten, M. Th; A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils; *SOIL SCI. SOC. AM. J.*, vol. 44, 1980
- [9] METRIC grup, Manual Web Teros10, 2018. – 2021.
- [10] METRIC grup, Manual Web Teros12, 2018. – 2021.
- [11] METRIC grup, Manual Web Teros31, 2018. – 2021.

[12] METRIC grup, Manual Web Teros21, 2018. – 2021.