

Kalibracija senzora vlažnosti tla za interpretaciju rezultata fizičkog modela kosine

Babajić, Alen

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:157:894684>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



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**

Alen Babajić

**KALIBRACIJA SENZORA VLAŽNOSTI TLA ZA INTERPRETACIJU
REZULTATA FIZIČKOG MODELA KOSINE**

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni prijediplomski studij
Geotehnika
Mehanika tla i stijena**

**Alen Babajić
JMBAG: 0114037246**

**KALIBRACIJA SENZORA VLAŽNOSTI TLA ZA INTERPRETACIJU
REZULTATA FIZIČKOG MODELA 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.



Alen Babajić

U Rijeci, 28. kolovoza 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).



doc.dr.sc. Josip Peranić

U Rijeci, 28. kolovoza 2024.

SAŽETAK

Većina problema u geotehničkom inženjerstvu povezana je s prisutnošću vode u tlu. Dok je količina vode koju saturirano tlo može sadržavati definirana količinom pora, odnosno porozitetom tla, u uvjetima parcijalne saturacije vlažnost tla zavisi o više faktora, poput retencijskih značajki tla, dubini podzemne vode, hidrauličkim značajkama slojeva i stratifikaciji, količini i vrsti vegetacije kao i složenoj interakciji koja se odvija između površinske zone tla i atmosfere. Budući da promjene vlažnosti izravno utječu na efektivna naprezanja, značajke čvrstoće, deformabilnost i propusnost nesaturiranog tla, mogućnost dugotrajnog praćenja vlažnosti tla od fundamentalnog je značaja za različite inženjerske probleme i građevine, uključujući i umjetne i prirodne kosine.

Danas se vlažnost najčešće prati pomoću senzora čija točnost varira ovisno o karakteristikama tla. Ovim radom je izvršena provjera točnosti senzora (Teros 10) na uzorku finog kvarcnog pijeska korištenog prilikom ispitivanja na fizičkom modelu kosine u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Provedbom mjerenja u laboratorijskim uvjetima na uzorcima određene zbijenosti i vlažnosti, utvrđena su odstupanja mjerenja korištenjem generičke tvorničke kalibracijske krivulje implementirane od strane proizvođača opreme, naročito u uvjetima gotovo potpune i potpune saturacije tla. Kako bi se anulirala odstupanja i povećala točnost mjerenja, proveden je postupak kalibracije senzora a dobivena kalibracijska krivulja korištena je pri interpretaciji odabranih, prethodno dobivenih, rezultata modelskih ispitivanja kosina izloženih simuliranim uvjetima oborina pri 1g uvjetima opterećenja.

KLJUČNE RIJEČI:

Vlažnost tla, senzori vlažnosti tla (Teros 10), fizički model kosine, kalibracijska krivulja, kalibracija, nesaturirano tlo

ABSTRACT

Most problems in geotechnical engineering are related to the presence of water in the soil. While the amount of water that a saturated soil can contain is defined by the amount of pores, i.e. soil porosity, soil moisture content under conditions of partial saturation will depend on several factors, such as soil retention characteristics, groundwater depth, hydraulic characteristics of layers and stratification, the amount and type of vegetation as well as the complex interaction that takes place between the surface zone of the soil and the atmosphere. Since changes in moisture content directly affect the effective stresses, strength properties, deformability and permeability of unsaturated soil, the possibility of long-term monitoring of soil moisture is of fundamental importance for various engineering problems and structures, including artificial and natural slopes.

Today, moisture content of soil is most often monitored using sensors whose accuracy varies depending on the characteristics of the soil. In this work, the accuracy of the Teros 10 soil moisture sensor was evaluated on a sample of fine quartz sand used in tests on a physical slope model in the Geotechnical laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. By performing measurements under laboratory conditions on samples with predefined density and moisture content conditions, measurement deviations were identified using the generic factory calibration curve implemented by the equipment manufacturer, especially in the range of nearly-saturated and saturated moisture conditions. To eliminate the deviations and increase the measurement accuracy, a sensor calibration procedure was performed and the obtained calibration curve was used in the interpretation of selected, previously obtained, model test results of slopes exposed to simulated precipitation conditions at 1g load conditions.

KEY WORDS:

Soil moisture, soil moisture sensors (Teros 10), physical slope model, calibration curve, calibration, unsaturated soil

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	Voda u tlu	2
2.	METODE MJERENJA VLAŽNOSTI TLA	5
2.1.	Teros 10 senzori.....	8
3.	POSTUPAK KALIBRACIJE	11
3.1.	Značajke ispitivanog tla	11
3.2.	Opis postupka	12
3.2.1.	<i>Korištena oprema</i>	12
3.2.2.	<i>Izračuni</i>	16
3.2.3.	<i>Tijek ispitivanja</i>	18
3.3.	Rezultati	22
4.	INTERPRETACIJA REZULTATA	26
4.1.	Primjena kalibracijske krivulje.....	28
5.	ZAKLJUČAK.....	34
6.	LITERATURA	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne značajke uniformno graduiranog pijeska korištenog u radu [13]	11
Tablica 2: Mase čvrstih čestica i vode za ciljan stupanj saturacije	18
Tablica 3: Rezultati mjerenja vlažnosti za S=0% do S=75%	23
Tablica 4: Rezultati mjerenja vlažnosti za S=85% i S=100% (dodavanje vode) ...	24
Tablica 5: Rezultati mjerenja pornih tlakova	25
Tablica 6: Rezultati dodavanja vode na potpuno saturiran uzorak	25

POPIS SLIKA

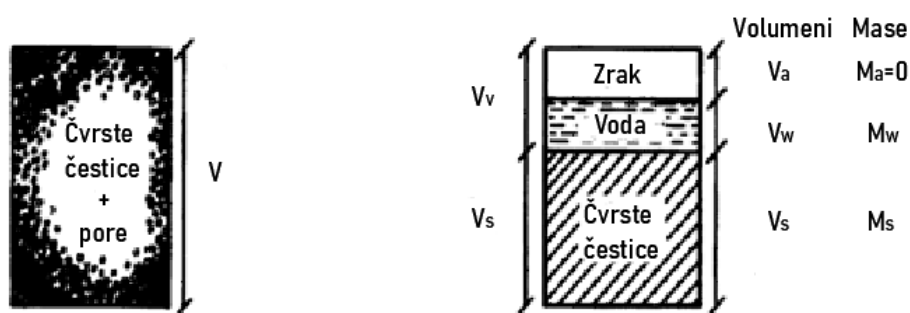
Slika 1: Realno tlo (lijevo) i idealizirani prikaz faza u tlu (desno) [1]	1
Slika 2: Dijelovi senzora TEROS 10	8
Slika 3: Prikaz volumena u kojem senzor vrši mjerenje [12].....	10
Slika 4: Teros 10 senzor.....	12
Slika 5: Teros 31 tenziometar.....	13
Slika 6: ZL6 data logger (METER Group).....	13
Slika 7:Prikaz očitavanja mjerenja u programu Zentra Utility	14
Slika 8: Plastična posuda	14
Slika 9: Vaganje preciznom vagom	15
Slika 10: Pomoćna oprema	15
Slika 11: Skica posude s potrebnim volumenima ispitivanog materijala	16
Slika 12: Preliminarno ispitivanje:potpuno suhi uzorak (lijevo), uzorak saturacije S=25% (desno)	19
Slika 13: Prikaz uzorka pri saturaciji S=50%	20
Slika 14: Točke uzimanja uzorka za potrebe gravimetrijske metode određivanja vlažnosti	20
Slika 15: Prikaz uzorka pri saturaciji S=75%	21
Slika 16: Prikaz uzorka pri proračunskoj saturaciji S=85%.....	21
Slika 17: Prikaz mjerenja promjene volumena uzorka pri 1 cm vode iznad površine	22
Slika 18: Rezultati provedenog ispitivanja	26
Slika 19: Graf kalibracijske krivulje.....	27
Slika 20: Skica fizičkog modela kosine [13].....	28
Slika 21: Presijek fizičkog modela s rasporedom mjernih uređaja [13].....	29
Slika 22: Intenzitet simulirane oborine tijekom prve faze pokusa [13]	29
Slika 23: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom prve faze pokusa za točku MH-6	30
Slika 24: Prikaz saturacije tijekom prve faze pokusa za točku MH-6.....	30
Slika 25: Prikaz dinamike oborina tijekom druge simulacije [13]	31
Slika 26: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom druge faze pokusa za točku MH-6	31
Slika 27: Prikaz saturacije tijekom druge faze pokusa za točku MH-6.....	32

Slika 28: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom prve faze pokusa za točku ML-24	32
Slika 29: Prikaz saturacije tijekom prve faze pokusa za točku ML-24	33

1. UVOD

Tlo je porozan materijal koji se sastoji od čvrstih čestica i pora, prostora između istih. Čvrste čestice sastoje se od minerala – elemenata prisutnih u Zemljinoj kori, koje tvore njegov skelet. Prostor između čvrstih čestica u tlu nazivamo porama. Budući da one mogu biti ispunjene zrakom i/ili vodom, tlo se najčešće smatra trofaznim sustavom koji se sastoji od čvrste (čestice tla), tekuće (porni fluid, najčešće voda) i plinovite faze (zrak u porama) [1].

Prirodno tlo u pravilu je nehomogeno te se za potrebe definiranja njegovih svojstava uvodi idealizirani model tla, poput onoga prikazanog na Slici 1. Takvim idealiziranim prikazom, ukupni volumen tla se promatra kao element sačinjen od tri osnovna dijela: dio volumena koji je ispunjen samo čvrstim česticama (V_s) (označava se indeksom „s“ od eng. *solid particles*, čvrste čestice), dio volumena ispunjen samo vodom (V_w) (indeks „w“ od eng. *water*, voda) i dio volumena ispunjen samo zrakom (V_a) (indeks „a“ od eng. *air*, zrak). U takvom modelu, ukupan volumen tla (V) predstavlja zbroj volumena čestica, vode i zraka u porama, odnosno zbroj volumena čestica i volumena pora (V_v) (označava se indeksom „v“ od eng. *voids*, pore), Budući da se za potrebe rješavanja praktičnih inženjerskih problema masa zraka u pravilu zanemaruje, ukupna masa tla (m) sastoji se od mase čestica (m_s) i mase vode u tlu (m_w).



Slika 1: Realno tlo (lijevo) i idealizirani prikaz faza u tlu (desno) [1]

Iz ovako definiranog dijagrama moguće je definirati različite varijable kojima se opisuju odnosi između različitih faza u tlu. Primjerice, koeficijent pora (e) predstavlja odnos volumena pora i volumena čvrstih čestica tla:

$$e = \frac{V_v}{V_s} (/) \quad (1)$$

Stupanj saturiranosti (ili stupanj zasićenosti) tla (S) predstavlja odnos volumena vode i volumena pora, a iskazuje se u postocima:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

Relativni porozitet (n) definiran je odnosom volumena pora i ukupnog volumena tla:

$$n = \frac{V_v}{V} (/) \quad (3)$$

1.1. Voda u tlu

Voda je nestišljiva faza. U tlu se pojavljuje u više oblika te se dijeli na: kemijski vezanu, higroskopnu, opnenu, kapilarnu i gravitacijsku (procjednu). Za minerale može biti kemijski vezana u obliku H^+ ili OH^- te se takva naziva kristalnom vodom, a može se vezati i kao molekula pa se naziva konstitucijskom vodom. Higroskopnom vodom smatra se vlaga koja u obliku molekularne opne adsorbira na površini čestica tla i koja se uklanja tek zagrijavanjem na $105\text{ }^\circ\text{C}$. Opnena voda se nastavlja na higroskopnu, a podrazumijeva vodu koja u tekućem obliku obavija čestice tla. Kapilarna voda je ona koja ispunjava mikropore držeći se silama površinske napetosti čestica tla. Karakterizira ju kretanje u svim smjerovima, od vlažnijeg dijela prema manje vlažnom dijelu tla. Gravitacijska voda je voda koja se pod djelovanjem gravitacije procjeđuje kroz nekapilarne (makro) pore pod utjecajem gravitacijskih sila [2].

Na prisutnost i količinu vode u tlu utječu brojni procesi te njihovi međusobni odnosi. Pozitivnoj bilanci vode u tlu pridonose oborine koje u procesu infiltracije dospijevaju u tlo. Na drugoj strani odnosno negativnoj bilanci pridonose procesi transpiracije (direktno isparavanje u atmosferu uslijed sunčeve energije) i

evaporacije (gubitak vode kroz puči biljaka). Kretanja vode u tlu mogu biti descendentna u vidu gravitacijskog cijeđenja kroz nekapilarne pore, ascendentna (kapilarno uzdizanje) te lateralna odnosno bočna i radijalna kretanja [3].

Ovisno o stupnju saturiranosti, u tlu postoje različite zone voda. Potpuno saturirano područje tla sa svim porama ispunjenim vodom naziva se zonom podzemne vode. Granica te zone nužno ne znači i granicu saturiranog i nesaturiranog tla. Uzdignuta voda uslijed djelovanja kapilarne elevacije, jednim dijelom profila također ispunjava sve pore te se to područje naziva zonom zatvorene kapilarne vode. Ostatak kapilarno uzdignute vode djelomično ispunjava pore te se to područje naziva zonom otvorene kapilarne vode. U ostatku profila, voda je zadržana molekularnim silama na kontaktima zrnaca tla što se naziva zonom adhezijske vode [4].

Prisutnost vode najčešće se opisuje i naziva pojmom vlage. Ona se u tlu može odnositi na količinu odnosno sadržaj vode ili na vodni potencijal kao varijablu koja prikazuje energetska stanje vode u tlu [5].

Vodni potencijal definiran je kao energija potrebna za prijenos infinitezimalne količine vode iz uzorka tla u referentni bazen slobodne vode. Vodni potencijal slobodne vode iznosi 0 dok je u nesaturiranom tlu iznos gotovo uvijek negativan. Ukupni potencijal dobiva se zbrojem matričnog, osmotskog, gravitacijskog i tlačnog potencijala. Potencijal predstavlja energiju po jedinici mase, no uvodeći gustoću vode, potencijal se može i najčešće se sagledava kao tlak s mjernom jedinicom u kPa [5].

Vlagu se češće opisuje u vidu količine ili sadržaja vode u tlu. Takva vlažnost može se predočiti odnosom masa ili odnosom volumena. Prva vrsta vlažnosti se stoga zove gravimetrijskom vlažnošću (w) koja je definirana odnosom mase vode i mase suhih čestica tla te se izražava u obliku postotka. Najčešće se određuje direktnom gravimetrijskom metodom opisanom u nastavku rada, prema izrazu:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 (\%) \quad (4)$$

Druga vrsta vlažnosti zove se volumetrijskom vlažnošću (θ). Najčešće se koristi kod senzorskih mjerenja, a dobiva se odnosom volumena vode koji se nalazi u tlu i ukupnog volumena što ga tlo zauzima:

$$\theta = \frac{V_w}{V} (l) \quad (5)$$

Navedene vlažnosti se mogu dovesti u međusobnu korelaciju gdje je volumetrijska vlažnost jednaka umnošku gravimetrijske vlažnosti i suhe rastresite gustoće tla:

$$\theta = w \cdot \rho_b \quad (6)$$

Voda u tlu jedno je od glavnih područja interesa mehanike tla. Promjenom količine vode u tlu, odnosno vlažnosti tla, dolazi do promjene čvrstoće i ponašanja tla. Današnja situacija s naglim klimatskim promjenama dovela je do velikih varijacija u uvjetima vlažnosti tla. Te varijacije uzrokuju sve učestalije reaktivacije i pojavljivanja novih nestabilnosti, najčešće na kosinama u vidu klizišta. Taj problem doveo je do potrebe kontinuiranih praćenja ponašanja klizišta na terenu kao i do potrebe simulacije u laboratorijima. Prate se brojni parametri, a jedan među njima je vlažnost tla. Praćenje vlažnosti najčešće se vrši sensorima čiji rezultati mogu odstupati od stvarnih vrijednosti. Upravo je cilj ovog rada provjeriti vjerodostojnost rezultata i po mogućim odstupanjima izvršiti kalibraciju mjernog uređaja (TEROS 10) koji se konkretno koristio u ispitivanju fizičkog modela kosine provedenog na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Kalibracijom rezultata žele se postići točniji rezultati mjerenja, čime se osigurava bolji uvid u stvarno ponašanje kosine pri određenoj vlažnosti. U radu će se objasniti više mogućih metoda određivanja vlažnosti te način rada korištenog senzora. Detaljno će biti opisan postupak laboratorijskog ispitivanja i kalibracije uređaja. Konačno, dobivena kalibracijska krivulja koristiti će se pri interpretaciji rezultata dobivenih na fizičkom modelu kosine ispitivanom u laboratorijskim uvjetima.

2. METODE MJERENJA VLAŽNOSTI TLA

Tijekom povijesti razvile su se mnogobrojne metode određivanja vlažnosti tla. Prve metode bile su one vizualne. Bazirale su se, kao što i sam naziv govori, na vizualnim pregledima tla. Takve metode nisu bile pouzdane i ovisile su o subjektivnim procjenama pojedinca [6].

Nastankom i razvojem mjerne opreme, količinu vode u tlu postalo je moguće odrediti matematičkim putem odnosno računanjem dnevne referentne evapotranspiracije. Matematički izračun se još naziva vodnom bilancom koju je moguće dobiti pomoću više formula i različitih parametara. Točnost ove metode ovisi o broju razmatranih parametara, gdje više parametara u pravilu podrazumijeva i bolju točnost. S druge strane, veći broj parametara znači i složeniji proces koji iziskuje više uložnog vremena te opreme. U metodu mogu biti uključeni razni parametri poput minimuma i maksimuma vlage, temperature zraka, brzine vjetra, Sunčevog zračenja, količine oborina i brojnih drugih. Sama metoda nije najprikladnija i najbrža za određivanje količine vode zbog broja parametara i njezine složenosti [6].

Najpouzdaniji i najprecizniji podatci o količini vode u tlu dobiveni su gravimetrijskom metodom. To je izravna metoda kojom se utvrđuje masa vode u uzorku tla. Postupak utvrđivanja vlažnosti ovom metodom podrazumijeva: vaganje vlažnog uzorka, sušenje uzorka na temperaturi od 105°C u periodu od 24 sata te vaganje osušenog uzorka tla. Razlika u masama vlažnog i suhog uzorka predstavlja masu vode u tlu, a stavljanjem u omjer masu vode s masom suhog uzorka dobiva se gravimetrijska vlažnost tla (prethodno definirana izrazom (1)) koja je najčešće prikazana u postocima. Ova je metoda također složena i, budući da podrazumijeva izravno mjerenje na prikupljenim uzorcima tla, nije praktična za kontinuirana mjerenja. Najviše se koristi u laboratorijskim ispitivanjima i kalibracijama uređaja za mjerenje vlažnosti tla [7].

Potreba za jednostavnijim i bržim načinom određivanja vlažnosti u tlu dovela je do razvoja senzora koji ubrzo postaju najraširenijom korištenom metodom mjerenja vlažnosti tla. Senzorske metode najčešće se dijele na in-situ razorne te na nerazorne metode mjerenja.

In-situ razorne senzorske metode omogućuju određivanje pornih tlakova kao i količine vode u tlu. Senzori pomoću kojih se dobivaju podatci o pornim tlakovima su tenziometri te gips blokovi. Tenziometar je uređaj koji se sastoji od zatvorene cijevi napunjene vodom, specijalno vakuumiranog brojčanika i poroznog vrha koji se postavlja u zemlju na željenu dubinu. Kod suhих uvjeta, voda se izvlači iz uređaja, smanjujući količinu vode unutar i stvarajući podtlak koji se onda očitava na brojčaniku. Vrijednosti na brojčaniku bit će negativnije ako tlo ima što manju vlažnost. U suprotnoj situaciji, prilikom vlaženja tla, tlak nastao tijekom suhих uvjeta sada uvlači vodu iz tla natrag u uređaj, a brojčanik se pomiče iz negativnih prema pozitivnim vrijednostima. Gips blokovi su uređaji koji očitavaju porne pritiske indirektnom metodom, odnosno preko električne vodljivosti tla kao medija. Sastoje se od dviju elektroda koje se nalaze unutar gipsanog konusa [6,8].

Danas se najviše upotrebljavaju in-situ razorne senzorske metode bazirane na mjerenju elektromagnetne relativne permitivnosti, odnosno dielektrične konstante. Dielektrična konstanta može se sagledavati kao sposobnost skladištenja električnog naboja, a sastoji se od stvarne i imaginarne komponente. Svaka faza tla ima zasebnu konstantu. Za zrak ona iznosi 1, za čvrste čestice oko 5 te za tekuću vodu oko 80. Iz navedenog je vidljivo da dielektrična konstanta tla uvelike ovisi o vodi te se kao takva može dovesti u korelaciju s količinom vode odnosno s volumetrijskom vlažnosti tla. Problem ovakvog mjerenja je imaginarna komponenta dielektrične konstante na čiju vrijednost može utjecati salinitet tla, temperatura, poroznost i prisutnost organskih tvari [9,10].

Najpoznatiji senzori koji koriste dielektričnu metodu mjerenja su tzv. TDR i FDR senzori, a još postoje senzori koji rade na principu kapacitivnosti te otpornosti.

TDR (eng. *Time Domain Reflectometry*) senzori temelje se na vremenskoj reflektometriji, odnosno na principu radara. Senzor odašilje signal u tlo, a zatim mjeri vrijeme potrebno da se signal reflektira i vrati prema prijemu. Analizom reflektiranih signala i vremena kojim su signali putovali, senzor određuje dielektričnu konstantu, a posljedično i sadržaj vode u tlu [8]. TDR senzori smatraju se vrlo točnim uređajima. Signal koji senzor emitira sadrži niz frekvencija što anulira utjecaj pH na rezultat, a također ovim sensorima moguće je odrediti i salinitet tla [10]. Nedostaci ovakve metode su vrlo visoke cijene samih senzora i popratne opreme, veći zahtjevi

za električnom energijom te ograničenja pri korištenju uređaja u mediju s vrlo visokim sadržajem soli ili gline [6,10].

Iako se tijekom godina TDR tehnologija unapređivala u cilju postizanja još točnijih rezultata i pristupačnijih cijena, kao značajno jeftinija varijanta dielektričnih senzora koristi se FDR tehnologija. FDR (eng. *Frequency Domain Reflectometry*) senzori su uređaji temeljeni na frekvencijskoj reflektometriji. Ovi uređaji određuju dielektričnu konstantu mjerenjem varijacija frekvencija odnosno maksimalne rezonantne frekvencije u tlu i povezuju te podatke s količinom vode. FDR senzori rade pri nižim frekvencijama od TDR senzora, što može rezultirati time da imaginarna komponenta dielektrične konstante bude podložnija pogreškama. Greške u mjerenjima najčešće su izazvane nepovoljnom teksturom, električnom vodljivošću i temperaturom tla. Također, pogreške pri mjerenju mogu biti izazvane zračnim prazninama između senzora i ispitivanog tla. Praznine najčešće nastaju nepažljivom ugradnjom uređaja [9,10].

Od invazivnih metoda valja još spomenuti određivanje vlage tla praćenjem termalnih karakteristika kao što su temperatura, specifični toplinski kapacitet, toplinska provodljivost i toplinska difuznost [6].

Postoje i senzori vlažnosti koji su bazirani na radioaktivnom zračenju. Prije svega tu se misli na neutronske sonde i senzore gama zračenja. Prva metoda se zasniva na ubacivanju sonde ispunjene radioaktivnim elementom u tlo. Raspadom radioaktivnog elementa u sondi oslobađaju se neutroni koji se oslobođenjem kreću velikim brzinama prilikom čega dolazi do sudaranja s atomima u tlu. Rezultat sudara je smanjena brzina kojom se neutron nastavlja kretati. Zanimljiva je činjenica da se najveće smanjenje brzine kretanja neutrona događa prilikom sudara s atomima vodika koji se obično u tlu pojavljuju kao dio molekula vode. Praćenjem brzine kretanja neutrona moguće je odrediti količinu vodika u tlu odnosno količinu vode i vlažnost tla [8]. Senzori gama zračenja rade sličnim principom kao i neutronske sonde gdje intenzitet zračenja ovisi o prisustvu vode. Senzori, mjerenjem intenziteta gama zraka koje prolaze tlom, indirektno određuju količinu vode na način da veće smanjenje intenziteta označava veće, a manje smanjenja intenziteta manje količine vode u tlu. Navedene metode ne iziskuju značajna razaranja strukture tla, do te mjere da se smatraju neinvazivnima. Dobiveni rezultati prilično su točni, iako neutronske sonde imaju smanjenu preciznost u određenim vrstama tla. Neki od

nedostataka su: potrebno duže vrijeme za očitavanje vlage u tlu (neutronske sonde), visoka cijena i opasnost po zdravlje ljudi što zahtjeva stručno i pažljivo rukovanje [11].

Kao potpuno neinvazivan način određivanja vlažnosti, potrebno je spomenuti metodu spektralne refleksije. Metoda se bazira na tome da voda kao medij apsorbira zračenje u infracrvenom području te time onemogućava refleksiju infracrvenih zraka. Tijekom ispitivanja tlo se zrači, a praćenjem reflektiranosti zraka može se doći do zaključka u kojoj je količini voda zastupljena u tlu. Prednost metode je primjena na velikoj površini. Točnost ovakvog ispitivanja najviše ovisi o čimbenicima koji, osim vode, utječu na reflektiranje zraka. Prije svega tu se misli na organske tvari u i na tlu te na strukturu tla [6].

2.1. Teros 10 senzori

Teros 10 je senzor vlažnosti tla čiji će se rezultati ovim radom kalibrirati i interpretirati. Uređaj je proizveden od strane METER grupacije, a sastoji se od: dvije čelične, nehrđajuće igle dužine 5,4 centimetara, tijela dimenzija 5,1x2,4x2,1 centimetara te od kabla s feritnom jezgrom koja je od tijela udaljena 7,6 centimetara i služi za izolaciju od mogućih smetnji u sustavu tijekom vršenja mjerenja [12]. Prikaz senzora s njegovim sastavnim dijelovima prikazan je Slikom 2.



Slika 2: Dijelovi senzora TEROS 10

Samo mjerenje vrši se in-situ invazivnom metodom koja je bazirana na određivanju dielektrične konstante tla pomoću elektromagnetskog polja. Igle senzora se opskrbljuju oscilirajućim valom od 70 MHz te se pune prema dielektričnosti tla. Vrijeme punjenja proporcionalno je dielektričnoj konstanti odnosno vlažnosti. Senzor mikroprocesorom mjeri potrebno vrijeme punjenja i daje neobrađene RAW vrijednosti na temelju prividne dielektrične permitivnosti tla. Zatim se neobrađene RAW vrijednosti pretvaraju u volumetrijsku vlažnost služeći se standardnom kalibracijskom krivuljom koja ovisi o vrsti ispitivanog tla [12].

Sve krivulje su polinomi 3. stupnja, što se prema tvorničkim uputama smatra dovoljno točnim. Postoje kalibracijske krivulje za mineralna tla i mineralima siromašna tla. Također, jednadžbe krivulja ovise o tome je li se koristio METER data logger ili logger ostalih proizvođača.

Kalibracijska jednadžba za mineralna tla u slučaju korištenja data logera tvrtke METER glasi:

$$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3) = 1,895 \cdot 10^{-10} \cdot \text{RAW}^3 - 1,222 \cdot 10^{-6} \cdot \text{RAW}^2 + 2,855 \cdot 10^{-3} \cdot \text{RAW} - 2,154 \quad (7)$$

U suprotnom, jednadžba za mineralna tla je sljedeća:

$$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3) = 4,824 \cdot 10^{-10} \cdot \text{mV}^3 - 2,278 \cdot 10^{-6} \cdot \text{mV}^2 + 3,898 \cdot 10^{-3} \cdot \text{mV} - 2,154 \quad (8)$$

Kalibracijska jednadžba za tla siromašna mineralima i pri korištenju METER data logera glasi:

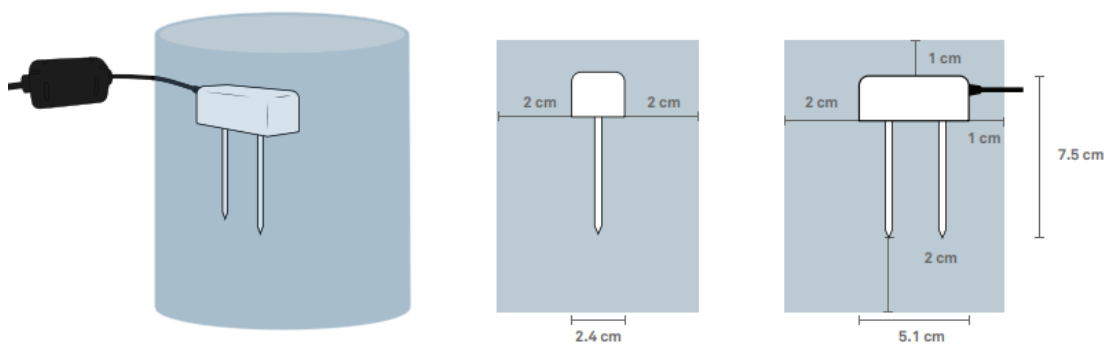
$$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3) = 2,137 \cdot 10^{-10} \cdot \text{RAW}^3 - 1,465 \cdot 10^{-6} \cdot \text{RAW}^2 + 3,566 \cdot 10^{-3} \cdot \text{RAW} - 2,683 \quad (9)$$

Ako se koristio data logger ostalih proizvođača, jednadžba mineralima siromašnog tla dana je u sljedećem obliku:

$$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3) = 5,439 \cdot 10^{-10} \cdot \text{mV}^3 - 2,731 \cdot 10^{-6} \cdot \text{mV}^2 + 4,868 \cdot 10^{-3} \cdot \text{mV} - 2,683 \quad (10)$$

Raspon volumetrijske vlažnosti koju senzor može registrirati kao i točnost, također ovisi o ispitivanom tlu. Za mineralna tla raspon volumetrijske vlažnosti kreće se od 0 do 0,64 m³/m³, a točnost u granicama ±0,03 m³/m³ za salinitet manji od 8 dS/m. Kod mineralima siromašnog tla moguće je da senzor očita vlažnost u rasponu

od 0 do $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a točnost bude $\pm 0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pri salinitetu manjem od 8 dS/m . Teros 10 nesmetano može vršiti mjerenja na temperaturama od -40 do $+60 \text{ }^\circ\text{C}$, a volumen tla u kojem senzor osjeti prisutnost vode iznosi 430 mL (Slika 3). Minimalno potrebno vrijeme za očitavanje vlažnosti iznosi 10 ms [12].



Slika 3: Prikaz volumena u kojem senzor vrši mjerenje [12]

3. POSTUPAK KALIBRACIJE

Postupak kalibracije iziskuje razumijevanje značajki tla koje se ispituje. Potrebno je pripremiti strategiju na koji način postupak provesti i što sve koristiti prilikom eksperimenta. Dobrim planom i proračunom, sam postupak ispitivanja vrlo se lako realizira. Po završetku praktičnog dijela i s dovoljnom bazom rezultata senzorskih mjerenja vrši se kalibracija uređaja Teros 10.

3.1. Značajke ispitivanog tla

Ispitivanje se provodi na čistom kvarcnom pijesku ujednačene granulacije čije osnovne značajke su prikazane u Tablici 1. Ovakva vrsta materijala vrlo često se koristi pri ispitivanju umanjenih fizičkih modela u geotehnici, primjerice umanjenih modela kosina izloženih uvjetima simulirane oborine pri 1g uvjetima opterećenja, kakvi se provode u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Tablica 1. Osnovne značajke uniformno graduiranog pijeska korištenog u radu [13]

Parametar	Oznaka (jedinica)	Vrijednost
Specifična gustoća	$G_s (/)$	2,70
Suha gustoća	$\rho_d (g/cm^3)$	1,52
Ukupna gustoća	$\rho_t (g/cm^3)$	1,55
Veličine zrna	$D_{10}/D_{60} (mm)$	0,19 / 0,37
Koef. uniformnosti	$c_u (/)$	1,947
Min./max. koef. pora	$e_{min} (/) / e_{max} (/)$	0,64 / 0,91
Koef. propusnosti	$k_s (m/s)$	1E-05
Kut trenja	$\Phi (^{\circ})$	34,9
Kohezija	$c (kPa)$	0
Inicijalni porozitet	$n_i (/)$	0,44
Inicijalni koeficijent pora	$e_i (/)$	0,78
Inicijalna relativna gustoća	$Dr_i (/)$	0,5
Inicijalna vlažnost	$w_i (%)$	2

3.2. Opis postupka

Postupak kalibracije zamišljen je tako da se tlo, u ovom slučaju uniformno graduiran kvarcni pijesak, dovodi do prethodno definiranih (različitih) stupnjeva saturacije prilikom čega se bilježe mjerenja TEROS 10 senzora koji su postavljeni pravilno na dva načina objašnjena u nastavku. S ciljem da se kalibracijom obuhvati širok raspon uvjeta vlažnosti tla, odabrani stupnjevi saturacije iznosili su 0, 25, 50, 75, 85 te 100 posto. Poznavajući stvarno (kontrolirano) stanje vlažnosti tla i po provedenom ispitivanju rezultate senzorskih mjerenja za svaki stupanj saturiranosti, moguće je dobiti korelacijski odnos- kalibracijsku krivulju.

3.2.1. Korištena oprema

Tijekom ispitivanja korišteno je slijedeće:

- 4 komada TEROS 10 senzora proizvođača METER Group serijskih brojeva: T10-04322; T10-04359; T10-04277; T10-04274.



Slika 4: Teros 10 senzor

- 2 komada TEROS 31 tenziometara METER Group serijskih brojeva T31-339; T31-117



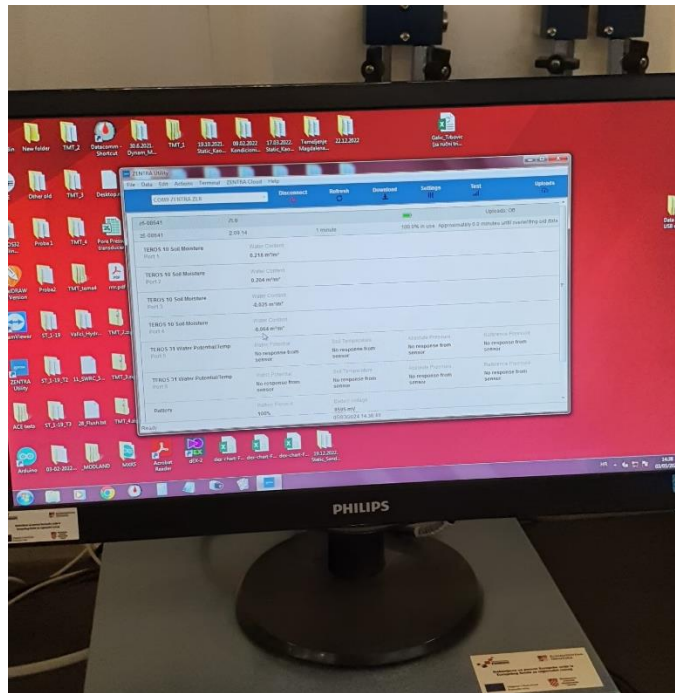
Slika 5: Teros 31 tenziometar

- Data logger s automatskim prijenosom podataka (ZL6) proizvođača METER Group



Slika 6: ZL6 data logger (METER Group)

- Računalna konfiguracija s programom Zentra Utility pomoću koje se vrši uvid u senzorska mjerenja



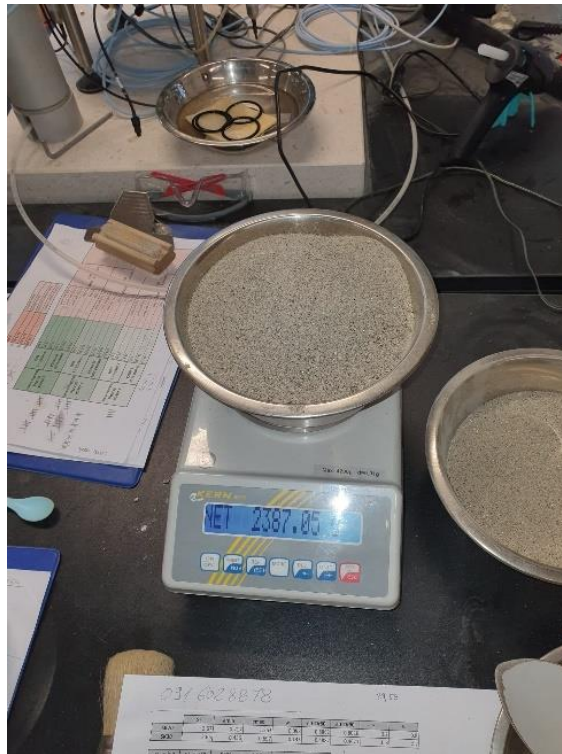
Slika 7: Prikaz očitavanja mjerenja u programu Zentra Utility

- Posuda u koju se ugrađuje tlo. Zbog lakšeg određivanja volumena ima ravne i međusobno okomite stranice. Također je plastična kako bi se izbjegle smetnje u elektromagnetskom polju i eventualni gubitci vlažnosti tla uslijed upijanja.



Slika 8: Plastična posuda

- Precizna vaga



Slika 9: Vaganje preciznom vagom

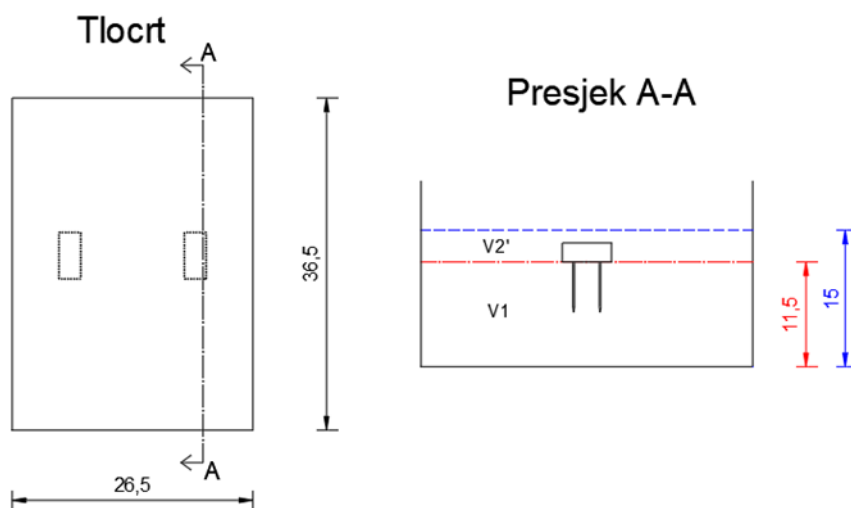
- Pomoćne posude, oprema za miješanje i ugrađivanje tla, pomično mjerilo (šubler), ljepljiva traka itd.



Slika 10: Pomoćna oprema

3.2.2. Izračuni

Zamišljeno je da se senzori ugrađuju na dva načina. U prvom slučaju senzori su ugrađeni na način da se samo igle nalaze u tlu, dok tijelo senzora ostaje izvan promatranog volumena tla (V_1 na Slici 11). Drugi način ugradnje podrazumijeva cjelokupan senzor (igle, tijelo i feritnu jezgru) unutar tla (Slika 11). Stoga je potrebno izračunati dva volumena. V_1 predstavlja volumen tla u kojem se nalaze samo igle, dok je volumen u kojem se nalazi cijeli senzor označen s V_2 . Da bi se olakšao postupak ugradnje, volumen V_2 se postiže naknadnim dodavanjem materijala čiji volumen se označava s V_2' i predstavlja razliku V_2 i V_1 . Navedeni volumeni ovise o visini uzorka u kojem senzori mogu očitati prisutnost vode kao i dimenzijama posude. Dimenzije su vidljive na Slici 11.



Slika 11: Skica posude s potrebnim volumenima ispitivanog materijala

Iz prethodne skice (Slika 11) i uzimajući u obzir volumen senzora sada je moguće odrediti potrebne volumene tla:

$$V_1 = 26,5 \cdot 36,5 \cdot 11,5 = 11123,4 \text{ cm}^3$$

$$V_2' = 26,5 \cdot 36,5 \cdot 3,5 - 2 \cdot V_{TEROS10} = 26,5 \cdot 36,5 \cdot 3,5 - 2 \cdot 63,5 = 3258,4 \text{ cm}^3$$

Ukupan volumen senzora ugrađenog unutar V_2' određen je gravimetrijski, tj. uranjanjem senzora u čistu vodu. Nakon volumena, potrebno je odrediti masu

čvrstih čestica tla i masu vode koju je potrebno dodati suhom uzorku, ovisno o stupnju saturacije. Korištenjem faznog dijagrama, iz jednadžbe relativnog poroziteta (3) koji je ciljan na 0,44 (Tablica 1) može se odrediti volumen pora unutar volumena V_1 i V_2' .

$$V_{v1} = n \cdot V_1 = 0,44 \cdot 11123,4 = 4894,3 \text{ cm}^3$$

$$V'_{v2} = n \cdot V_2' = 0,44 \cdot 3258,4 = 1433,7 \text{ cm}^3$$

Dobivenim volumenom pora određuje se volumen čvrstih čestica te potom njihova masa preko izraza za gustoću:

$$V_{s1} = V_1 - V_{v1} = 6229,1 \text{ cm}^3$$

$$V'_{s2} = V_2' - V'_{v2} = 1824,7 \text{ cm}^3$$

$$m_{s1} = \rho_s \cdot V_{s1} = 2,7 \cdot 6229,1 = 16818,6 \text{ g}$$

$$m'_{s2} = \rho_s \cdot V'_{s2} = 2,7 \cdot 1824,7 = 4926,7 \text{ g}$$

Ovisno o ciljanom stupnju saturiranosti koji se želi postići, iz izraza (2) moguće je dobiti volumen vode te posljedično njezinu masu.

Za $S=0\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 0 = 0 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 0 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 0 = 0 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 0 \text{ g}$$

Za $S=25\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 0,25 = 1223,6 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 1223,6 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 0,25 = 358,4 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 358,4 \text{ g}$$

Za $S=50\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 0,50 = 2447,2 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 2447,2 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 0,50 = 716,9 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 716,9 \text{ g}$$

Za $S=75\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 0,75 = 3670,7 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 3670,7 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 0,75 = 1075,3 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 1075,3 \text{ g}$$

Za $S=85\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 0,85 = 4160,2 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 4160,2 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 0,85 = 1218,6 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 1218,6 \text{ g}$$

Za $S=100\%$ slijedi:

$$V_{w1} = V_{v1} \cdot 1 = 4894,3 \text{ cm}^3 \rightarrow m_{w1} = V_{w1} \cdot \rho_w = 4894,3 \text{ g}$$

$$V'_{w2} = V'_{v2} \cdot 1 = 1433,7 \text{ cm}^3 \rightarrow m'_{w2} = V'_{w2} \cdot \rho_w = 1433,7 \text{ g}$$

Zbirni prikaz masa čvrstih čestica i vode potrebnih za ispitivanje pri ciljanim vrijednostima stupnja saturacije dan je u Tablici 2.

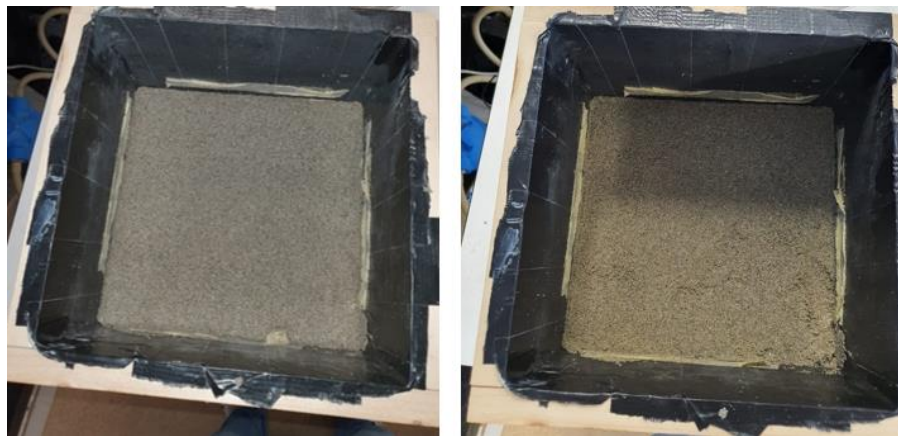
Tablica 2: Mase čvrstih čestica i vode za ciljan stupanj saturacije

Stupanj saturacije (%)	m_{s1} (g)	m'_{s2} (g)	m_{w1} (g)	m'_{w2} (g)
0	16818,6	4926,7	0	0
25	16818,6	4926,7	1223,6	358,4
50	16818,6	4926,7	2447,2	716,9
75	16818,6	4926,7	3670,7	1075,3
85	16818,6	4926,7	4160,2	1218,6
100	16818,6	4926,7	4894,3	1433,7

3.2.3. Tijek ispitivanja

Ispitivanju je prethodilo sušenje pijeska u trajanju 24 sata pri 105°C . Nakon što se pijesak osušio, moglo se krenuti s daljnjim koracima. Preciznim vaganjem pijeska odredile su se potrebne količine za ispunjenje volumena V_1 i V_2' pri saturaciji $S=0\%$. Prvotno se ugradio volumen V_1 . Po ugradnji, vršila su se senzorska mjerenja van uzorka tla te u slučaju kada su samo igle uređaja u tlu. Završetkom tih mjerenja uslijedila je ugradnja materijala volumena V_2' i mjerenje vlažnosti za slučaj kada se cijeli senzor nalazi unutar uzorka. Pri ugradnji nužno je bilo pripaziti na moguću pojavu zračnih prostora na kontaktima senzora i pijeska: posebnu pažnju potrebno je posvetiti tijekom utiskivanja senzora u tlo kako bi se ostvario čim bolji hidraulički kontakt između senzora i okolnog tla. Mjerenja su se vršila istovremeno s dva Teros 10 senzora, a u želji za što realnijim i vjerodostojnijim rezultatima, isti se postupak proveo za dodatna dva Teros 10 senzora. Prilikom mjerenja zabilježen je i serijski broj korištenih senzora (potpoglavlje 3.2.1.).

Nakon mjerenja na suhom pijesku ($S=0\%$), potrebno je bilo umiješati izračunatu količinu vode kako bi se uspostavilo stanje saturacije $S=25\%$. Način mjerenja ostao je isti: prvotno je mjerenje provedeno za slučaj gdje su samo igle unutar tla, a zatim kada je cijeli senzor u uzorku. Prilikom mjerenja Teros 10 senzorima, dodatno su se koristila dva Teros 31 tenziometra pomoću kojih su se pratile vrijednosti pornih tlakova. Slika 12 prikazuje probna mjerenja na suhom (lijevo) i uzorku sa stupnjem saturacije $S=25\%$ (desno) u drvenim kutijama obloženima ljepljivim trakama. S obzirom da su tijekom preliminarnih ispitivanja uočeni gubitci vode, drvene kutije su zamijenjene plastičnima te je postupak kalibracije proveden isključivo korištenjem prethodno opisanih plastičnih kutija.

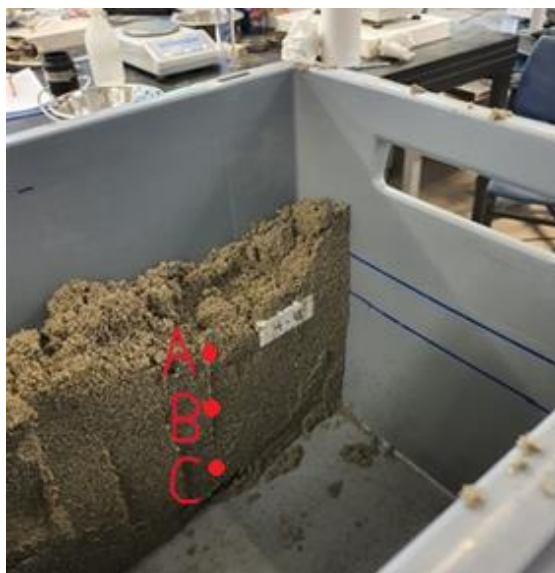


Slika 12: Preliminarno ispitivanje: potpuno suhi uzorak (lijevo), uzorak saturacije $S=25\%$ (desno)

Stupanj saturacije $S=50\%$ postigao se dodavanjem vode u već vlažan uzorak korišten za kalibraciju pri stupnju saturiranosti $S=25\%$. Mjerenja su se provela već opisanim načinom, a kako bi se provjerila vlažnost smjese nakon mjerenja, dodatno se koristila gravimetrijska metoda uzimanjem malih uzoraka u trima točkama na različitim dubinama. Rezultati gravimetrijske metode dobiveni su kasnije zbog vremena i procedure koju ovakva metoda iziskuje, te su u prosijeku potvrdili točnost pripremljenog uzorka. Spomenut je termin „u prosijeku“ zbog očekivanih malih odstupanja gdje se veća vlažnost zabilježila na većoj dubini, tj. pri dnu kutije, dok je vlažnosti bila nešto manja u plićoj točki, tj. pri površini kutije. Detalji tijekom ispitivanja uzorka stupnja saturacije od 50% i točke kontrole vlažnosti gravimetrijskom metodom vidljivi su na slikama 13 i 14.



Slika 13: Prikaz uzorka pri saturaciji $S=50\%$



Slika 14: Točke uzimanja uzoraka za potrebe gravimetrijske metode određivanja vlažnosti

Prilikom pripreme uzorka saturiranosti $S=75\%$, osim potrebne dodatne količine vode, trebalo se voditi računa o gubicima koji su nastali zbog kontrole vlažnosti gravimetrijskom metodom. Gubici su bili minimalni, ali svejedno su se pravilno kompenzirali. Po dobivanju tla tražene vlažnosti i stupnja saturiranosti proveo se već ustaljeni proces mjerenja sensorima. Teksturu i boju uzorka pri saturaciji 75% moguće je vidjeti na Slici 15.



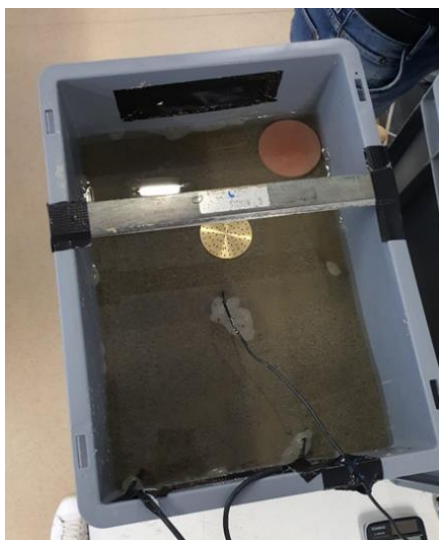
Slika 15: Prikaz uzorka pri saturaciji $S=75\%$

Kao međukorak između stupnjeva saturacije 75% i 100%, dodatno je provedeno mjerenje za stupanj saturacije od 85%. Razlog tome je otežan postupak pripreme uzorka s uvjetima vlažnosti blizu potpune saturacije. Za stupanj saturiranosti $S=85\%$ provedena su standardna mjerenja uz razliku gdje je korišten samo jedan par senzora (zamjena senzora izbjegnuta je kako se uzorak ne bi poremetio, što bi značajno utjecalo na uvjete saturacije uzorka). Također, vršena su dodatna praćenja pornih tlakova pomoću uređaja Teros 31. Senzorom je izmjeren pozitivni porni tlak što uz pojavljivanje vode na nekim dijelovima uzorka (vidljivo na Slici 16) upućuje na potpunu saturiranost.



Slika 16: Prikaz uzorka pri proračunskoj saturaciji $S=85\%$

Proračunski stupanj saturiranosti $S=100\%$ postignut je dolijevanjem potrebne količine vode u uzorak saturiranosti $S=85\%$. Takav način onemogućio je praćenje vlažnosti u slučaju kada su samo igle senzora ukopane u tlo. Po izvršenim ustaljenim mjerenjima vlažnosti i pornih tlakova, nastavljeno je s dolijevanjem vode u uzorak kako bi se porni pritisak dodatno povećao, pri čemu su praćene promjene vlažnosti, pornih tlakova i možebitne promjene volumena tla. Voda se je dolijevala vrlo pažljivo u koracima preko propusnog kamena s ciljem sprječavanja odnošenja čestica i remećenja strukture uzorka. Promjene volumena uzorka pratile su se mjerenjima odaljenosti površine uzorka i vrha posude pomoću pomične mjerke. Mjerenjima nije utvrđena promjena volumena. Detalj mjerenja s razinom vode od 1 cm iznad površine uzorka prikazan je na Slici 17.



Slika 17: Prikaz mjerenja promjene volumena uzorka pri 1 cm vode iznad površine

3.3. Rezultati

Rezultati mjerenja senzorom Teros 10 prikazani su u tablicama. Svaka tablica prikazuje očekivanu vrijednost volumetrijske vlažnosti kao i senzorom očitane vrijednosti RAW broja i vlažnosti uzorka. Također, rezultati su razvrstani u ovisnosti o položaju senzora naspram ispitivanog uzorka tla. Tablicom 3 vidljiva su mjerenja uzorka pri stupnju saturacije 0% do 75% koja su dobivena pomoću četiri Teros 10 senzora.

Tablica 3: Rezultati mjerenja vlažnosti za S=0% do S=75%

S=0% → θ=S·n=0								
senzor 1 (T10-04322)		senzor 2 (T10-04359)		senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	
m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	
-0,057	13283	-0,041	13557	-0,05	13398	-0,072	13025	zračno suh
-0,057	13283	-0,041	13557	-0,05	13395	-0,072	13027	
-0,057	13283	-0,041	13557	-0,05	13401	-0,072	13026	
-0,004	14226	0,004	14366	-0,002	14278	0,001	14321	igle u tlu
-0,005	14220	0,003	14391	-0,002	14278	0,001	14325	
-0,004	14237	0,003	14391	-0,001	14282	0,001	14328	
0,007	14456	0,018	14676	0,007	14452	0,012	14561	kompletno u tlu
0,007	14457	0,018	14683	0,007	14452	0,013	14563	
0,007	14456	0,015	14604	0,007	14450	0,013	14562	
S=25% → θ=S·n=0,11								
senzor 1 (T10-04322)		senzor 2 (T10-04359)		senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	
m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	
0,120	17269	0,121	17297	0,124	17402	0,131	17624	igle u tlu
0,119	17258	0,121	17294	0,124	17397	0,130	17606	
0,119	17256	0,121	17291	0,124	17391	0,130	17604	
0,134	17741	0,138	17854	0,140	17923	0,144	18062	kompletno u tlu
0,134	17737	0,138	17852	0,139	17890	0,146	18142	
0,134	17734	0,138	17851	0,139	17887	0,146	18141	
S=50% → θ=S·n=0,22								
senzor 1 (T10-04322)		senzor 2 (T10-04359)		senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	
m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	
0,200	20248	0,199	20186	0,195	20044	0,186	19658	igle u tlu
0,200	20249	0,199	20199	0,196	20082	0,186	19652	
0,200	20252	0,199	20199	0,196	20091	0,185	19643	
0,215	20866	0,220	21094	0,219	21039	0,203	20391	kompletno u tlu
0,215	20865	0,220	21099	0,218	21030	0,203	20374	
0,215	20866	0,220	21101	0,218	21028	0,203	20367	
S=75% → θ=S·n=0,33								
senzor 1 (T10-04322)		senzor 2 (T10-04359)		senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	θ	RAW	
m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	m ³ m ⁻³	/	
0,326	25064	0,328	25135	0,311	24601	0,312	24637	igle u tlu
0,326	25082	0,330	25202	0,311	24595	0,312	24632	
0,326	25064	0,330	25194	0,311	24596	0,312	24636	
0,322	24943	0,331	25224	0,319	24854	0,321	24916	kompletno u tlu
0,321	24939	0,331	25220	0,319	24853	0,321	24916	
0,322	24948	0,331	25218	0,319	24853	0,321	24913	

U Tablici 4 prikazani su rezultati za stupnjeve saturacije 85% te 100% (uvrštena su mjerenja i za slučaj kada je dodavana voda nakon što se je postigao proračunati stupanj saturacije od 100%).

Tablica 4: Rezultati mjerenja vlažnosti za $S=85\%$ i $S=100\%$ (dodavanje vode)

S=85% → $\theta=S \cdot n=0,374$				
senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	
$m^3 m^{-3}$	/	$m^3 m^{-3}$	/	
0,333	25288	0,334	25328	igle u tlu
0,333	25282	0,333	25297	
0,333	25280	0,334	25317	
0,324	25023	0,327	25116	kompletno u tlu
0,325	25035	0,327	25106	
0,325	25035	0,327	25106	
S=100% → $\theta=S \cdot n=0,44$ (plus dodavanje vode)				
senzor 3 (T10-04277)		senzor 4 (T10-04274)		Komentar
θ	RAW	θ	RAW	
$m^3 m^{-3}$	/	$m^3 m^{-3}$	/	
0,325	25058	0,326	25087	kompletno u tlu
0,333	25272	0,333	25284	
0,344	25591	0,337	25414	

Kako je spomenuto, za neke stupnjeve saturacije provodila su se i mjerenja pornih tlakova. Rezultati tih mjerenja vidljivi su u Tablici 5.

Rezultati mjerenja pornih tlakova te promjene volumena (udaljenosti površine uzorka i vrha posude) prilikom dodavanja određenog stupca vode na već potpuno saturirani uzorak tla (detalji prikazani na Slici 17) vidljivi su u Tablici 6.

Tablica 5: Rezultati mjerenja pornih tlakova

S=25% → $\theta=S \cdot n=0,11$		
senzor 5 (T31-339)	senzor 6 (T31-117)	Komentar
Potencijal	Potencijal	
kPa	kPa	
-3,24	-3,38	kompletno u tlu
-3,24	-3,38	
-3,24	-3,38	
S=85% → $\theta=S \cdot n=0,374$		
senzor 5 (T31-339)		Komentar
Potencijal		
kPa		
0,19		kompletno u tlu
0,2		
0,24		
S=100% → $\theta=S \cdot n=0,44$		
senzor 5 (T31-339)		Komentar
Potencijal		
kPa		
0,52		kompletno u tlu
0,52		
0,52		

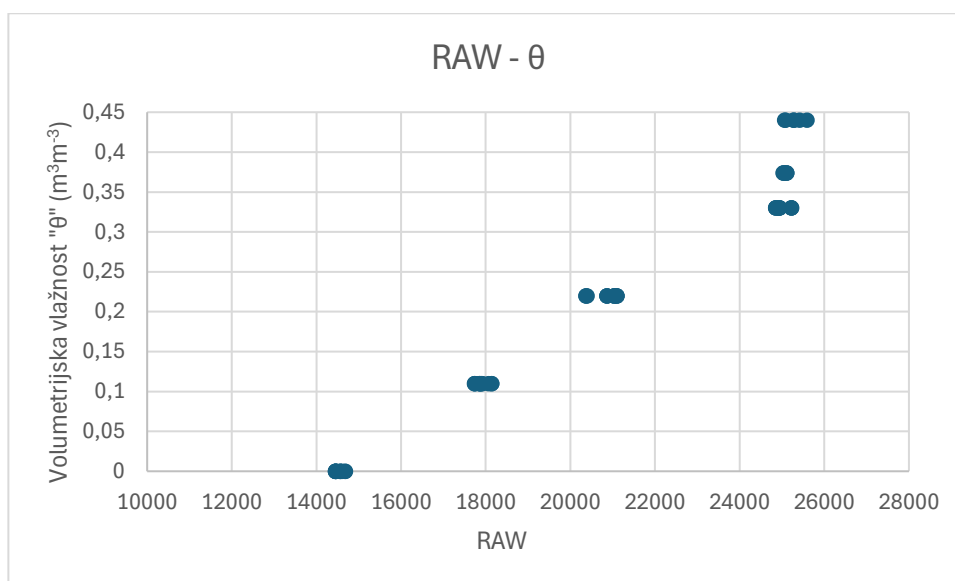
Tablica 6: Rezultati dodavanja vode na potpuno saturiran uzorak

Dodavanje vode na već saturiran uzorak			
senzor 5 (T31-339)	Visina vode od površine	Udaljenost vrha posude do ugrađenog tla	Komentar
Potencijal			
kPa	cm	mm	
0,52	≈0	110,55	kompletno u tlu
0,61	1	110,51	
0,72	2	110,55	

4. INTERPRETACIJA REZULTATA

Različiti načini mjerenja (kompletan senzor unutar uzorka ili samo igle u uzorku) koristili su se kako bi se uvidjelo postoje li razlike u rezultatima uzrokovane nedostatkom materijala oko same glave senzora. S obzirom da volumen tla kojeg senzor „osjeti“ pri mjerenju obuhvaća i dio iznad glave senzora (Slika 3) razlike očekivano postoje, što upućuje na to da se senzor prilikom instalacije mora pažljivo i kompletno ugraditi u tlo. U suprotnom, primjerice kod posebnih laboratorijskih mjerenja pri kojima glava senzora ostaje izvan mjerne posude, mjerenja bi bilo potrebno dodatno korigirati kako bi se ova činjenica uzela u obzir a rezultati bili točni.

Kalibracijsku krivulju dobiti će se stavljanjem u odnos očitane RAW podatke senzora (za slučaj kada se kompletno nalazi u tlu) i očekivane vrijednosti volumetrijske vlažnosti za pojedini stupanj saturacije. Odnos je prikazan grafom s apscisom RAW i ordinatom „ θ “ (Slika 18).



Slika 18: Rezultati provedenog ispitivanja

Po definiranju točki potrebno je provući krivulju koja najvjernije opisuje svaku točku grafa uz minimalna moguća odstupanja. Pri tom koraku veliki problem predstavlja područje pri saturaciji većoj od 75% ($\theta > 0,33$) gdje se jasno ne razaznaje pravilni porast RAW vrijednosti pri porastu volumetrijske vlažnosti.

Također, u prilog toj nepravilnosti stoji činjenica da je tenziometrom izmjeren pozitivan porni tlak pri proračunatom stupnju saturacije $S=85\%$ što ukazuje na potpunu saturiranost uzorka već u toj fazi ispitivanja.

Zaključeno je da bi se kalibracijska krivulja trebala sastojati od dva dijela razdvojena pravcem $x=RAW$ koji predstavlja očitavanje senzora vlažnosti pri pornom tlaku jednakom nuli (potpuna saturiranost). Pravac je dobiven interpolacijom iz odnosa rezultata senzora vlažnosti i rezultata tenziometra te glasi $x=24857$.

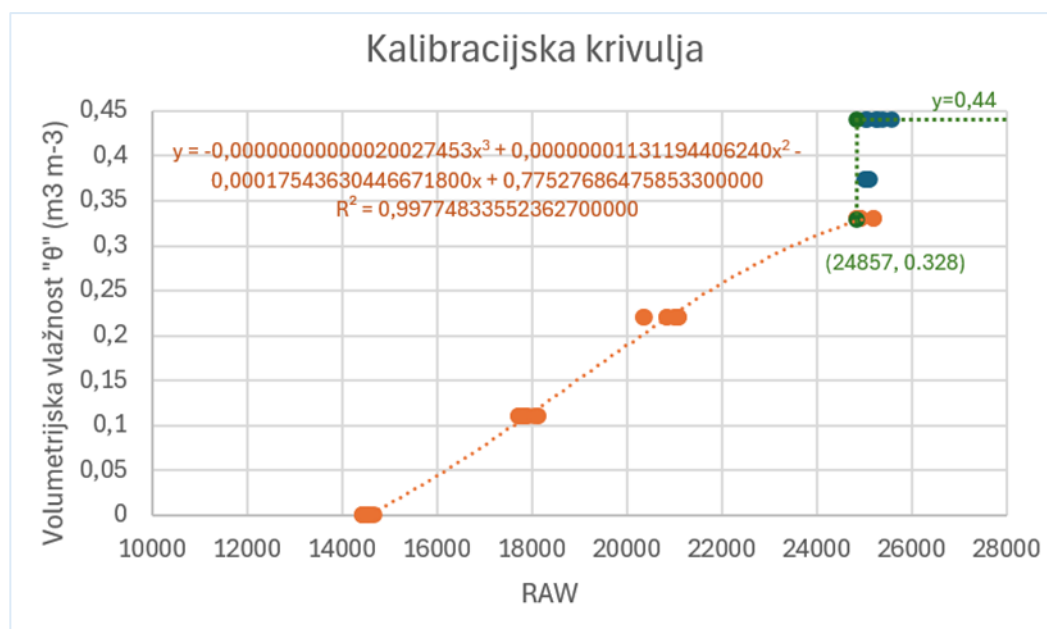
Kalibracijska krivulja prikazana je Slikom 19. Na grafu se mogu uočiti dva dijela:

- prvi dio, do vrijednosti $RAW=24857$, opisan polinomom trećeg stupnja čija jednačba glasi:

$$\theta \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = -2,0027453 \cdot 10^{-13} \cdot RAW^3 + 1,13119440624 \cdot 10^{-8} \cdot RAW^2 - 1,75436304466718 \cdot 10^{-4} \cdot RAW + 0,775276864758533; \quad RAW < 24857, \quad (11)$$

- drugi dio modela, od vrijednosti $RAW=24857$, gdje vrijedi:

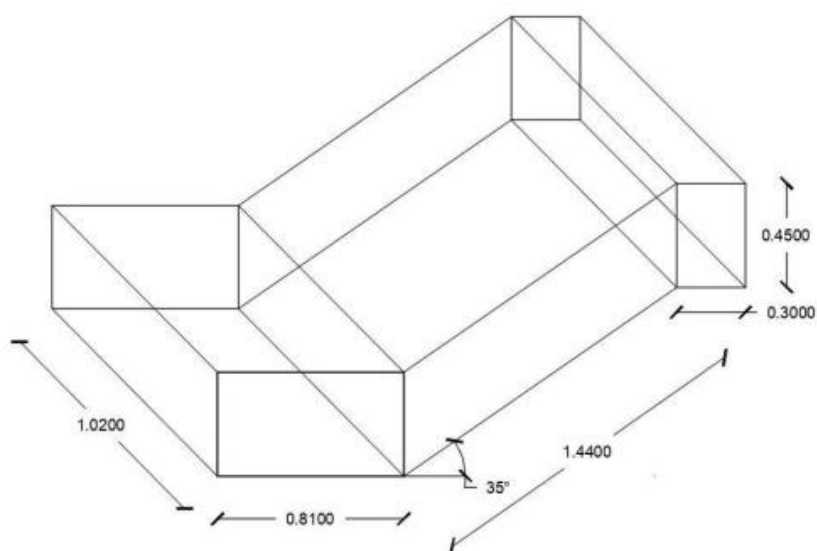
$$\theta \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = 0,44; \quad RAW \geq 24857. \quad (12)$$



Slika 19: Graf kalibracijske krivulje

4.1. Primjena kalibracijske krivulje

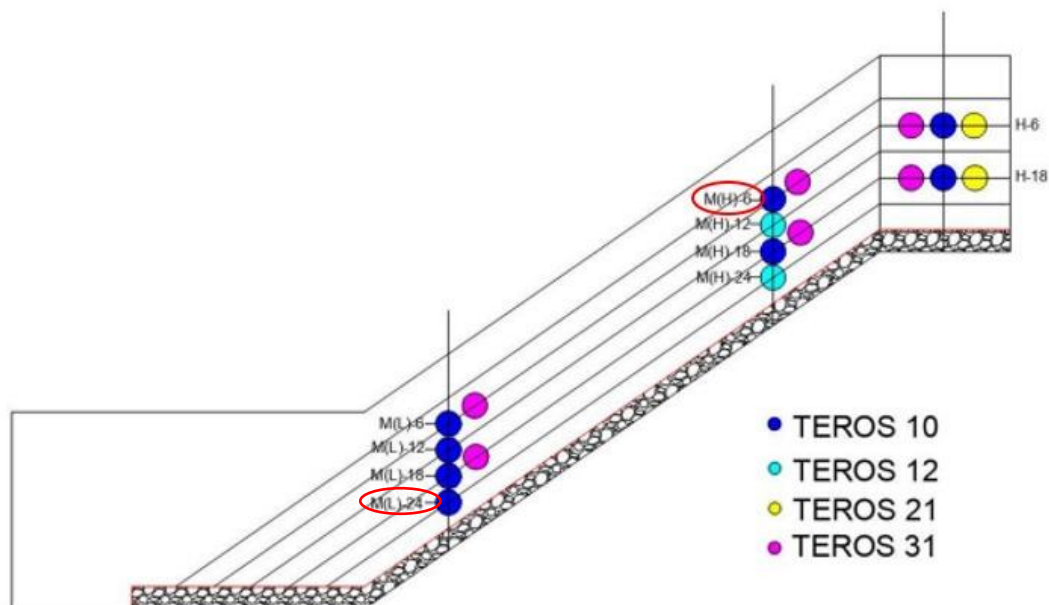
Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci provedeno je eksperimentalno ispitivanje ponašanja tla na kosinama uz promjenjive uvijete vlažnosti koristeći se umanjenim fizičkim modelom kosine čije su dimenzije unaprijed definirane i prikazane na Slici 20.



Slika 20: Skica fizičkog modela kosine [13]

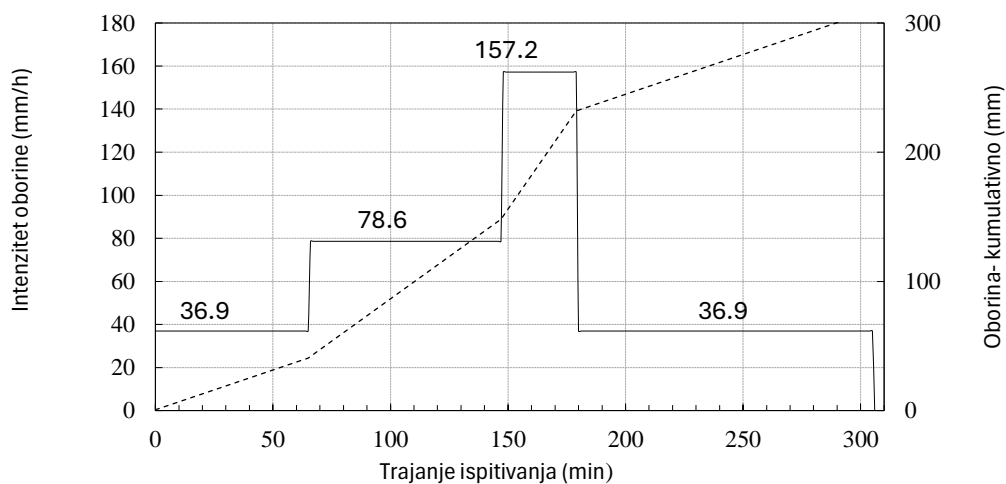
Model kosine izrađen je od drenažnog sloja šljunka debljine 5 cm, geotekstila te kvarcnog pijeska kojim se ovaj rad bavi, ugrađenog u 5 homogenih slojeva od kojih je svaki visine 6 cm. Time je dobiven model kosine pod nagibom od 35 stupnjeva ukupne visine 35 cm. Za različite intenzitete oborine, postignute korištenjem odgovarajućih mlaznica simulatora oborina, praćene su promjene vlažnosti i pritiska u modelu korištenjem senzora ugrađenih na različitim pozicijama unutar modela kosine. Detaljni presjek sa svim ugrađenim slojevima i točkama mjerenja, kao i vrstom senzora koji se za pojedinu točku koristio, vidljivi su na Slici 21.

Predmet promatranja su rezultati mjerenja vlažnosti u točkama na kojima se koristio senzor Teros 10. Za potrebe ovog rada, odnosno interpretaciju rezultata korištenjem dobivene kalibracijske krivulje, promatrane su točke M(H)-6 i M(L)-24, smještene na dubinama od 6 (24) cm okomito od površine modela u gornjem (donjem) dijelu kosine kako je prikazano na Slici 21.



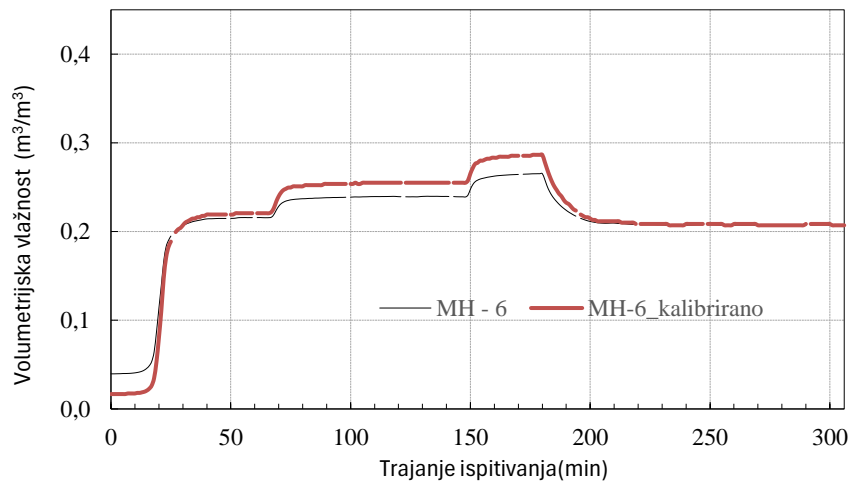
Slika 21: Presijek fizičkog modela s rasporedom mjernih uređaja [13]

Pokus je proveden u dvije osnovne faze. Prva faza pokusa podrazumijevala je promjenjive intenzitete, a sama dinamika opisana je Slikom 22. Početak ispitivanja započeo je intenzitetom oborine od 36,9 mm/h u trajanju 66 min. Zatim se intenzitet povećava na 78,6 mm/h i traje 81 min. Nakon 147 minuta ispitivanja intenzitet simulirane oborine ponovo se povećava i iznosi 157,2 mm/h te takav traje 32 minute. Konačno, intenzitet se smanjuje na početnih 36,9 mm/h, a pokus je zaustavljen nakon ukupno 306 minuta.



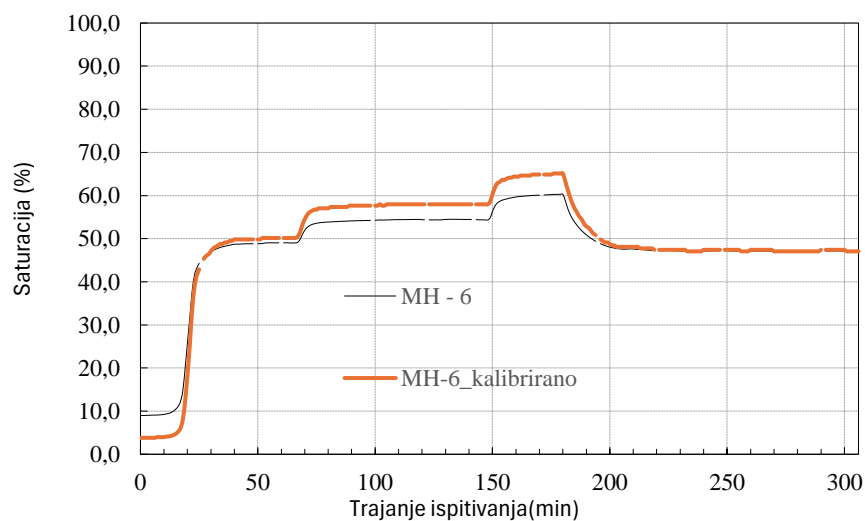
Slika 22: Intenzitet simulirane oborine tijekom prve faze pokusa [13]

Vrijednosti koje je izmjerio senzor kao i kalibrirane vrijednosti prikazane su grafički na Slici 23. Vidljivo je da rezultati prate dinamiku simuliranih oborina. Početkom ispitivanja te svakom promjenom intenziteta, vlažnosti se mijenjaju sve dok se ne ostvare ravnotežni uvjeti, odnosno dok se ne uspostavi stacionarni režim tečenja za uspostavljeni intenzitet na površini modela. Također, vidljiva su područja u kojima senzor ima najveća odstupanja, a to su prije svega niske te vrlo visoke razine vlažnosti.



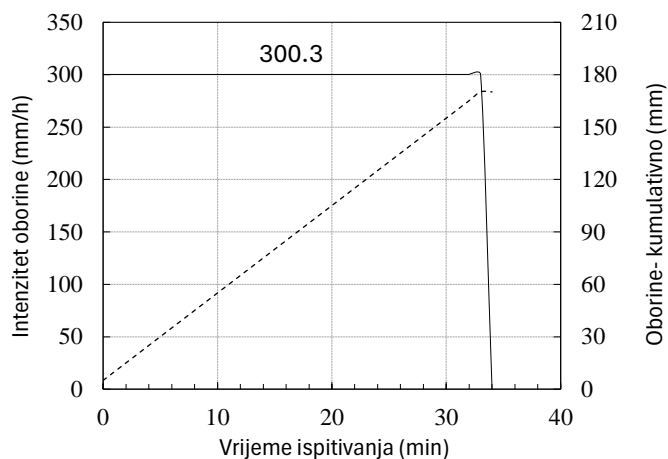
Slika 23: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom prve faze pokusa za točku MH-6

S obzirom na odnos samog intenziteta i značajki propusnosti ispitivanog tla, u prvoj fazi pokusa očekivano nije došlo do granične vrijednosti kalibracijske krivulje odnosno do uvjeta potpune saturacije (Slika 24).



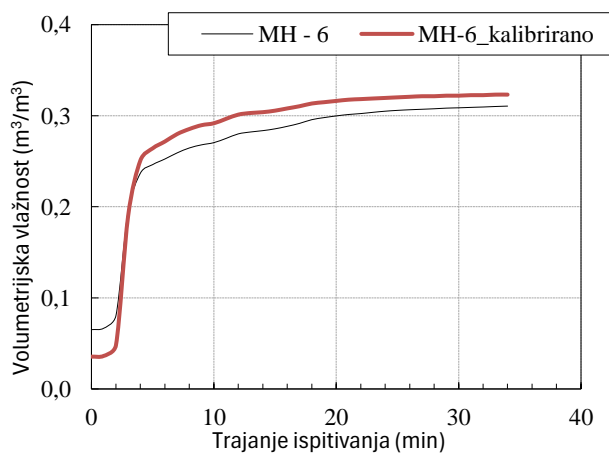
Slika 24: Prikaz saturacije tijekom prve faze pokusa za točku MH-6

Druga faza pokusa provedena je pri konstantnom intenzitetu oborine. Intenzitet je iznosio značajnih 300 mm/h, a samo ispitivanje trajalo svega 34 minute. Tijek ove simulacije vidljiv je na Slici 25.

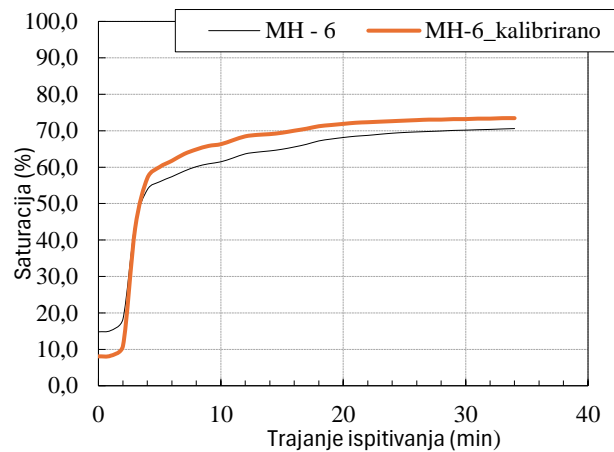


Slika 25: Prikaz dinamike oborina tijekom druge simulacije [13]

Rezultati senzorskih mjerenja te kalibrirane vrijednosti prikazane su Slikom 26. Očekivano, ravnotežni uvjeti sugeriraju povećanje vlažnosti tla u drugoj fazi pokusa. Međutim, iako je intenzitet oborina gotovo dvostruko veći od maksimalnog iz prve faze pokusa, senzori nisu zabilježili potpunu saturaciju u promatranoj točki modela MH-6. Kako nije pređena granična vrijednost očitavanja definirana tijekom kalibracije senzora, rezultati prikazani na Slici 27 sugeriraju i dalje uvjete parcijalne saturacije.

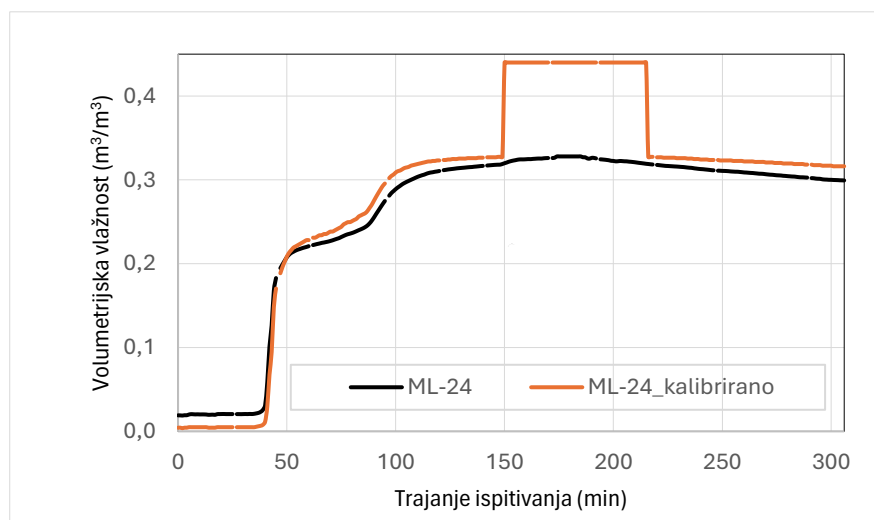


Slika 26: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom druge faze pokusa za točku MH-6

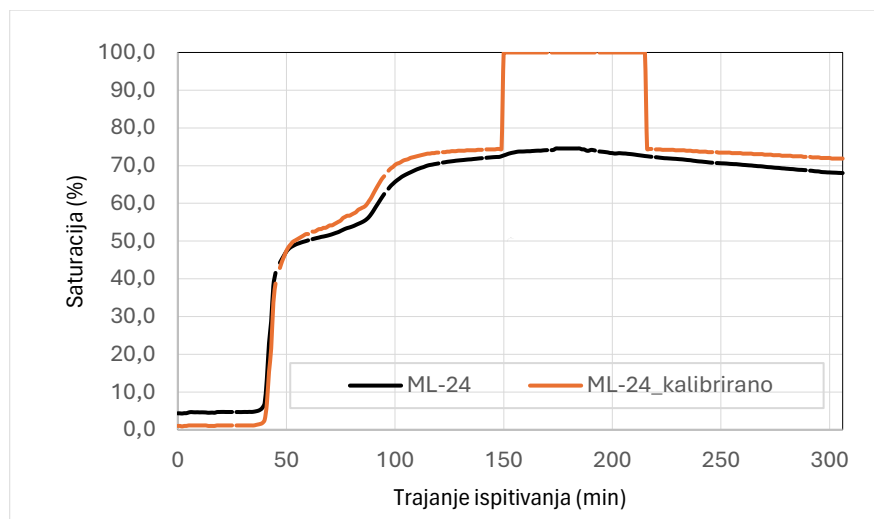


Slika 27: Prikaz saturacije tijekom druge faze pokusa za točku MH-6

Osim odnosa između propusnosti tla i intenziteta simulirane oborine, na režim tečenja vode u modelu utječu i rubni uvjeti te visinski položaj točke. Kako bi se radom analizirali podaci i za uvjete potpune saturacije promatrane točke, u zadnjem djelu rada interpretiraju se podaci za točku M(L)-24. Budući da je ovo najniža točka u modelu, a ujedno je i ploča koja formira dno platforme nepropusna, upravo se u ovom području modela može očekivati porast razine podzemne vode i potpuna saturacija kosine. Rezultati su interpretirani samo za prvu fazu pokusa i prikazani su na Slici 28 u obliku promjene volumetrijske vlažnosti tla tijekom pokusa, odnosno kao promjena stupnja saturacije na Slici 29.



Slika 28: Prikaz volumetrijske vlažnosti tijekom prve faze pokusa za točku ML-24



Slika 29: Prikaz saturacije tijekom prve faze pokusa za točku ML-24

Za razliku od rezultata dobivenih generičkom kalibracijskom krivuljom, kalibrirani podaci sugeriraju kako točka ML-24 doseže uvjete potpune saturacije pri najvećem intenzitetu simulirane oborine. Uzme li se u obzir utjecaj djelovanje uzgona na težinu tla te eliminiranje kapilarnih efekata na doprinos čvrstoći tla, odnosno smanjenje čvrstoće tla uslijed porasta porednog pritiska, ovo opažanje postaje vrlo važan element pri interpretaciji rezultata pokusa na umanjenim modelima kosina, ali i šire.

5. ZAKLJUČAK

Senzorska mjerenja danas predstavljaju jednu od najkorištenijih metoda praćenja vlažnosti tla *in-situ*. Omogućavaju brzo i kontinuirano praćenje vlažnosti bez potrebe za konstantnom prisutnošću čovjeka. Koriste se najviše pri rješavanju praktičnih zadataka, ali i za potrebe znanstvenih istraživanja. Neobrađeni senzorski podaci najčešće se iščitavaju korištenjem tvorničkih kalibracijskih krivulja jer se pretpostavlja da dovoljno dobro aproksimiraju vlažnost tla. Posebno je to slučaj kada tla nemaju veći udio minerala glina, kao što je situacija s materijalom (kvarcnim pijeskom) korištenim u ovom radu. Međutim, provjerom senzorskih rezultata mjerenja vlažnosti u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, pokazalo se da rezultati mjerenja senzora Teros 10, interpretirani generičkom tvorničkom krivuljom, daju određena odstupanja od stvarnih vrijednosti vlažnosti tla. Konkretno, rezultati dobiveni u ovom radu sugeriraju da i za ovako relativno jednostavnu vrstu tla, odstupanja mogu biti značajnija. Iako vidljivo i pri niskim vrijednostima vlažnosti, odstupanja su naročito izražena pri visokim vrijednostima vlažnosti tla, odnosno u području kada saturacija tla prilazi uvjetima potpune saturacije. Najčešće su to i kritične situacije ili uvjeti u tlu za ponašanje građevina ili promatranog procesa (fizičkog modela kosine).

Shodno tome, preporuka je da se pri svakom senzorskom mjerenju na novoj lokaciji s promijenjenim karakteristikama tla provede kalibracija te izradi vlastita kalibracijska krivulja. To omogućava bolje razumijevanje i točnije predviđanje ponašanja tla odnosno građevina.

Postupak kalibracije zahtijeva kontrolirane laboratorijske uvijete izvođenja što podrazumijeva preciznost u odmjeravanju količina čvrstih čestica tla i vode te je posebnu pažnju potrebno posvetiti pri ugradnji samog uzorka kako bi se ostvarili ciljani uvjeti zbijenosti i vlažnosti tla. Kako bi se povećala pouzdanost kalibracijskog postupka, preporuča se provođenje postupka za veći broj različitih stupnjeva saturacije (optimalno do 10 ravnomjerno raspoređenih stupnjeva). Također, s obzirom na iskustva pri mjerenjima provedenima u okviru ovog rada, važna preporuka je da se usporedno s mjerenjima vlažnosti provode i mjerenja pornih pritisaka tenziometrima. Upravo kombinacija mjerenja pornih pritisaka i vlažnosti tla

osigurava potpuni uvid na hidraulički režim u tlu i daje pouzdanu indikaciju uvjeta saturiranosti uzorka.

Na kraju, valja spomenuti da svako laboratorijsko istraživanje ne daje potpuno točne rezultate (pa ni kalibracija opisana ovim radom) te da se relevantnost postiže njihovim ponavljanjem i uključivanjem sve većeg broja varijabli koje se određuju i/ili prate.

6. LITERATURA

- [1] Powrie, W., Soil Mechanics, CRC Press, Florida, 1997.
- [2] Krevh, V.: Voda u tlu, <https://pinova.hr/voda-u-tlu/>, pristup 10.05.2024.
- [3] Vukadinović, V.: Voda u tlu, https://pedologija.com.hr/Literatura/Pedologija/Voda-zrak-toplina_u_tlu.pdf, pristup 10.05.2024.
- [4] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [5] METER Group, Inc.: The researcher's complete guide to soil moisture, <https://metergroup.com/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-soil-moisture/>, pristup 19.04.2024.
- [6] Krevh, V., Dvorski, T.: Metode određivanja vlage u tlu, <https://pinova-meteo.com/blog/metode-odredivanja-vlage-u-tlu>, pristup 24.05.2024.
- [7] Bittelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content: A Review. *HortTechnology*, 21(3), 293–300. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.293>, pristup 25.05.2024.
- [8] Dwevedi, A., Kumar, P., Kumar, P., Kumar, Y., Sharma, Y. K., & Kayastha, A. M. (2017). Soil sensors: detailed insight into research updates, significance, and future prospects. In *New Pesticides and Soil Sensors* (pp. 561–594). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804299-1.00016-3>, pristup 20.04.2024.
- [9] Hardie, M. (2020). Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture. *Sensors*, 20(23), 6934. <https://doi.org/10.3390/s20236934>, pristup 20.04.2024.
- [10] METER Group, Inc.: Soil moisture sensors—How they work. Why some are not research grade., <https://metergroup.com/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>, pristup 19.04.2024.
- [11] Yu, L., Gao, W., R. Shamshiri, R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(3), 32–42. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6404>, pristup 21.04.2024.
- [12] METER Group, Inc.: Manual Web Teros10, [20788_TEROS10_Manual_Web.pdf \(metergroup.com\)](https://metergroup.com/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf), pristup 19.04.2024.

[13] Škuflić, R., Hidraulički odziv fizičkog modela kosine pri različitim intenzitetima kiše, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2023.