

**ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**



**ДИПЛОМСКИ РАД
ПРЕДМЕТ:
ДРЕНАЖНИ СИСТЕМИ**

**ТЕМА:
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ
ПАРАМЕТАРА ЗА ПРОРАЧУН ВЕРТИКАЛНЕ
ИНФИЛТРАЦИЈЕ**

Кандидат:
Стојиновић Петар 13/08

Ментор:
Доц. Др. Милош Станић

Београд, Октобар, 2013.

Садржај

1. Увод	2
2. Влажност земљишта	4
2.1. Облици воде у земљишту и карактеристичне влажности земљишта:	5
2.3. Мерење влажности земљишта	6
2.3.1. Директне методе	6
2.3.2. Индиректне методе	7
3. Опис сонди за мерење влажности.....	14
4. Калибрација сонди за мерење влажности земљишта	16
5. Простирање влажног фронта кроз узорак земљишта	18
5.1 Инсталација.....	19
5.1.1. Опис инсталације	19
5.2. Принцип мерења.....	20
5.3. Опис опита	20
6. Одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације	23
6.1. Методе за одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације	23
6.1.1. Лабораторијски модел са променљивим нивоом воде	23
6.1. Принцип мерења (Експерименти 2а и 2б)	25
6.2. Опис опита (Експерименти 2а и 2б).....	25
7. Резултати испитивања.....	26
7.1. Резултати калибрације сонди:	26
7.2. Резултати експеримента 1	30
7.3. Резултати експеримента 2а	32
7.4. Резултати експеримента 2б	34
8. Дискусија.....	35
8.1. Дискусија резултата калибрације сонди	35
8.2. Дискусија резултата Експеримента 1.....	36
8.3. Дискусија резултата експеримента 2а	37
8.4. Дискусија резултата експеримента 2б	37
9. Закључак и предлогом за даљи рад	39
10. Литература	40

1. Увод

У овом дипломском раду изнета су теоријска разматрања везана за садржај и кретање воде у порозној средини, која су поткрепљена експерименталним резултатима. Генерално, циљеви рада су:

- Калибрација сонди за мерење влажности земљишта;
- Мерење пропагације влажног фронта кроз узорак уз помоћ сонди за мерење влажности земљишта (Експеримент 1);
- Одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације (Експеримент 2а и 2б);

Будући да се процеси од интереса одвијају у земљишту, неопходно је већ овде у уводу дефинисати модел на основу ког се описује земљиште.

Почевши од најопштијег разматрања, земљиште дефинишемо као површински слој Земљине коре дебљине од 2 м до 5 м. Настаје као производ многих хемијских, физичких и механичких процеса распадања површинских делова стена које су изложене спољним утицајима. Зрна земљишта настају у цикличном процесу распадања чврстих стена услед утицаја температурних промена, сунца, воде и хемијских процеса. Између зрна јавља се неиспуњен простор кога означавамо као поре. Математички модел који се користи јесте модел који приказује земљиште као трофазну средину. Према томе земљиште је трофазна средина (Слика 1.) која се састоји од:

- Чврсте фазе (Запремину коју заузима чврста фаза V_s); Течне фазе (Запремина коју заузима течна фаза V_w);
- Гасовите фазе (Запремина коју заузима гасовита фаза V_a);



Слика 1. Приказ земљишта као трофазне средине

Ипак неопходно је напоменути да се трећа фаза (гасовита) прећутно занемарује, јер се сматра да је њен удео наспрам удела течне фазе практично занемарљив. Према моделу, у погледу релативног учешћа појединих фаза, узорак земљишта се може описати једним од следећа три стања:

- Сув узорак: Поре су испуњене сам ваздухом. Овакав узорак се добија сушењем у пећи;
- Засићен узорак: Поре су потпуно испуњене водом. Узорак има максималну влажност;
- Незасићен узорак: У порама је заступљена и вода и ваздух

Земљиште у природном стању углавном представља незасићену средину.

На почетку сваке од целина дато је теоријско разматрање о природи феномена који се испитује као и о моделу који користимо ради уопштавања тог феномена. Након уводног дела следе описи апаратуре која је коришћена у експериментима и наравно опис самог експеримента. Рад садржи велики број илустрација и слика, да би се што верније приказао експериментални рад. На крају су приказани резултати опита, на основу којих је дата дискусија резултата. Кроз дискусију аутор даје своје мишљење на основу сличности добијених и очекиваних резултата.

2. Влажност земљишта

Да би се говорило о влажности земљишта неопходно је прво дефинисати појам порозности.

Порозност представља најзначајнију структурну карактеристику земљишта. Под овим појмом у општем случају подразумева се присуство пора у земљишту. Поре су скоро увек неправилног облика и простиру се у свим правцима кроз земљиште. Могу бити отворене (комуницирају једна са другом) или затворене (изоловане). У наставку следи опис основних величина неопходних за дефинисање садржаја воде у земљишту.

Порозност представља однос запремине пора у узорку (V_p) и запремине узорка (V):

$$p = \frac{V_p}{V} (\times 100\%)$$

Коефицијент порозности (ефективна порозност) представља однос запремине пора у узорку (V_p) и запремине чврсте фазе узорка (V_s):

$$e = \frac{V_p}{V_s} \Rightarrow e = \frac{p}{1 - p}$$

Влажност земљишта представља однос запремине воде у узорку (V_v) и запремине узорка (V):

$$\omega = \frac{V_v}{V} \times 100 \%$$

Степен zasiћења (сатурације) земљишта водом представља однос запремине воде у узорку (V_v) и запремине пора узорка (V_p):

$$s = \frac{V_v}{V_p} \times 100 \%$$

Како смо дефинисали физичке величине које су неопходне за разумевање даљег рада, следи опис облика влажности који егзистирају у земљишту и карактеристичних влажности земљишта.

2.1. Облици воде у земљишту и карактеристичне влажности земљишта:

Вода у земљишту се јавља у следећим облицима(Слика 2.):

- Хемијски везана вода;
- Хигроскопна вода (кондензација водене паре на чврсте честице земљишта);
- Опнена вода (ствара се на честицама услед деловања молекуларних сила адхезије);
- Капиларна вода;
- Гравитациона вода;



Слика 2. Облици воде у земљишту

Стручна литература разликује неколико карактеристичних влажности земљишта, које се користе при различитим анализама:

- *Максимална влажност* представља влажност при којој су све поре испуњене водом;
- *Влажност земљишног капацитета*: Влажност коју земљиште може задржати упркос деловању гравитационе силе (ω_p);
- *Лентокапиларна влажност*: Влажност испод које вода биљкама постаје тешко доступна(ω_l);
- *Влажност трајног свенућа*: Влажност испод које вода биљкама уопште није доступна (ω_{sv});

2.3. Мерење влажности земљишта

Како би имали податке о влажности земљишта неопходно је извршити теренска или лабораторијска мерења. На бази различитих физичких процеса, изведене су различите методе мерења влажности тла. У наставку је дефинисана некаква уобичајена подела мерних метода. Методе за мерење влажности земљишта могу се генерално поделити на:

- Директне методе :
 - Термогравиметријске;
 - Термоволуметријске;
- Индиректне методе:
 - Волуметријске методе:
 - Неутронске методе;
 - Диелектричне методе (TDR, FDR, ADR, Фазни помак, TDT);
 - Тензиометријске (Тензиометри, Расипање топлоте, Гипсани блок).

2.3.1. Директне методе

Спадају у групу деструктивних метода, значи потребно је издвојити узорак земљишта да би се измерила влажност.

Предности ових метода су:

- Тачност мерења;
- Нису скупе;

Основни недостатак ове методе представља дуго време испитивања.

У ове методе спада термогравиметријска метода која се користи за одређивање влажности у узорцима у поступку калибрације сонди.

Поступак:

1. Измери се маса празне посуде која се користи за узорковање (m_p);
2. Посуда се напуни земљиштем које се испитује;
3. Измери се маса пуне посуде (са влажним земљиштем) (m_m);
4. Узорка се ставља у пећ и суши на температури од 105 °C до константне масе;
5. Измери се маса осушеног узорка (m_d);

На овај начин добија се величина ω' која представља однос масе воде у узорку (m_w) и масе сувог узорка (m_d'):

$$\omega' = \frac{(m_m - m_p) - (m_d - m_p)}{(m_d - m_p)} \times 100\%$$

$$\omega' = \frac{m_m - m_d}{m_d'} \times 100\%$$

$$\omega' = \frac{m_w}{m_d'} \times 100\%$$

Величина ω' користи се даље у раду као показатељ влажности земљишта, а веза између влажности земљишта ω и величине ω' дата је изразом:

$$\omega = \omega' \frac{\gamma_w}{\gamma_d'}$$

Где је: γ_w [kN/m³] - запреминска тежина воде и

γ_d [kN/m³] - запреминска тежина узорка земљишта у сувом стању

Са становишта овог истраживања веома је повољно користити величину ω' из тог разлога што ω' не зависи од запреминске тежине узорка у сувом стању γ_d .

2.3.2. Индиректне методе

Одређивање влажности земљишта индиректним методама подразумева процену влажности на основу калибрисаног односа влажности земљишта и других мерљивих физичких величина.

Једне од таквих су и волуметријске методе које процењују запремину воде у запремини узорка непоремећеног земљишта.

2.3.2.1. Неутронске сонде

Принцип рада: Брзи неутрони емитују се из радиоактивног извора и приликом судара са честицама које имају исту масу (протони водоника) они нагло успоравају и настаје облак спорих неутрона. Како је водоник елемент који улази у састав воде, густина облака спорих неутрона око сонде биће пропорционална садржају воде у земљишту.

Опис: Сонда (Слика 3.) има облик дугачког уског цилиндра у који су постављени извор зрачења и детектор. Мерење се врши увођењем сонде у приступну цев која је пре тога постављена у земљиште. Могуће је мерење влажности на различитим висинама. Влажност се добија линеарном калибрацијом читања са сонде и влажности узорака из околине мерног места.

Предности:

- Тачност;
- Велика мерна запремина;

- Салинитет и ваздушни џепови не утичу на резултате;

Недостаци:

- Опасност од зрачења;
- Потребно обучено особље;
- Читања са сонде дуго трају;
- Скупа опрема;



Слика 3. Неутронска сонда

2.3.2.2. Диелектричне методе

Прво што се наглашава је да се овим методама долазило до вредности влажности земљишта у Експерименту 1.

Оцена садржаја воде према овој групи метода, врши се на основу мерења обима проводљивости земљишта или диелектричне константе K_a . Диелектрична константа детерминише брзину простирања електромагнетних таласа кроз тло. Тло је трофазна средина и свака од фаза утиче на диелектричну константу. За земљиште диелектрична

константа K_a износи између 2 и 5 док је за воду $K_w = 81$. Према томе укупна проводљивост земљишта условљена је садржајем воде.

Time Domain Reflectometry (TDR)

Диелектрична константа се одређује мерењем времена пропагације електромагнетног таласа дуж трансмисионе линије која је окружена земљиштем.

Предности:

- Тачност;
- Разноврсност сонди;
- Неосетљивост на нормалан ниво салинитета;
- Није потребна калибрација за различите типове тла;

Недостаци:

- Скупоцена опрема због софистициране електронике;
- Ограничена употреба у условима високог салинитета и тешким глинама са високом проводљивошћу;
- Потребна калибрација у земљишту са високим садржајем везане воде;

На слици 4. Приказана је мобилна апаратура немачког произвођача ИМКО



Слика 4. ИМКО HD2 мобилна апаратура за мерење влажности

Frequency Domain Reflectometry (FDR)

Принцип рада: Електрична капацитивност кондензатора који користи земљиште као диелектрик зависи од садржаја воде у земљишту: када се кондензатор повеже са осцилатором који генерише електрично поље, промене влажности се могу детектовати као промене фреквенције оперативног кола.

Опис: Сонде се састоје од две или више електрода које се постављају у земљиште. Сонде се постављају у приступну цев што омогућава мерење влажности на различитим дубинама.

Предности:

- Тачне након калибрације;
- Могу да мере у условима високог салинитета;
- Лако се повезују са конвенционалним логерима;
- Релативно приступачна цена;

Недостаци:

- Јако мала сфера осетљивости;
- За поуздано мерење неопходно је остварити добар контакт између земљишта и цеви;
- Осетљива на ваздушне џепове;
- Потребна калибрација;

2.3.2.3. Тензиометарске методе

Сви тензиометарски инструменти (Слика 5.) имају порозан материјал у контакту са земљиштем, кроз који вода може да филтрира. Дакле, када је земљиште суво вода филтрира из порозног медијума у суво земљиште, када је земљиште влажно вода из земљишта филтрира у инструмент. Тензиометарски инструменти не захтевају претходну калибрацију, међутим, у већини случајева морају се поставити на терену довољно дуго пре мерења.

Принцип рада: Вода из испуњене заптивене цеви пролази кроз поре керамичке чашице или мембране у земљиште до успостављања равнотеже између потенцијала земљишта да задржи воду и створеног вакуума у цеви. Вакуум у цеви региструје се помоћу вакуумметра.

Предности:

- Директно читање;
- Могуће континуално читање;
- Мерење независно од салинитета

Недостаци:

- Ограничен уисни капацитет;
- Велико време одзива;
- Захтева често пуњење цеви у сувим условима;



Слика 5. Тензиометар

Гипсани блок

Гипсани блок (Слика 6.) представља електрохемијску ћелију која је испуњена zasiћеним раствором електролита. Састоји се од порозних гипсаних блокова са паром електрода који се поставља у земљиште. Воду из земљишта упија гипсани блок све док се не достигне равнотежно стање. Након тога се мери електрични отпор између електрода који је показатељ влажности у гипсу.

Предности:

- Није потребно одржавање;
- Могућност неутралисања салинитета;
- Погодан за регулисање дефицита наводњавања;

Недостаци:

- Ниска резолуција;
- Ограничена употреба у истраживањима;
- Особине блока се мењају у току времена;
- Дуго време одзива;



Слика 6. Eijkelkamp апаратура

Метод расипања топлоте

Једна од особина воде је и топлотна проводљивост. Према томе проток топлоте у порозној средини пропорционалан је садржају воде.

Топлотна сонда (Слика 7.) се састоји од порозног блока који садржи извор топлоте и осетљиви температурни сензор. Температура блока се мери пре и после отпуштања топлоте. На основу варијације температуре се добија влажност земљишта.

Предности:

- Није потребно одржавање;
- Мерни радијус;
- Могућност континуалног мерења;
- Салинитет нема утицаја на мерења;

Недостаци

- Дуго време одзива;
- Потребан контролор;
- Захтева велику количину енергије;

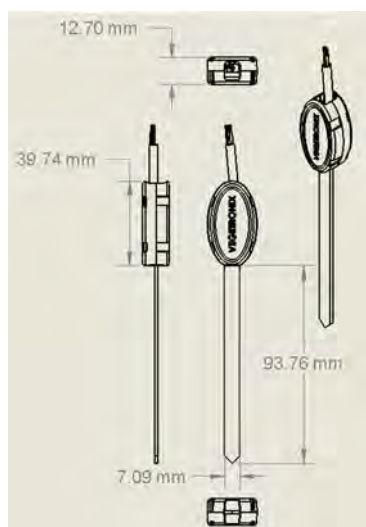


Слика 7. Сonda заснована на принципу расипања топлоте

3. Опис сонди за мерење влажности

За потребе овог испитивања коришћене су сонде америчког произвођача Vegetronix тип VN400 (Слика 10.). Ове сонде мере диелектричну константу земљишта техником трансмисионе линије стога, као што је раније споменуто методе мерења влажности земљишта овим сондама спадају у диелектричне методе. Према томе нису толико осетљиве на салинитет земљишта и не кородирају у току времена. Сонде VN400 раде на високим фреквенцијама па према томе утрошак енергије је већи али баш због високе опертивне фреквенције много су осетљиве при високој влажности земљишта. Што се тиче габарита (Слика 8.), оне су мале и јако су zgodне за руковање и уградњу. Поред сонди апаратура се састоји од логера и рачунара. Логер (Слика 9.) има осам портова тако да се за један логер тренутно може повезати осам сонди. Логер се напаја једносмерном струјом. Има могућност напајања преко УСБ кабла који уједно и служи за комуникацију са рачунаром и преко сопственог адаптера.

Уз сонде се добија произвођачка спецификација, преко које се може остварити увид у параметре ове мерне опреме (Табела 1.).



Слика 8. Димензије сонди



Слика 10. Сonda VH400



Слика 9. Изглед логера

Табела 1. Произвођачка спецификација сонди

VH400 Сензор	
Потрошња	< 7mA
Напон напајања	3.3V to 20 VDC.
Димензије	Слика 3.1.
Отпор на излазу	100 к Ω
Опсег радних температура	-40°C до 85°C
Тачност	2%
Напон на излазу	0 to 3V зависно од садржаја влаге

4. Калибрација сонди за мерење влажности земљишта

Решавање задатка предоченог у уводу почиње калибрацијом сонди за мерење влажности земљишта. Под калибрацијом подразумевамо одређивање функционалне зависности између физичке величине коју нам сонда даје, а у нашем случају то је напон и влажности земљишта односно величине која нам је од интереса, која се добија директним методом, конкретно термогравиметријском методом (која је описана горе).

Опрема која је потребна за калибрацију:

- 1) Три сонде Vegetronix VH 400 (Слика 3.3);
- 2) Рачунар који је повезан са логером
- 3) Две градуисане посуде (кофе)
- 4) Сито прореза приближно 5мм
- 5) Пећ
- 6) Мање посуде за узимање узорака
- 7) Вага прецизности $10^{-4}g$
- 8) Мензура

Земљиште:

За калибрацију сонди коришћене су три врсте земљишта и то:

- Земљиште које је узето приликом израде инфилтрационог базена у дворишту Института за Хидротехнику и водно еколошко инжењерство (Земљиште 1);
- Земљиште са обрадиве површине (село Чокешина, Земљиште 2);
- Земљиште из околине Суботице (Земљиште 3) ;

Надаље ће се користити номенклатура у заградама за описивање различитих типова земљишта кроз опите.

Поступак калибрације:

- 1) Први корак је механичко ситњење земљишта. Како је земљиште у периоду ископа имало природну влажност, а након чега је стајало у релативно сувим условима у узорцима је било доста крупних комада. Да би се земљиште касније правилно уградило у узорке неопходно га је уситнити;
- 2) Затим следи просејавање земљишта да би се одстранили крупнији комади и евентуално делови вегетације (корење);
- 3) Након што је земљиште просејано следи сушење у пећи два до три часа, све до константне масе. После сушења сматрамо да је влажност земљишта једнака нули.
- 4) Да би се приступило даљем припремању узорка неопходно је да се маса охлади на температури од око 20 °C.

- 5) Следи уградња узорка у градуисану посуду у којој ће се извршити мерење (урањање сонди). Узорак се уграђује у најмање три слоја уз набијање до одређене градуисане црте. Набијање се врши да би се, колико је то могуће опонашали природни услови.
- 6) Пре уградњи сонди, под претпоставком да смо повезали сонде и логер односно логер и рачунар неопходно је проверити рад сонди. То се постиже урањањем сонди у воду.
- 7) После уградње приступа се уградњи сонди и читавању. Сонде се уграђују вертикално. Растојање између две сонде не сме бити мање од 2 cm због међусобног утицаја.
- 8) Како смо уградили сонде на рачунару ће се појавити резултати (напон).
- 9) Узорак из градуисане посуде у којој су сонде пресипамо у другу посуду, притом додајемо одређену количину воде одмерене у мензури (исту количину додајемо у наредном циклусу).
- 10) Мешањем хомогенизујемо масу. Враћамо земљиште у посуду до градуисане црте трудећи се да што више опонашамо природно стање.
- 11) Уграђујемо сонде и читамо резултате
- 12) Узимамо узорак у мању посуду чију масу претходно одредили.
- 13) Меримо мању посуду са влажним узорком.
- 14) Мању посуду са влажним узорком остављамо да се суши у пећи до константне масе.
- 15) Меримо масу осушеног узорка и на основу ње срачунавамо проценат влажности.

Калибрација сонди се врши у четири циклуса, при томе се понављају кораци од 9. до 15.

5. Простирање влажног фронта кроз узорак земљишта

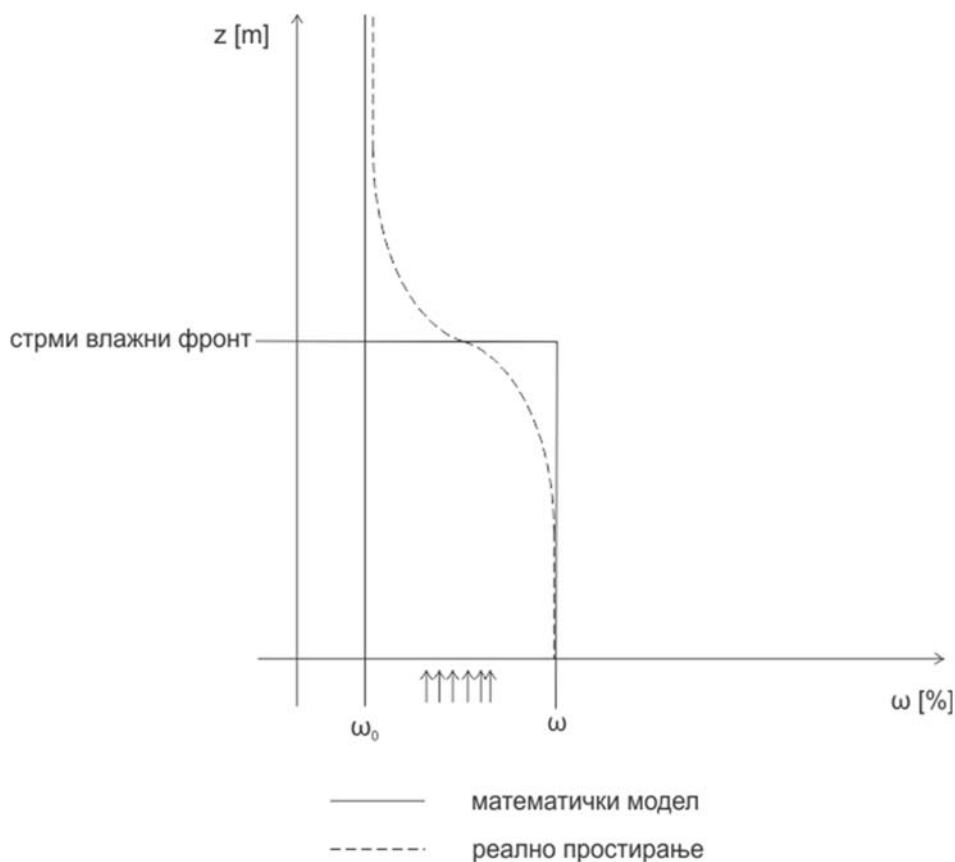
Други део овог задатка је експериментално утврђивање проласка влажног фронта кроз узорак. За узорак користимо земљиште које је узето приликом изградње инфилтрационог базена у дворишту Института. Детекција промене влажности у узорку обавља се помоћу калибрисаних сонди Vegetronix VN400. На основу претходне калибрације у могућности смо да одредимо промену влажности узорка у току времена.

Вертикална пропација влажног фронта симулира се методом Green-Ampt-a. Основна предност ове методе је то што се инфилтрација може добити из физички мерљивих параметара.

Претпоставка методе:

- Влажни фронт је дефинисан;
- Влажност у слоју изнад и испод влажног фронта остаје константна;
- Распоред влажности у слоју је униформан;

На слици 11. Приказан је математички модел простирања влажног фронта (Green-Ampt модел) за који важе горе наведене претпоставке. и реално простирање влажног фронта.



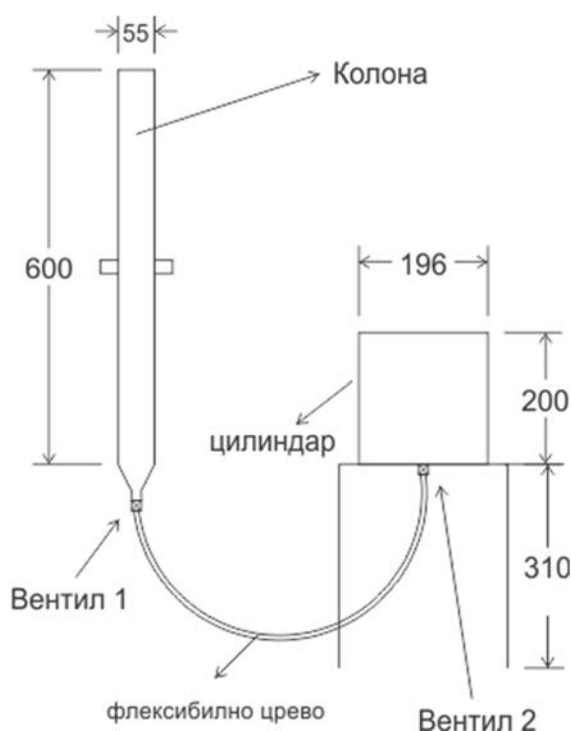
Слика 11. Простирање влажног фронта

5.1 Инсталација

Сва мерење обављају се на инсталацији која је формирана од елемената који су раније коришћени за потребе научно истраживачког рада у Лабораторији Института за Хидротехнику и водно еколошко инжењерство. Инсталација се састоји од:

- 1) Вертикалне цилиндричне колоне промера 55 мм и висине 600 мм;
- 2) Вертикалног цилиндра висине 200 мм и пречника 196 мм;
- 3) Флексибилног црева;

Шема инсталације дата је на слици 12..



Слика 12. Шема инсталације коришћена за праћење простирања влажног фронта кроз узорак земљишта

5.1.1. Опис инсталације

У овом делу дат је опис инсталације (Слика 13. И Слика 14.) уз помоћ које је изведен експеримент:

- 1) Колона је направљена од плексигласа, висине 600 мм и промера 55 мм. Монтирана је на вертикалну цев. За потребе мерења на колони је фиксирана градуисан метар, која служи за читавање кота нивоа воде у колони. Доњи крај колоне завршава се конусом на који је намонтиран кугласти затварач промера 3/8";

- 2) Цилиндар (Слика 15.) је такође направљен од пексигласа. Има сопствено постоље висине 310 мм. Сам цилиндар има висину од 200 мм и промер од 196мм. На дну цилиндра избучен је отвор на који је монтирано колено (90 степени) и кугласти затварач такође промера 3/8" (10 mm).
- 3) Флексибилно црево је такође провидно и промера 3/8" (10 mm).

5.2. Принцип мерења

У узорак претходно припремљеног земљишта уграђене су сонде, и то у три нивоа по две сонде. Оваквим начином уградње можемо боље сагледати пролазак влажног фронта кроз узорак тј. можемо боље сагледати нехомогеност уграђеног узорка. Уколико две сонде на истом нивоу истовремено детектују пролазак влажног фронта, можемо предпоставити да је испод њих узорак хомоген. Сматрамо да је узорак незасићен. Током опита бележи се континуално пад пијезометарске коте у колони и читање са сонди. На основу читања напона можемо релативно проценити садржај воде по нивоима у којима су постављене сонде.

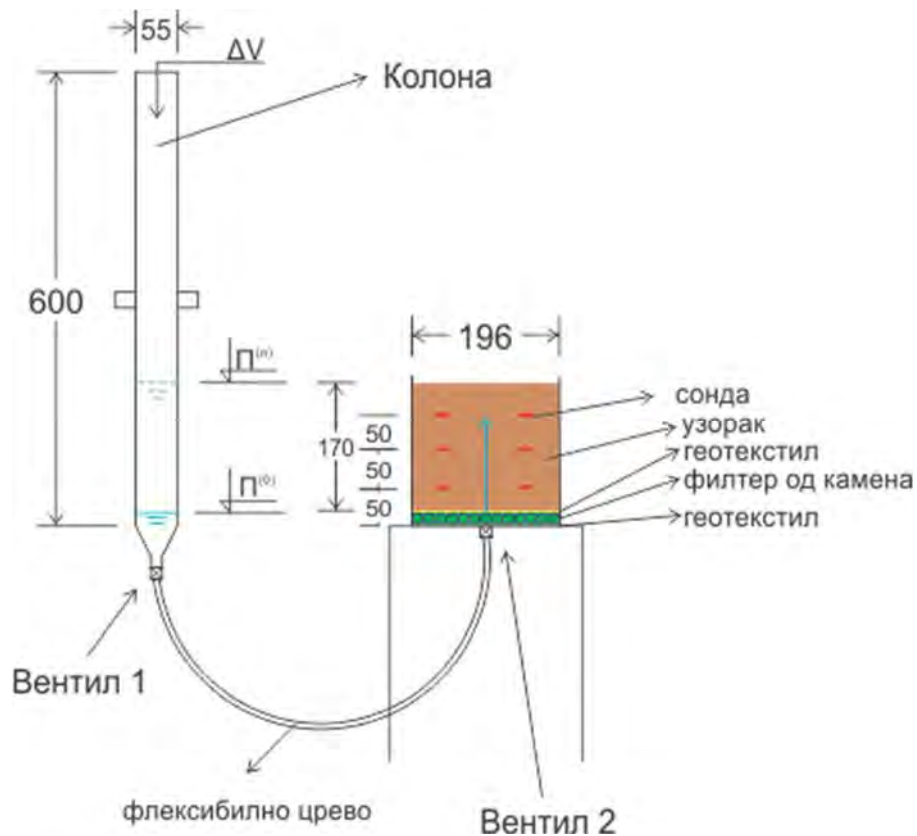
5.3. Опис опита

Након што смо механички уситнили земљиште следи просејавање кроз сито да би се одстранили крупни комади који се нису уситнили. Пре почетка уградње неопходно је одредити садржај воде. То смо урадили термогравиметријском методом (као код калибрације сонди). Затим се у дно цилиндра (слика 13.) ставља геотекстил преко кога иде слој камена униформне крупноће која износи 5 мм. Слој камена се поставља из разлога да би се влажни фронт равномерно ширио по узорку. Преко камена се поставља још један слој геотекстила да би спречио евентуално испирање честица из узорка. Након тога следи уградња узорка.

Узорак се уграђује у четири слоја и то тако што се након насипања сваког слоја узорак набија. Када се узорак добро сабије постављају се сонде. У конкретном случају први слој је висине 50 мм тако да су на тој висини уграђене прве две сонде. Други слој је завршен на 100мм од дна и према томе то је висина уградње друге две сонде. Трећи слој је завршен на 150 мм од дна и ту је постављен трећи пар сонди. Преко тога додато је још 20 мм земљишта.

Простор који је преостао до врха суда износио је у просеку око 30 мм. Укупна висина узорка износи 170 мм. После уградње узорка почиње се са континуалним мерењем напона. Резултати су углавном уједначени и сонде дају релативно константне напоне у току временена. Следећи корак јесте довођење нивоа воде до непосредне близине узорка(Слика 13.) у цилиндру доливањем воде у колону. Овим кораком можемо одстранити, колико толико, ваздух из црева и филтерског слоја. Након довођења воде до овог нивоа примећујемо капиларно пењање воде кроз узорак без обзира што између колоне и цилиндра није остварена разлика пијезометарских кота (због неравномерне висине филтерског слоја). После претходно описаних поступака приступамо доливању

одређене количине воде у колону (0.5 л). Доливањем воде у колону остварили смо разлику пијезометарских кота и вода почиње да се креће кроз узорак што се да и прометити визуелним путем. Континуално се читавају нивои воде у колони и бележи се време читавања коте. Истовремено бележе се и подаци на рачунару које дају сонде. Након одређеног времена кад се пијезометарске коте у цилиндру и колони изједначе у колону се досипа иста количина воде 0.5 л. Овај поступак у конкретном опит се понавља четири пута. Када се појави слободна површина воде у цилиндру изнад узорка опит се прекида и сматра се да је се узорак заситио.



Слика 13. Шема инсталације са уграђеним узорком и сондама



Слика 14. Изглед инсталације пре почетка опита



Слика 15. Цилиндар од плексигласа

6. Одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације

Трећи и финални циљ овог пројекта је одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације експерименталним путем. Целокупан пројекат је конципиран тако да се ово испитивање настави на претходно (простирање влажног фронта) на истој лабораторијској инсталацији.

6.1. Методе за одређивање Дарсијевог коефицијента филтрације

Генерално методе засноване на Дарсијевом закону филтрације могу се поделити на:

- Теренске методе
 - Методе микро размере (инфилтметри);
 - Методе макро размере (тест пробног црпљења, анализа рада дренажног система);
- Лабораторијске методе
 - Са констатним нивоом воде;
 - Са променљивим нивоом воде;

У даљем испитивању користећемо метод са променљивим нивоом воде

6.1.1. Лабораторијски модел са променљивим нивоом воде

Метод са променљивим нивоом воде примењује се за слабопропусна земљишта. Сматрасе да је узорак земљишта слабопропусан те из тог разлога примењујемо овај метод. Инсталација за овај модел дата је на слици 16.

Математички модел:

$$\text{Дарсијева брзина струјања: } v = -k \frac{h}{L} \quad (1)$$

$$\text{Динамичка једначина: } Q = vA = -k \frac{h D^2 \pi}{L 4} \quad (2)$$

$$\text{Једначина континуитета: } Q = -a \frac{dh}{dt} = -\frac{d^2 \pi}{4} \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

Из једначина (2) и (3) следи:

$$-\frac{d^2 \pi}{4} \frac{dh}{dt} = -k \frac{h D^2 \pi}{L 4} \quad (4) = (2) + (3)$$

Раздвајањем променљивих у једначини (4) следи:

$$k \frac{D^2}{a^2} \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} dt = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} \quad (5)$$

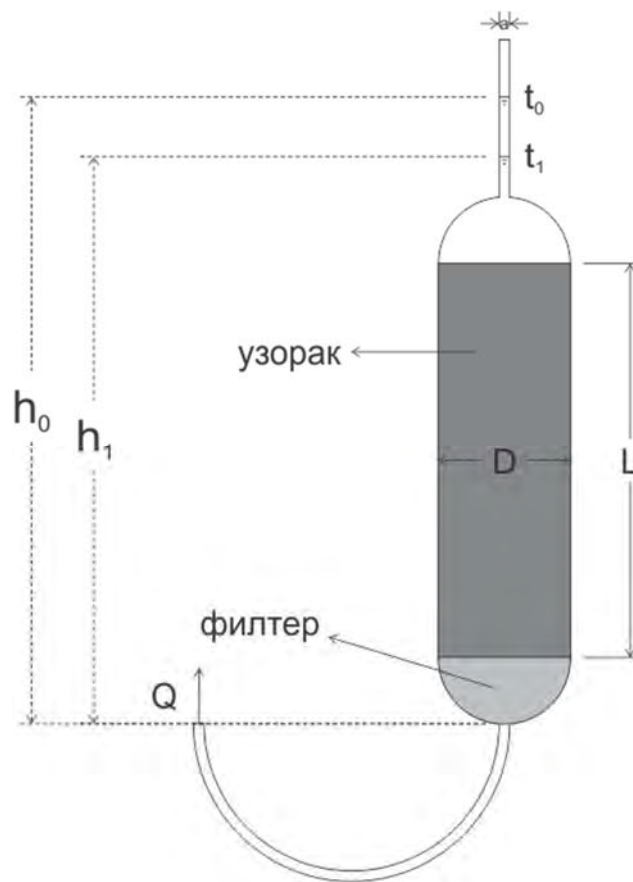
Решавањем интеграла у једначини (5) добија се:

$$k \frac{D^2}{d^2 L} (t_1 - t_0) = \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (6)$$

Коначно решење:

$$k = \frac{d^2}{D^2} \frac{L}{(t_1 - t_0)} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (7)$$

На основу једначине (7) одредићемо коефицијент филтрације након лабораторијских мерења



Слика 16. Шема уз математички модел

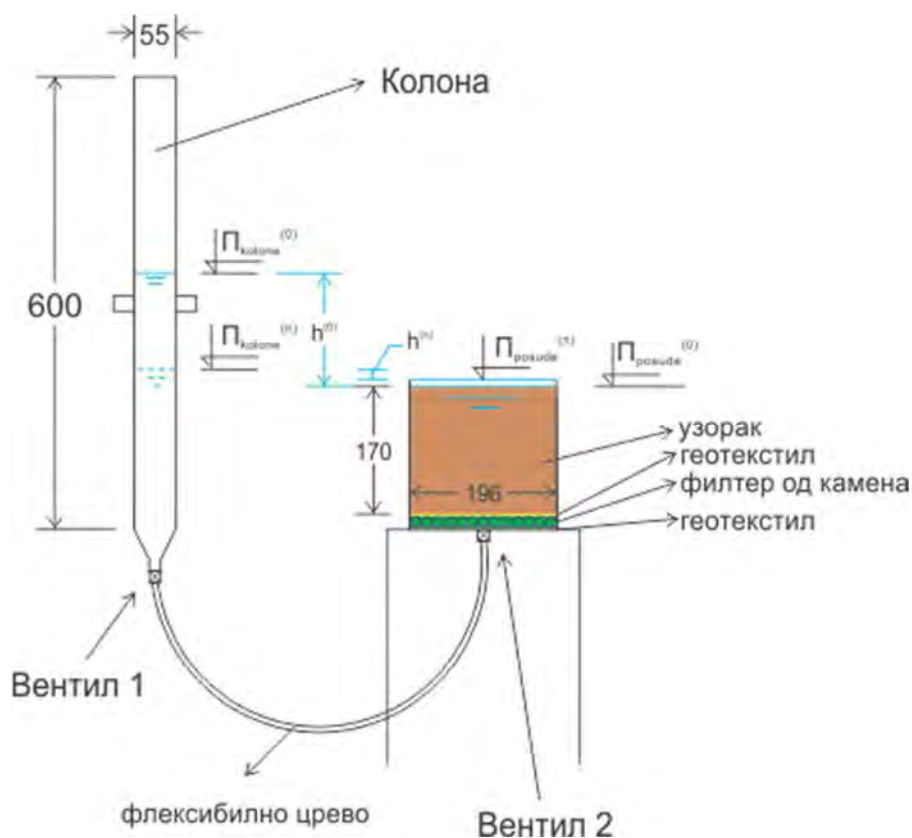
6.1. Принцип мерења

Након проласка влажног фронта кроз узорак земљишта изнад узорка се појавила слободна површина воде па на основу тога може се сматрати да је узорак потпуно засићен водом. Сада се може створити разлика у пијезометарским нивоима у цилиндру и колони. Мерењем пада коте у колони односно раста коте у цилиндру и мерењем протеклог времена, добијају се неопходни резултати за прорачун.

6.2. Опис опита

Ради одређивања Дарсијевог коефицијента урађена су два опита. Први опит је урађен одмах након опита проласка влажног фронта (означен као Експеримент 2а), док је други урађен са узорком који је стајао потопљен у води четири дана (означен као експеримент 2б). Опис мерења је идентични за оба опита.

У почетном тренутку оба затварача су затворена. Према томе долива се вода у колону да би се створила почетна пијезометарска разлика (h_0). Бележи се почетна кота у колони ($\Pi^{(0)}_{kolone}$) и почетна кота у цилиндру ($\Pi^{(0)}_{posude}$). Тренутно се отварају славине и мери се време. Сматра се да је опит завршен када се вода испуни цилиндар. У том тренутку зауставља се време и мери се кота у колони ($\Pi^{(n)}_{kolone}$) и кота у цилиндру ($\Pi^{(n)}_{posude}$). Као резултат добија се завршна пијезометарска разлика (h_1). На основу ових мерења рачуна се Дарсијев коефицијент.



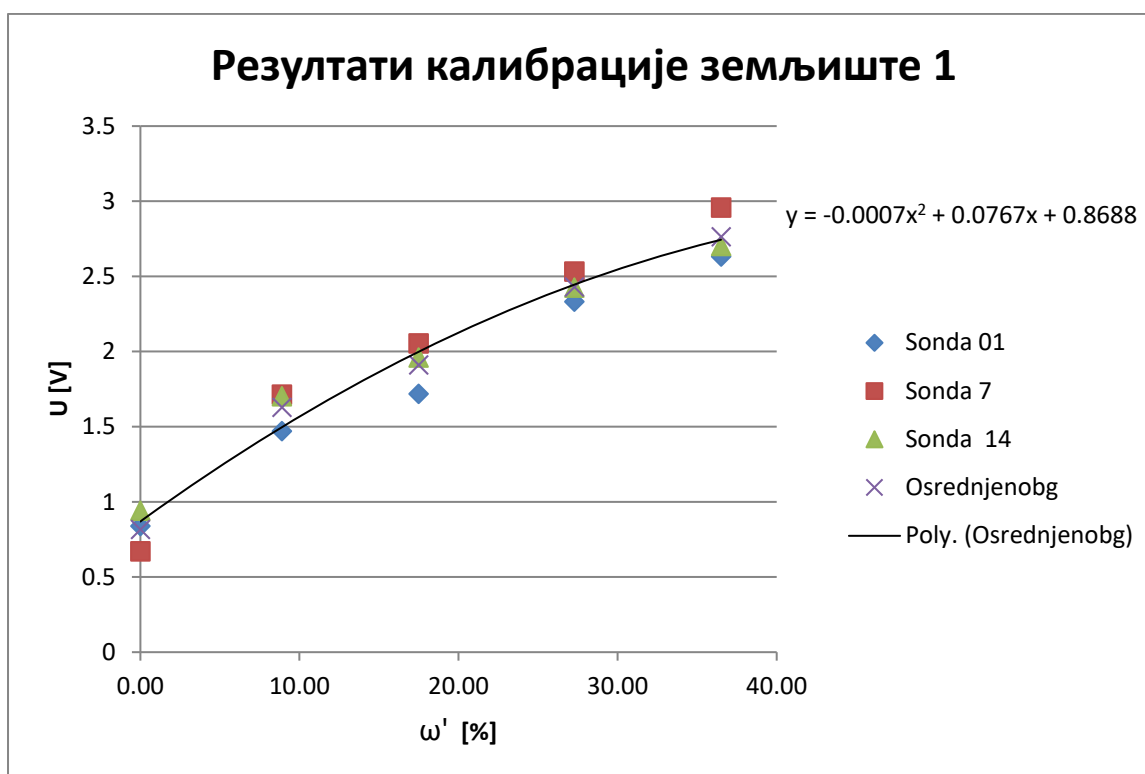
Слика 17. Шема инсталације за Дарсијев опит са ознакама

7. Резултати испитивања

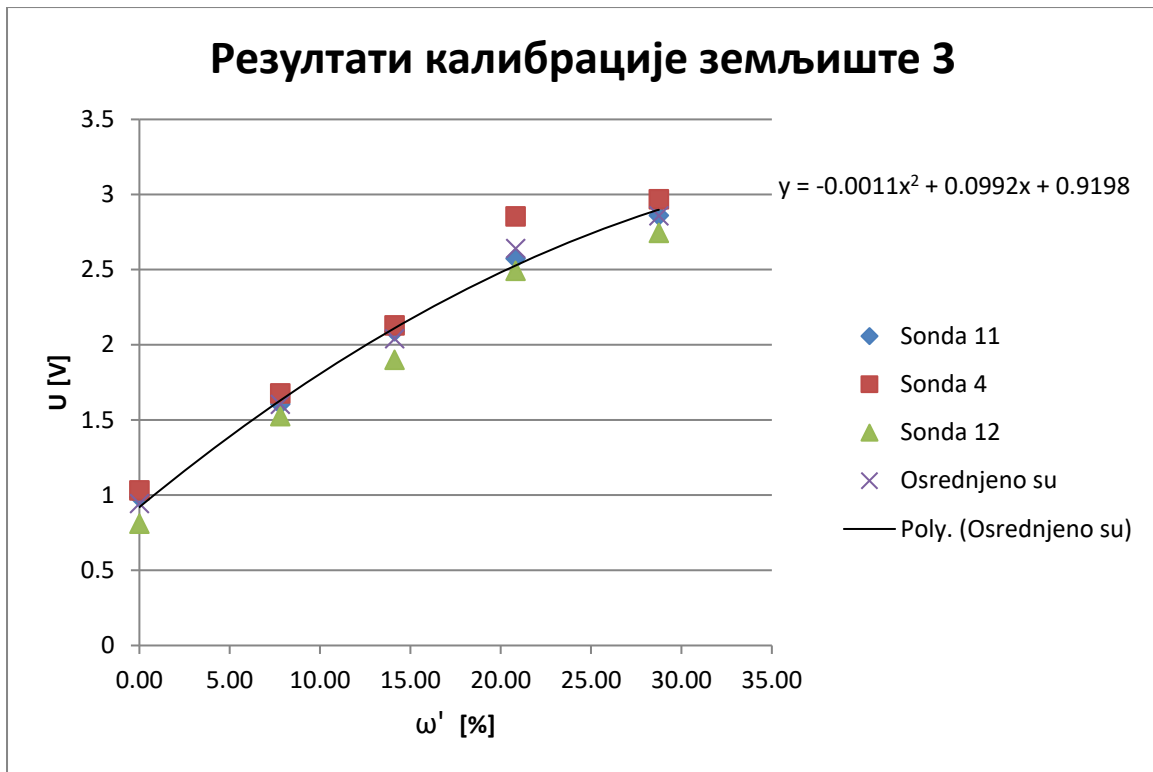
У овом делу биће приказани резултати мерења. Резултати мерења се интерпретирају графички.

7.1. Резултати калибрације сонди:

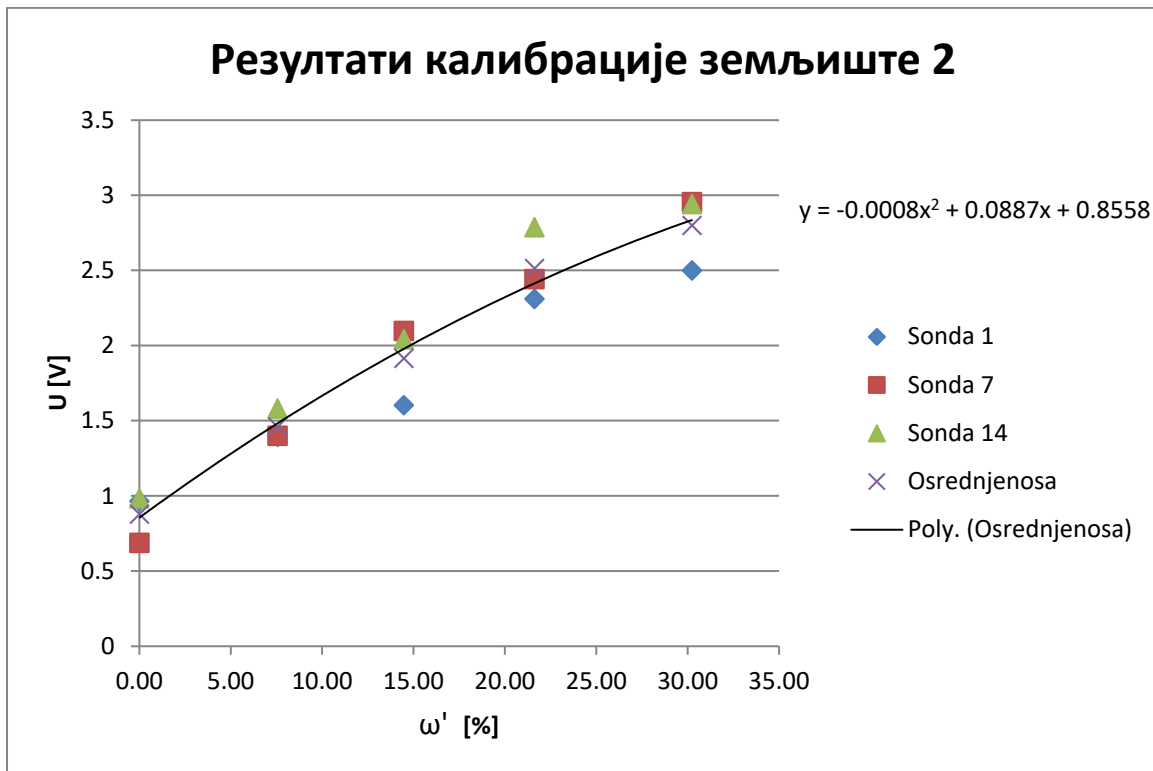
Резултати калибрације сонди дати су на дијаграмима који показују зависност излазног напона (на ординатној оси) и садржаја воде у земљишту(апсцсној оси). Поред сваког дијаграма дата је једначина криве повучена кроз тачке које одговарају вредностима осредњеног излазног напона. У једначини Y представља излазни напон, а X садржај воде у земљишту.



Дијаграм 1. Калибрациона крива добијена за Земљиште 1

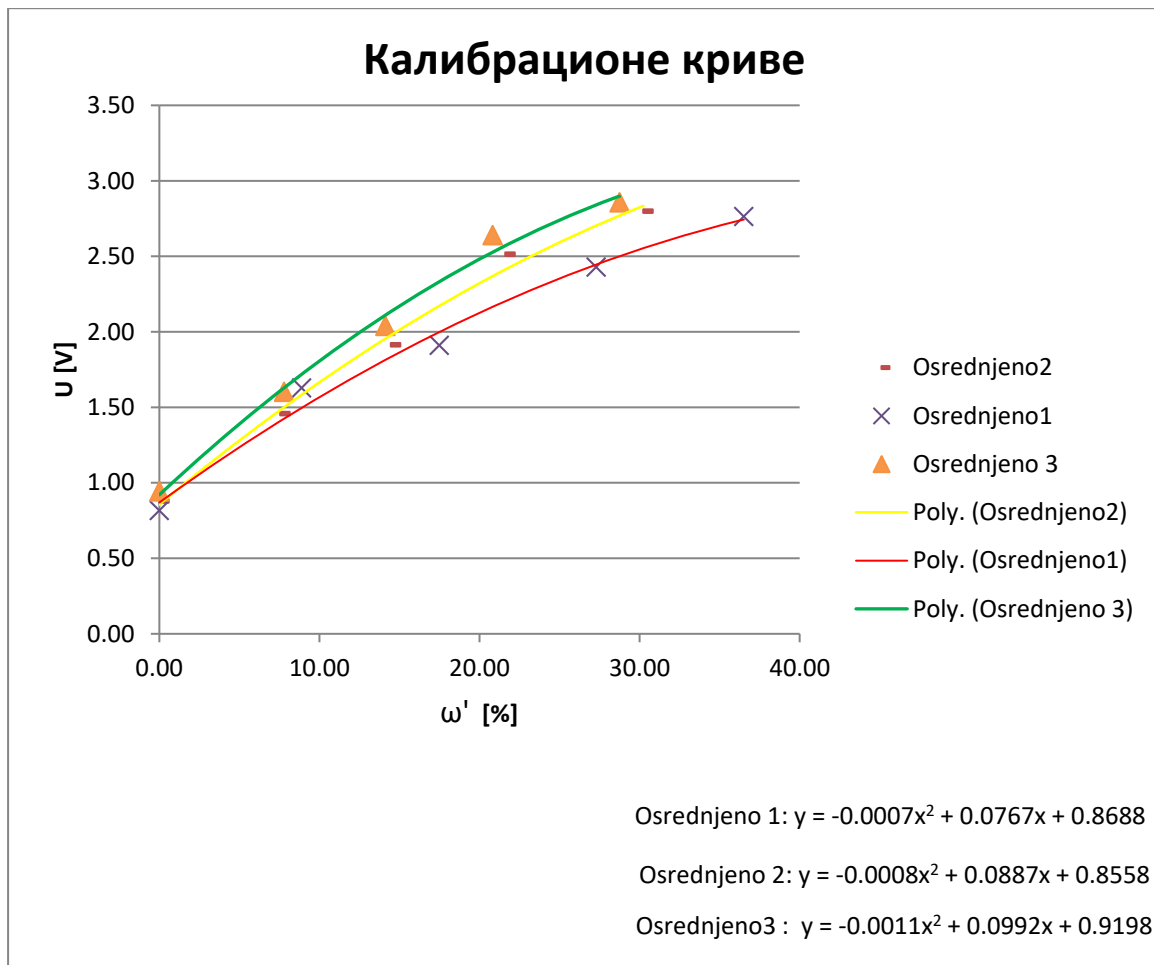


Дијаграм 2. Калибрациона крива добијена за Земљиште 2



Дијаграм 3. Калибрациона крива добијена за Земљиште 3

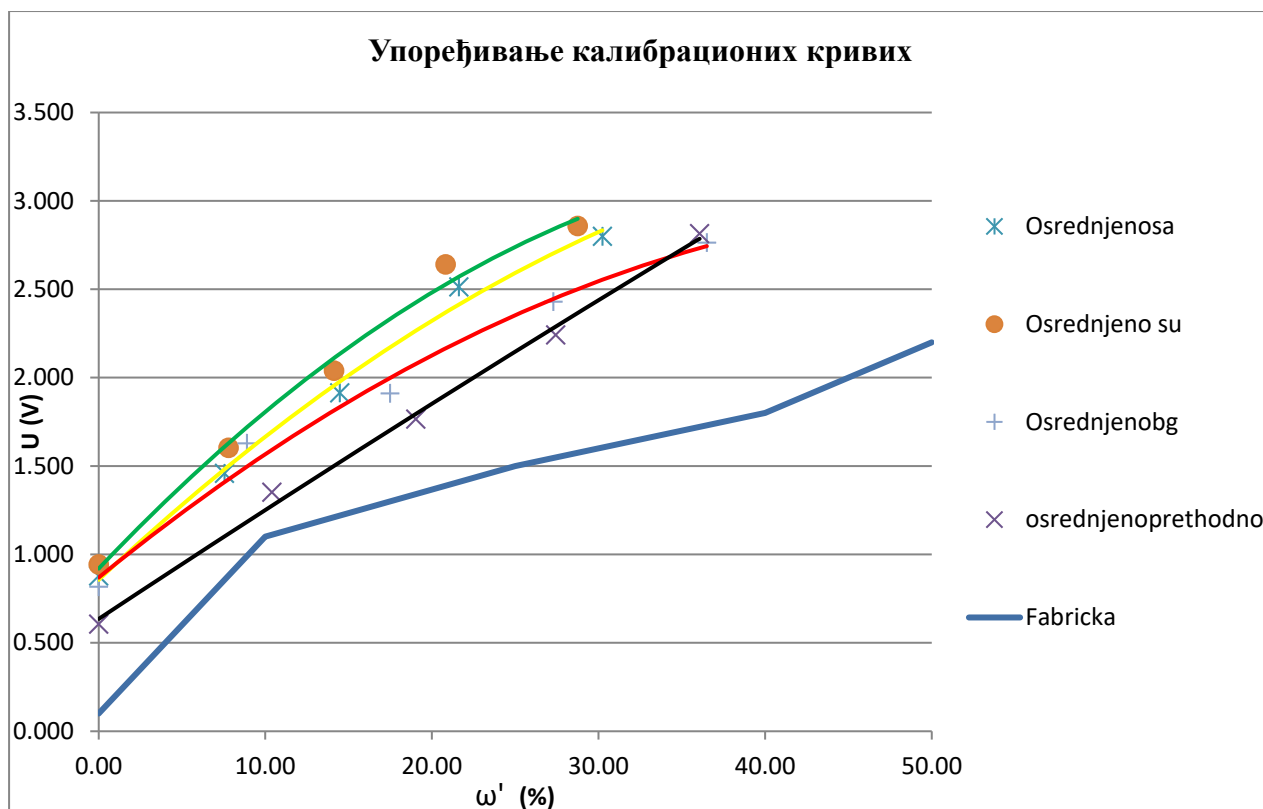
На Дијаграму 4. приказани су калибрационе криве за сва три земљишта



Дијаграм 4. Калибрационе криве

На основу Дијаграма 1. и дијаграма 4. добијена је једначина калибрационе криве за Земљиште 1 и на дијаграму је означена као Осредњено1. На основу ње изведена је зависност (8) између влажности земљишта и излазног напона и има облик полинома другог степена:

$$\omega' = 5.0408 \cdot U^2 + 0.8493 \cdot U - 4.2789 \text{ [%]} \quad (8)$$

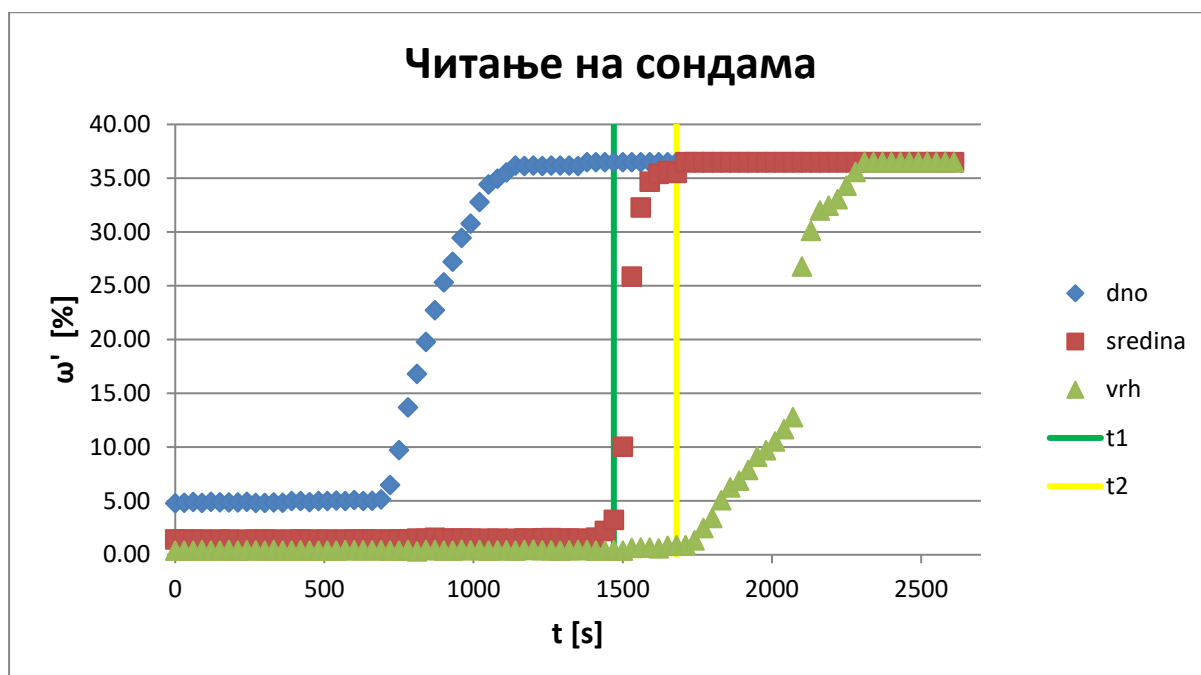


Дијаграм 5. Калибрационе криве добијене на основу калибрације, фабричке калибрације и претходних калибрација за земљиште 1

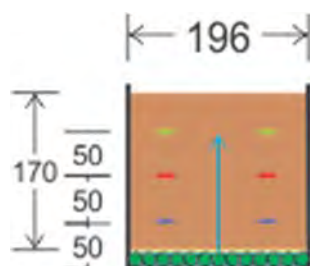
На дијаграму 5. Приказане су калибрационе криве добијена на основу калибрације сонди које су спроведене као један од циљева овог задатка, затим калибрациона крива према фабричким препорука и крива добијена на основу истраживања другог аутора који је испитивао само земљиште 1.

7.2. Резултати експеримента 1

Резултати експеримента 1 приказани су на дијаграму 6.. На апсцисној оси приказано је време у секундама, а на ординати су приказане осредњене влажности узорка (осредњена читања две сонде у истом нивоу) у процентима добијене на основу калибрационе криве за Земљиште 1. На дијаграму 6 може се приметити пролазак влажног фронта и како су сонде реаговале у току експеримента.



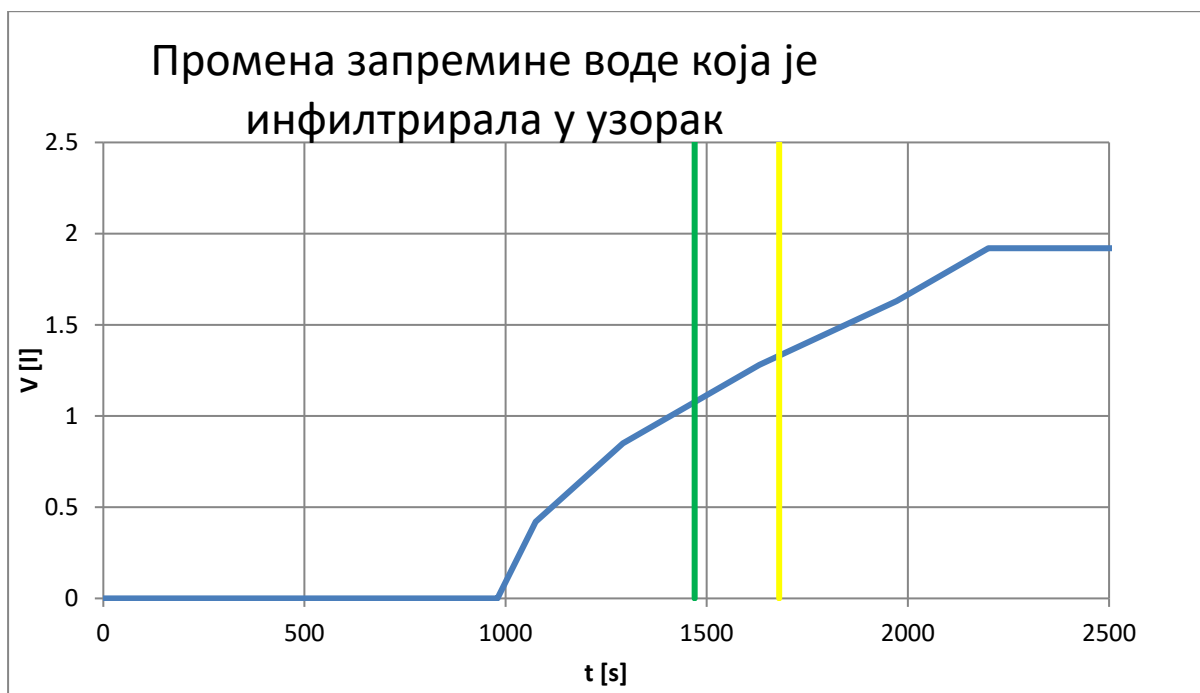
Дијаграм 6. Читање на сондама



Слика 18. Положај сонди и њихово обележавање

На слици 18. Види се положај сонди у три нивоа, сонде су представљене различитим бојама које одговарају бојама на дијаграму 6.

Дијаграм 7. Представља промену запремине инфилтриране воде у току времена. Са дијаграм 7 можемо одредити укупну запремину воде која је инфилтрирала у узорак, а на основу тога одредујује се порозност узорка



Дијаграм 7.Промена запремине воде која је инфилтрирала у узорак

Запремина воде која је инфилтрирала у узорак: 1.92 l;

Запремина узорка:4.98 l;

Средња порозност: $p=38.56\%$;

.Како је се простирање таласа пратило и преко континуалног мерења промене влажности узорка (Дијаграм 6) и преко промене запремине инфилтриране воде у узорак (Дијаграм 7)с тога може се урадити провера добијених резултата у Експерименту 1. Провера се ради на следећи начин:

- Одаберу се два тренутка у току изођења експеримента на Дијаграму 6,
 тренутак 1 $t_1=1470$ s , садржај влаге $\omega'_1=3.25\%$;
 тренутак 2: $t_2=1680$ s, садржај влаге $\omega'_2=36.5\%$;
- Срачуна се разлика влажности (претпостављено $\frac{\gamma_w}{\gamma_d} = 0.85$)

$$\Delta \omega' = \omega'_1 - \omega'_2 = 32.25\%;$$

$$\Delta \omega = \Delta \omega' \frac{\gamma_w}{\gamma_d}$$

$$\Delta \omega = 27.41\%$$

- Срачуна се запремина узорка у зони деловања сонди (2 cm испод сонде):

$$V_{uzorka} = 0.6 \text{ l}$$

- Срачуна се запремина инфилтриране воде према дијаграму 6.

$$V_{inf1} = V_{uzorka} \Delta \omega = 0.17 \text{ l};$$

- Сада на основу Дијаграма 7. Срачуна се количина инфилтриране воде:

$$V_{inf2} = 0.25 \text{ l};$$

- На основу порозности количина инфилтриране воде је:

$$V_{inf3} = p V_{uzorka} = 0.23 \text{ l}$$

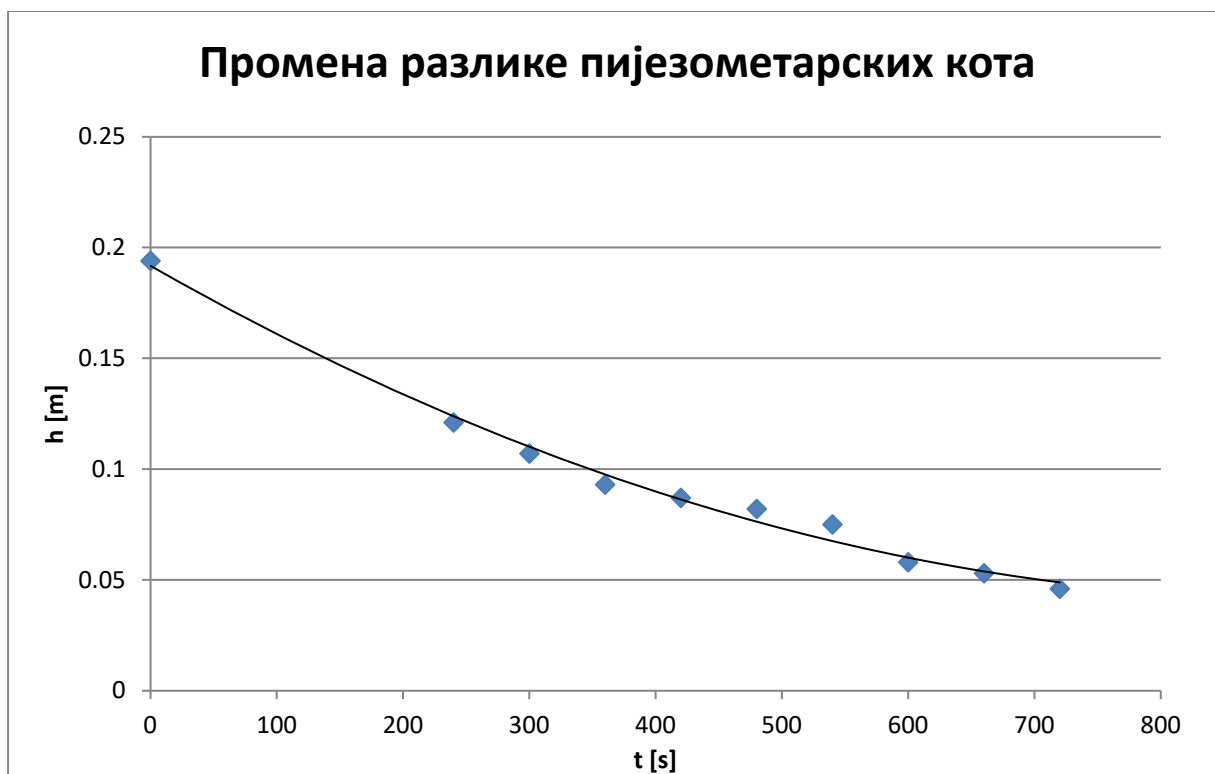
Према томе величине V_{inf2} и V_{inf3} су приближно једнаке, може се закључити да је Експеримент 1 успешно изведен.

7.3. Резултати експеримента 2а

Експеримент 2а је урађен одмах након Експеримента 1 те су нивои праћени континуално и у цилиндру (посуди) и колони.

Табела 7.1. Промена Π кота у колони и посуди и њихова разлика

t [s]	Π_{kolone} [m]	Π_{posude} [m]	h [m]
0	0.383	0.189	0.194
240	0.318	0.197	0.121
300	0.304	0.197	0.107
360	0.29	0.197	0.093
420	0.285	0.198	0.087
480	0.28	0.198	0.082
540	0.275	0.2	0.075
600	0.26	0.202	0.058
660	0.255	0.202	0.053
720	0.249	0.203	0.046



Дијаграм 8. Промена разлике пијезометарских кота

Из приложене таблице 7.1. на основу временски пресека $t_1=300$ s и $t_2=720$ s и на основи израза (7) добијене су следеће вредности за Дарсијев коефицијент водопропусности:

Табела 7.2. Вредности
Дарсијевог коефицијента
филтрације у временским
тренуцима t_1 I t_2

	k [m/s]	k [m/dan]
t2	2.60E-05	2.24
t1	2.54E-05	2.20

7.4. Резултати експеримента 2б

Резултати експеримента 2б добијена су након што је узорак земљишта стајао у потошљеном стаљу 4 дана.

Табела 7.3. Промена Π ката у колони и посуди и њихова разлика

t [s]	Π_{kolone} [m]	Π_{posude} [m]	h [m]
0	0.317	0.198	0.119
1050	0.232	0.205	0.027

Табела 7.4. Вредности Дарсијевог коефицијента филтрације

k [m/s]	k [m/dan]
1.72E-05	1.49

8. Дискусија

У овом поглављу изнети су коментари везани за изведене експерименте, неочекиване исходе експеримената и добијене резултате.

8.1. Дискусија резултата калибрације сонди

На основу добијених резултат можемо закључити да је калибрација сонди неопходна. Калибрационе криве су врло блиске једна другој, али се не поклапају што је се и очекивало.

Приликом калибрације при повећању влажности земљишта приметио сам да Земљиште 1 има већу порозност од Земљишта 2 ,а Земљиште 2 има већу порозност од Земљишта 3. Овај закључак је изведен на основу измерене максималне влажности земљишта . Земљишта 2 и 3 су имала далеко мању максималну влажност од Земљишта 1. На основу порозности закључујем да Земљиште 1 има већи удео ситнијих честица од Земљишта 2 и Земљишта 3.

Приликом испитивања запажено је да две сонде при истој влажности знатно одступају по излазном напону од других сонди те сам то приказао у табели 8.1. На ове две сонде треба обратити пажњу и њихова читања узети са резервом.

Такође резултати калибрације су сагласни са запажањем из стручне литературе да за земљишта са већим садржајем глине за исте вредности влажности добијају мање вредности излазног напона.

Табела 8.1 читање на
сондама при влажности
узорка 17.48%

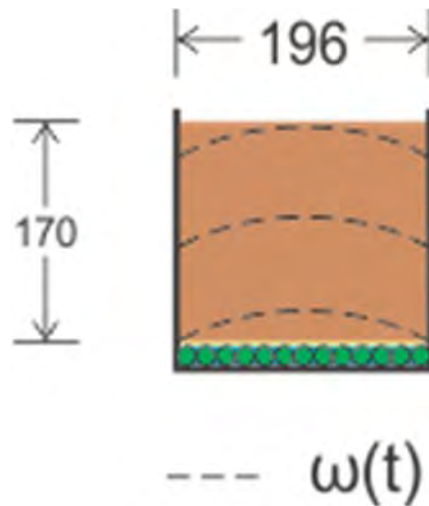
Сонда	Читање [V]
2	1.732
3	1.587
4	1.793
5	1.461
9	1.825
10	1.558
11	1.545
12	1.493
13	1.364
15	1.316
16	1.606
17	1.745
18	1.832
19	1.69
R	1.564

8.2. Дискусија резултата Експеримента 1

Током експеримента 1 на резултате мерења утицала је нехомогеност узорка. Поред нехомогености узорка знатан утицај је имала и сама инсталација (каблови) сонди, која је створила привилеговане путеве води,

На самом почетку експеримента, када је ниво воде у цилиндру био јако близу узорка појавило је се капиларно пењање тако да су сонде у дну бележиле промене влажности и још пре почетка експеримента. Први слојеви узорка су се јако брзо заситили, а сонде су после кратког времена показивале високе вредности напона. Сонде у средини и на врху су одреаговале касније како се и очекивало. Једна сонда са врх узорка бележи велики скок у напону. Закључено је да су каблови створили привилеговани пут води те је скок напона настао из тог разлога.

Влажни фронт, гледајући хоризонталну пројекцију цилиндра, се прво приметио на средини узорка па тек онда уз зидове цилиндра. Закључено је уз зидове цилиндра узорак био мање набијен, поре су биле веће а самим тим висина капиларног пењања мања.



Слика 19. Пропагација влажног фронта кроз узорак

8.3. Дискусија резултата експеримента 2а

Како је експеримент 2а рађен одмах након експеримента 1, узорак који је на почетку експеримента 1 био у релативно сувом стању након проласка влажног фронта није се понашао са аспекта водопрпусности као узорак од кохерентног материјала од каквог и јесте, већ је имао више сличности са некохернтним материјалима. Из тих разлога у опиту 2а забележене су веће вредности Дарсијевог коефицијента водопрпусности. На неки начин то се и очекивало.

8.4. Дискусија резултата експеримента 2б

Након четири дана, колико је узорак провео потопљен у води, изведен је експеримент 2б. На овај начин добијена је реалнија слика о коефицијенту водопрпусности. Како је земљиште стајало дуго потопљено, очекивао је се мањи коефицијент водопрпусности него у експерименту 2а, те се кренуло са већом разликом пијезометарских кота (h) између колоне и цилиндра. Након почетка опита примећено је цепање узорка у хоризонталној равни. Негде на 2 цм изнад филтерског слоја. Како је забележена кота воде у колони при којој је дошло до цепања узорка добијени су следећи резултати:

Табела 8.2. Вредности кота при којим је дошло да цепања узорка

t [s]	Π_{kolone} [m]	Π_{posude} [m]	h [m]
0	0.35	0.198	0.152

h/L [-]	0.98
---------	------

У табели 8.2. h/l представља градијент при ком је дошло до издизања узорка.

Целокупан узорак изнад пукотине почео је да се издиже, па је се приступило поновном извођењу експеримента 2б. Након почетка са мањом пијезометарском разликом између колоне и цилиндра, опит је изведен до краја.

9. Закључак и предлогом за даљи рад

На основу добијених резултата калибрације види се да зависност између излазног напона и садржаја влажности није једнозначно одређена за сваку врсту земљишта. Ова чињеница указује на то да је за свако земљиште у коме се користе ове сонде неопходно извршити калибрацију истих. У овом раду сонде су коришћене углавном у истој диспозицији где су биле уроњене целе у средину која је испитивана тако да различите диспозиције сонди при истим условима нису испитане. Из тог разлога испитивање и калибрација сонди у различитим диспозицијама представља добру основу за неки даљи рад.

Простирање влажног фронта испоставило се као најзахтевнији експеримент. У том опиту било је неопходно пратити промену више мерених величина, што је представљало потенцијални извор грешака мерења. Ипак у овом експерименту потврђена је теоријска претпоставка да је влажни фронт сргог карактера.

Резултати одређивања Дарсијевог коефицијента водопрпусности су у сагласности са резултатима других аутора који су одређивали коефицијент водопрпусности у овом земљишту раније.

Сваки од експеримената рађен у једној врсти земљишта, тако што се тиче предлога за даља испитивања ту стоји да сваки од ових експеримената треба урадити за друге врсте земљишта у циљу одређивања параметара за прорачун вертикалне инфилтрације.

10. Литература

- 1) Станић, М., Предавања из предмета Дренажни системи, Грађевински Факултет Универзитета у Београду;
- 2) Станић, М., Предавања из предмета Наводњавање, Грађевински Факултет Универзитета у Београду;
- 3) Muñoz-Carpena, R. (2004). Soil Moisture Sensor Introduction. Florida: University of Florida
- 4) <http://www.vegetronix.com/Products/VG400/>
- 5) Иветић, М. (2001). Рачунска хидраулика струјања воде у порозним срединама, Скрипта, Београд
- 6) Максимовић, М. Механика Тла, Београд
- 7) Иветић, Д., Опис и калибрација сонди за влажност VN400 произвођача VEGETRONIX, Семинарски рад, Београд
- 8) Ђачић А., Нумеричко моделирање и лабораторијска верификација вертикалне инфилтрације у песку, Мастер рад, Београд