Određivanje karakteristične krivulje retencije vode metodom negativnog stupca vode

Bago, Danica

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:128634

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIČNE KRIVULJE RETENCIJE VODE METODOM NEGATIVNOG STUPCA VODE

Diplomski rad

Danica Bago

R 133

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIČNE KRIVULJE RETENCIJE VODE METODOM NEGATIVNOG STUPCA VODE

Danica Bago

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Prisutnost vode u tlu predstavlja jedan od većih geotehničkih izazova. Bubrenje i stezanje tla izaziva dodatna opterećenja i deformacije, a samim time i poteškoće u izgradnji geotehničkih objekata. Kako bi geotehničko projektiranje bilo što sigurnije, potrebno je poznavati svojstva tla i parametre tečenja vode. Porozni materijali imaju sposobnost vezivanja i zadržavanja vode, a to se svojstvo zove usis (negativni tlak u pornoj vodi). U ovom radu objašnjen je pojam usisa. Cilj istraživanja bio je uspostaviti opremu za mjerenje karakteristične krivulje retencije vode metodom negativnog stupca vode. Zatim mjerenjima dobiti realnu sliku o vezi promjene volumena vode u uzorku i vrijednosti usisa kod nekoherentnih uzoraka tla. Rezultati su pokazali da je ovom metodom moguće dobiti realnu sliku o ponašanju iako je konstruirana aparatura pokazala i neke slabosti, posebno kada je riječ o fazi vlaženja.

Ključne riječi: vlažnost, bubrenje, stezanje, usis, laboratorijska ispitivanja

Diplomski rad sadrži: 43 stranica, 5 tablica, 40 slika i 17 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Voditelj: Dr. Sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Pomagala pri izradi: Dr. Sc. Helena Vučenović, asistentica

Ocjenjivači: Dr. Sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. Sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF
Dr. Sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Datum obrane: 23. veljače 2017.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DETERMINATION OF THE CHARACTERISTIC WATER RETENTION CURVE BY NEGATIVE WATER COLUMN METHOD

Danica Bago

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Presence of water in the soil is one of the largest geotechnical challenges. Swelling and shrinkage of the soil causes an additional load and deformation, and thus the difficulty in building geotechnical objects. How would geotechnical design be as safe as possible, it is necessary to know the properties of the soil and the parameters of the flow of water. Porous materials have the ability of absorption and water retention, and this property is called suction (negative pressure in the pore water). This thesis explains the concept of suction. The aim of this study was to establish the equipment for measuring the characteristic water retention curve by the negative water column method. Then measurements to get a realistic picture of the water content changes in the sample and the value of suction with coarse grained soils soil samples. The results showed that this method can get a realistic picture of the behavior even though it is designed apparatus shown some weaknesses, especially when it comes to the wetting phase.

Keywords: water content, swelling, shrinkage, suction, laboratory testings

Thesis contains: 43 pages, 5tables, 40 figures, 17 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisor: Ph. D. Dubravko Domitrović, Assistant Professor
Technical support and assistance: Ph. D. Helena Vučenović, Assistant
Reviewers: Ph. D. Dubravko Domitrović, Assistant Professor
Ph. D. Biljana Kovačević Zelić, Full Professor
Ph. D. Vinko Škrlec, Assistant Professor

Defending date: 23th February 2017.

Zahvale

Veliku zahvalnost, dugujem svom mentoru dr. sc. Dubravku Domitroviću koji mi je omogućio svu potrebnu opremu i pomagao svojim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada, i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje upite.

Zahvaljujem svim profesorima i asistentima sa Zavoda za rudarstvo i geotehniku na ugodnom boravku i stečenim znanjima.

Također se zahvaljujem svim svojim prijateljima i prijateljicama, koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijeli ovaj tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno.

Posebno hvala dečku Dadi na velikoj podršci, strpljenu i na tome što si uvijek tu!

I najveće hvala majci Neveni, ocu Petru te bratu Mladenu koji su uvijek bili tu, u svim sretnim i tužnim trenutcima, konstantno me bodrili i motivirali, bili vječita inspiracija i pružali bezuvjetnu ljubav tijekom mog školovanja.

Rad posvećujem mojoj majci Neveni, koja me otpratila na studij, ali nije dočekala da ga završim....

SADRŽAJ

POPIS SLIKA II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA V
1. UVOD 1
2. USIS 3
2.1. Komponente usisa 3
3. KARAKTERISTIČNA HIDRAULIČKA KRIVULJA TLA 7
3.1. Krivulja retencije vode 7
3.1.1. Histereza 9
3.1.2. Eksperimentalno određivanje krivulje retencije 10
3.2. Karakteristična funkcija promjene volumena 10
4. METODE MJERENJA USISA 13
4.1. Metoda negativnog stupca vode 13
4.2. Metoda translacije osi 19
4.3. Oprema 20
5. MJERENJA 22
5.1. Oprema 22
5.2. Način mjerenja 23
5.3. Uzorak I 24
5.3.1. Prvo mjerenje 25
5.3.2. Drugo mjerenje 30
5.4. Uzorak II 33
5.5. Rezultati mjerenja 37
6. ZAKLJUČAK 42
7. LITERATURA 43

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz kapilarnih sila vode i zraka između čestica tla (Suzuki, 2000). 4
Slika 2-2. Shematski prikaz kapilarnih sila (Szavits-Nossan, 2012). 5
Slika 2-3. Shematski prikaz sušenja tla (Lu i Likos, 2004). 6
Slika 3-1. Retencija vode (Kavur, 2009). 8
Slika 3-2. Histereza krivulje retencije vode (Kavur, 2009) 9
Slika 3-3. Faze stezanja volumena tijekom sušenja (Kavur, 2009) 11
Slika 4-1. Buchner-Hainesov uređaj (Tarantino i dr., 2008). 14
Slika 4-2. Prikaz rasporeda aparature koji koriste Sharma i Mohamed (Tarantino i dr., 2008). 15
Slika 4-3. Prikaz klasične aparature negativnog stupaca vode (Tarantino i dr., 2008). 16
Slika 4-4. Hainesov uređaj (Tarantino i dr., 2008). 17
Slika 4-5. Konfiguracija uređaja negativnog stupca (Tarantino i dr., 2008). 18
Slika 4-6. Metoda višestrukih negativnih stupaca vode (Tarantino i dr., 2008). 19
Slika 4-7. Metoda translacije osi 20
Slika 4-8. Dizufija zraka u disk (Tarantino i dr., 2008) 21
Slika 5-1. Prikaz korištene aparature 23
Slika 5-2. Prikaz korištene aparature, detalj povezivanja 23
Slika 5-3. Prikaz najveće visinske razlike između ćelija. 24
Slika 5-4. Granulometrijska krivulja uzorka I 25
Slika 5-5. Dijagram odljeva (uzorak I, prvo mjerenje) 26
Slika 5-6. Dijagram upijanja (uzorak I, prvo mjerenje) 27
Slika 5-7. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak I, prvo mjerenje). 27
Slika 5-8. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, prvo mjerenje) 28
Slika 5-9. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis (uzorak I, prvo mjerenje) 29
Slika 5-10. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, prvo mjerenje) 29
Slika 5-11. Dijagram odljeva (uzorak I, drugo mjerenje) 31
Slika 5-12. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak I, drugo mjerenje) 31
Slika 5-13. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, drugo mjerenje) 32
Slika 5-14. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis (uzorak I, drugo mjerenje) 32
Slika 5-15. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, drugo mjerenje) 33
Slika 5-16. Granulometrijski sastav uzorka II 33
Slika 5-17. Dijagram odljeva (uzorak II) 34
Slika 5-18. Dijagram priljeva (uzorak II) 35
Slika 5-19. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak II) 36
Slika 5-20. Dijagram krivulja sušenja/vlaženja prikazan sa volumnim sadržajem vode, logaritamsko mjerilo (uzorak II) 36
Slika 5-21. Krivulje sušenja/vlaženja za stupanj saturacije (uzorak II) 36

Slika 5-22. Krivulje sušenja/vlaženja za stupanj saturacije, logaritamsko mjerilo (uzorak II) 37
Slika 5-23. Prikaz faza sušenja uzorka (Lu i Likos, 2004). 39
Slika 5-24. Teoretske krivulje sušenja za različite materijale (Lu i Likos, 2004). 39
Slika 5-25. Krivulje retencije vode izmjerena u pijescima (Krupni pijesak, 710-2000 μm; Srednje krupni pijesak, 180-500 μm; Sitni pijesak, 105-220 μm; Vrlo sitni pijesak, 45-125 μm) (modificirano prema Bruand i dr., 2005). 40
Slika 5-26. Karakteristična krivulja retencije vode izmjerena za glinene geosintetičke barijere (GBR-C) (Southen i Rowe, 2005) 41

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Prikaz dobivenih rezultata sušenja prvog mjerenja uzorka I..... 25
Tablica 5-2. Prikaz dobivenih rezultata vlaženja prvog mjerenja uzorka I..... 26
Tablica 5-3. Prikaz rezultata dobiveni sušenjem (uzorak I, drugo mjerenje)..... 30
Tablica 5-4. Prikaz dobivenih rezultata sušenja mjerenja uzorka II..... 34
Tablica 5-5.Prikaz dobivenih rezultata vlaženja mjerenja uzorka II..... 34

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica		Opis
h_c	m	-	visina dizanja vode
r	m	-	radijus pora
R_s	m	-	polumjer meniskusa
T_s	kPa	-	površinska napetost vode
Sr	/ ili %	-	stupanj saturacije
u_a	kPa	-	porni tlak zraka
u_w	kPa	-	porni tlak vode
α	°	-	kut moćivosti
γ_w	kN/m^3	-	obujamska težina vode
ψ_m	kPa	-	matrični usis
η	kPa	-	osmotski usis
ψ_t	kPa	-	ukupni usis

1. UVOD

U izgradnji građevinskih objekata na i u tlu suočavamo se s nizom problema kao što su: arhitektonski, ekološki, konstrukcijski, ekonomskih, vremenskih te posebno geotehnički. Cilj ovoga rada je predočiti bitnu geotehničku problematiku prilikom izgradnje građevinskih objekata. Prisutnost vode u tlu predstavlja jedan od većih geotehničkih izazova. Za razumijevanje ponašanja nesaturiranog tla potrebno je poznavati i zakone drugih grana znanosti. Promjene vlažnosti tla uzrokuju dodatna opterećenja i deformacije, kod nekih vrsta tla i bubrenje. Navedeno može smanjiti stabilnost građevina. Za racionalno projektiranje potrebno je dobro razumjeti mehanizme koji dovode do promjene volumena, te imati mogućnost prognoze ponašanja bubrivog tla tijekom izvedbe. Promjenom sadržaja vlage bubrive stijene mijenjaju svoj volumen.

Povećanjem vlažnosti bubre, a gubitkom vlažnosti smanjuju volumen (stežu se). Problemi promjene volumena usko su povezani s klimatskim promjenama, te je problem najizraženiji u krajevima s aridnom i poluaridnom klimom. Zbog aridne klime evaporacija može biti intenzivna i dugotrajna što dovodi do gubitka vode te povećanju negativnih pornih tlakova u desaturiranoj zoni tla. U vlažnoj sezoni dolazi do infiltracije vode u desaturiranu zonu. Prethodno narasli negativni porni tlakovi sada opadaju, naglo se mijenjaju efektivna naprezanja u tlu pa može doći do nestabilnosti.

Razvojem geotehnike postiže se bolje kontroliranje vode u tlu, a novim načinima geotehničkih istraživanjima i opažanjima mogućnost predviđanja problema koje voda može prouzročiti. Sigurno geotehničko projektiranje zahtjeva poznavanje svojstava tla i parametre tečenja vode.

Porozni materijali imaju sposobnost vezivanja i zadržavanja vode. Ovo svojstvo se naziva usis ili sukcija (eng. suction), a predstavlja negativni tlak u pornoj vodi. Naprezanje koje se javlja kao posljedica djelovanja usisa predstavlja izotropni tlak. Promjene naprezanja mogu dovesti do promjene volumena kod nekih stijena. Na granici između čestica tla i vode djeluju međumolekularne sile, uzrokujući usisavanje vode i njeno zadržavanje u pornom prostoru. Osim međumolekularnih sila na vodu djeluju i gravitacijske sile, koje su slabije od međumolekularnih sila.

Jedna od najvažnijih komponenata za razumijevanje usisa je relativna vlažnost. Ona opisuje stanje termodinamičke ravnoteže između zraka i vode, a definira se kao omjer apsolutne vlažnosti (koja je u ravnoteži sa svim otopinama) i apsolutne vlažnosti (koja je u ravnoteži sa slobodnom vodom) pri konstantnoj temperaturi. Ukupan usis je nula ako je relativna vlažnost nula.

Za definiranje višefaznog, deformabilnog medija kakav je primjerice bubriva stijena potrebno je poznavati sljedeće karakteristike hidrauličke krivulje:

- krivulju retencije vode
- krivulju hidrauličke provodljivosti
- krivulju stezanja odnosno bubrenja.

Detaljniji opis krivulja bit će objašnjen u daljnjem tekstu.

U ovome radu prikazana su laboratorijska ispitivanja vlaženja/sušenja uzoraka metodom negativnog stupca vode. Prvi cilj je bio uspostaviti opremu za mjerenje. Zatim su provedena mjerenja na nekoherentnim uzorcima tla pri čemu su uzorci prvo potpuno saturirani prije ugradnje. Kao rezultat dobivene su karakteristične krivulje retencije vode. U radu su detaljno prikazana mjerenja i rezultati dobiveni na dvama uzorcima različitih tala. Za uzorak I korišten je drobljeni dolomit, dok je za uzorak II korišten drobljeni vapnenac. Rezultati ukazuju da je ovom metodom moguće dobiti realnu sliku o ponašanju nekoherentnog tla u dodiru s vodom iako treba napomenuti da je konstruirana aparatura pokazala i neke slabosti, posebno kada je riječ o fazi vlaženja.

2. USIS

Usis je svojstvo vezivanja i zadržavanje vode u porama, te predstavlja negativni tlak u pornoj vodi. Promjenom vlažnosti tla dolazi do promjene usisa. Naprezanje koje se javlja kao posljedica djelovanja usisa predstavlja izotropni tlak. Promjene naprezanja često rezultiraju promjenom volumena stijene. Zbog toga je moguće prognozirati promjenu volumena na temelju promjena usisa pod specifičnim uvjetima okoliša. Međutim ove prognoze nisu našle širu primjenu zbog poteškoća kod in-situ mjerenju usisa i eksperimentalnom određivanju odgovarajućih svojstava nesaturiranog medija.

2.1. Komponente usisa

Postoje dvije komponente usisa: osmotski i matrični (kapilarni) usis. Termodinamički potencijal vode iz tla u odnosu na referentni potencijal slobodne vode predstavlja stanje energije slobodne vode u tlu i naziva se ukupni usis ψ_t. Slobodna voda izložena je samo sili gravitacije, u doticaju je samo sa zrakom te ne sadrži nikakve otopljene stvari. Potencijal slobodne vode veći je nego potencijal vode u tlu. Za smanjenje potencijala porne vode prvenstveno su odgovorni matrični (hidratacijske sile i kapilarna sila) i osmotski (zbog otopljenih soli) mehanizmi (Lu i Likos, 2004).

Matematički izraz (2-1) za ukupan usis je

$$\psi_{t=(u_a-u_w)+\eta} \quad kPa \tag{2-1}$$

Gdje je:

ψ_t = ukupni usis (kPa)

u_a = porni tlak zraka (kPa)

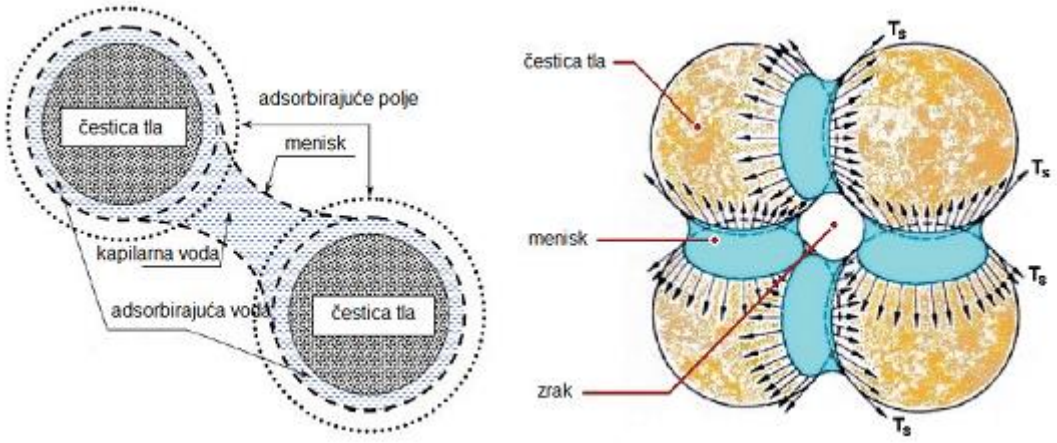
u_w = porni tlak vode (kPa)

η = osmotski usis (kPa).

Osmotski usis nastaje zbog otopljenih soli u vodi i sastavni je dio ukupnog usisa. Što je veća koncentracija soli manja je relativna vlažnost i obrnuto. Osmotski usis je funkcija količine otopljenih soli u porama ispunjenih tekućinom i ne predstavlja značajniji udio u ukupnom usisu.

Matrični (kapilarni) usis je najvažniji parametar za opisivanje naprezanja u nesaturiranom tlu. Definira se kao razlika između pornog tlaka zraka u_a i pornog tlaka vode u_w. U nesaturiranom tlu porni tlak zraka je veći od pornog tlaka vode, a kada je porni tlak zraka jednak nuli vrijednost pornog tlaka vode je negativna. Negativna vrijednost pornog tlaka vode naziva se usisom.

Promjene koje se događaju u okolini najviše utječu na promjene u matričnom usisu, a znatno manje na osmotski usis. Iz stoga slijedi da su promjene koje se događaju unutar usisa izravno povezane s promjenama matričnog usisa (Lu i Likos, 2004).

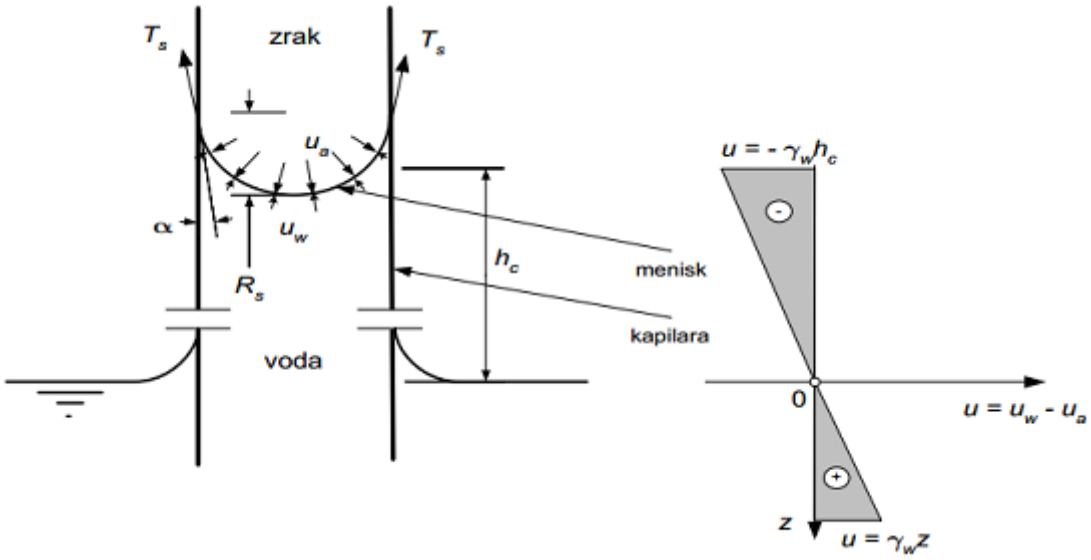


Slika 2-1. Prikaz kapilarnih sila vode i zraka između čestica tla (Suzuki, 2000).

Molekule vode su u električnom smislu dipolnog karaktera pa između čestica tla, koje su većinom negativno nabijene i molekule vode djeluje privlačna sila. Smatra se da je tanki sloj molekula vode uz čestice gline za njih relativno čvrsto vezan i da gotovo ima svojstvo krutog tijela. (Bošković, 2013)

Kapilarne sile koje djeluju između vode i zraka zadržavaju vodu u blizini čestica tla, u uskim kapilarama. U sučelju vode i zraka javlja se vlačna sila. Obzirom na težnju čestica tla za vezivanjem ili upijanjem vode, odnosno njihov hidrofilan karakter ta se vlačna sila prenosi na čestice te time na čitav skelet tla. Rahla zrna lijepe se jedno za drugo zbog površinske napetosti koji je stvorio film vode. Time se povećava posmična čvrstoća. Vlačna sila u membrani stvara zakrivljenu površinu u slučaju kada je pritisak zraka veći od pritiska vode, ta zakrivljena površina naziva se menisk. Menisk se ponaša kao elastična membrana pod vlačnim naprezanjem. Dok se potpuno saturirano tlo suši isparavanjem

vode, ukupna naprezanja se ne mijenjaju, ali vlačne sile se u membrani sve više povećavaju (Lu i Likos, 2004).



Slika 2-2. Shematski prikaz kapilarnih sila (Szavits-Nossan, 2012).

$$\psi_m = u_a - u_w \tag{2-2}$$

ψ_m = matrični ili kapilarni usis (kPa)

$$2\pi \times \cos\alpha = r^2\pi \times h_c \times \gamma_w \tag{2-3}$$

$$\cos\alpha = \frac{r}{R_s} \tag{2-4}$$

$$u_{a-}u_w = \frac{2T_S}{R_s} \tag{2-5}$$

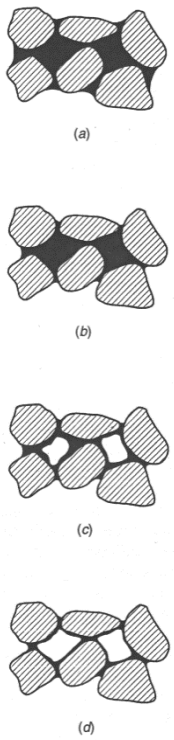
T_s = površinska napetost vode (kPa)

R_s = polumjer meniska (m)

r = radijus pora (m)

$$u_a - u_w = \frac{2T_S \times \cos\alpha}{r} \tag{2-6}$$

Slika 2-3. prikazuje sušenje tla. U početku (a) uzorak je potpuno saturiran, pore su ispunjene vodom. Djelovanjem usisa počinje zrak počinje ulaziti u pore (b). Povećanjem vrijednosti usisa koji djeluje na uzorak voda izlazi iz pora (c). Daljnjim sušenjem, pore se ispunjavaju zrakom a oko čestica ostaje tanak film vode (d) (Lu i Likos, 2004).



Slika 2-3. Shematski prikaz sušenja tla (Lu i Likos, 2004).

Možemo zaključiti da usis ovisi o veličini pora materijala, drugim riječima što je veličina pora manja usis je veći.

3. KARAKTERISTIČNA HIDRAULIČKA KRIVULJA TLA

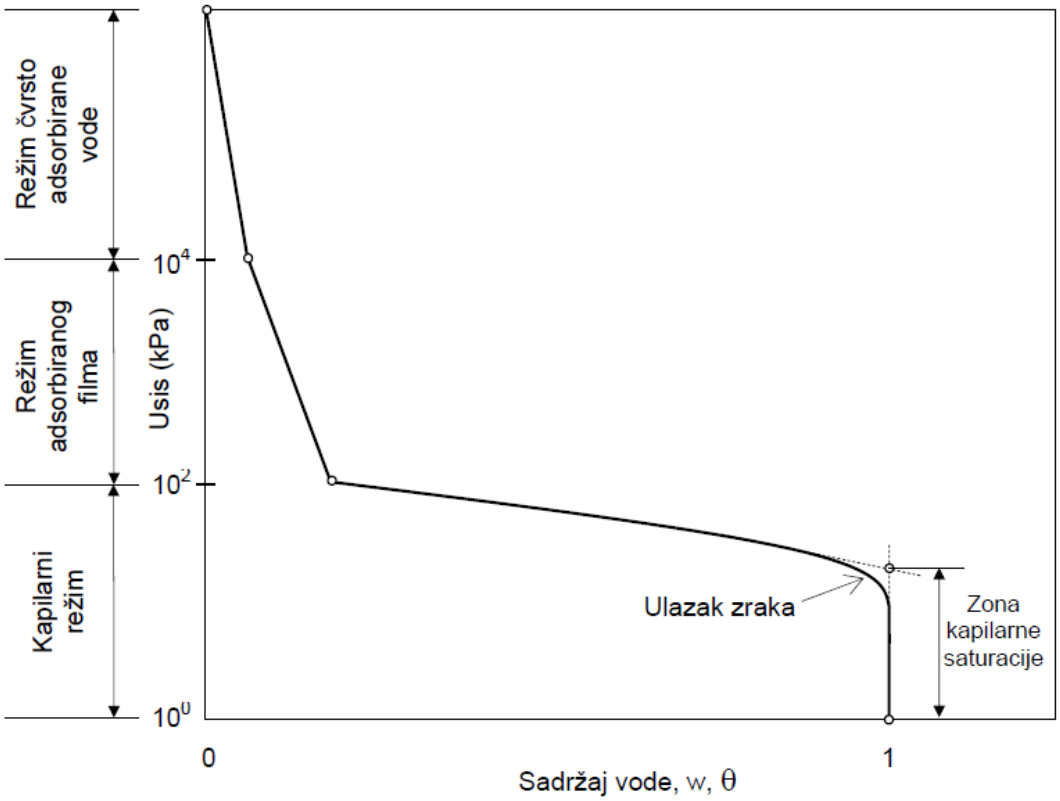
Poznavanje karakteristične krivulje retencije vode koja predstavlja odnos između usisa i vlažnosti stijene/tla, te funkcije hidrauličke provodljivosti u nesaturiranim uvjetima je preduvjet za rješavanje problema tečenja vode u nesaturiranom mediju. Kako se pri tom često radi o mediju koji mijenja volumen u ovisnosti o vlaženju odnosno usisu neophodno je eksperimentalno odrediti i treću karakterističnu funkciju koja se naziva krivuljom stezanja u uvjetima sušenja odnosno krivuljom bubrenja u uvjetima vlaženja i koja predstavlja vezu između vlažnosti i promjene volumena (Kavur, 2009).

Prilikom padalina voda prodire u tlo postupno ga saturirajući. Vodnim licem nazivamo dubinu na kojoj je tlo potpuno saturirano i porni tlak je jednak nuli. Proces isparavanja je obrnut proces od saturiranja i u prirodni se konstantno izmjenjuju.

3.1. Krivulja retencije vode

Jedna od važnih krivulja tla je krivulja retencije vode WRC (eng. Water retention curve). Njome je općenito definiran odnos između usisa i sadržaja porne vode, odnosno termodinamički potencijal porne vode u odnosu na potencijal slobodne vode u funkciji vlažnosti (Lu i Likos, 2004). Karakteristična krivulja odnosa tla i vode ili retencijska krivulja SWCC (engl. Soil –water characteristic curve) od temeljne je važnosti za hidrološka svojstva nesaturiranog tla. Korisna je za analizu kretanja vode kroz nesaturirano tlo. Krivulja predstavlja grafički prikaz odnosa između matričnog usisa ψ_m i vlažnosti tla *w* odnosno stupnja saturacije *Sr*. Osim toga SWCC se koriste u karakterizaciji odnosa posmične čvrstoće i opterećenja nesaturiranog tla. Ima sigmoidalan oblik (slova S). Oblik je uvjetovan svojstvima medija kao što su: sadržaj gline, veličina pora, veličina zrna, gustoća medija, sadržaj organskih tvari, mineraološki sastav materijala itd.

McQueen i Miller (1974) napravili su model WRC krivulje za demonstraciju različitih režima retencije vode u višefaznom sustavu. Model se sastoji od 4 linearna segmenta koji aproksimiraju krivulju u polulogaritamskom mjerilu prikazanog na slici 3-1.



Slika 3-1. Retencija vode (Kavur, 2009).

Prvi segment naziva se zonom kapilarne saturacije. U uvjetima evaporacije, počevši od potpune saturacije dolazi do porasta negativnog pornog tlaka do vrijednosti usisa. Ulaskom zraka započinje drugi linearni segment koji se naziva kapilarni režim krivulje. Zadržavanje vode posljedica je zajedničkog djelovanja negativnog tlaka porne vode na vlažne dijelove čestica materijala i površinske napetosti kontakta vode sa zrakom. Nagib pravca ovisi o distribuciji veličine pora. Pravac će biti položeniji ako su pore jednake veličine, a ako su široko distribuirane biti će strmiji. Treći segment naziva se režim adsorbiranog filma. U ovom dijelu voda je vezana van der Waalsovim silama, mehanizmima polarizacije u električnom polju i hidratacijom izmjenjivih kationa (gline). Kretanje vode oko čestica obavlja se u vidi tankog filma. Ovaj segment prema konceptu završava se kod granične vrijednosti usisa od 10^4 kPa. Minerali gline pokazuju najveći kapacitet vezanja vode u ovom režimu. Kontinuitet tekuće faze ovdje prestaje. Zadnji linearni segment predstavlja režim čvrsto adsorbirane vode koja je praktički imobilna. Preostala voda je povezana vodikovim vezama s izloženima atomima kisika na površini čestica minerala. Ovaj dio krivulje je strmiji što znači da kod relativno male promjene vlažnosti vrijednosti usisa jako poraste. Navedeni model opisan je pod pretpostavkom da se vlažnost materijala mijenja

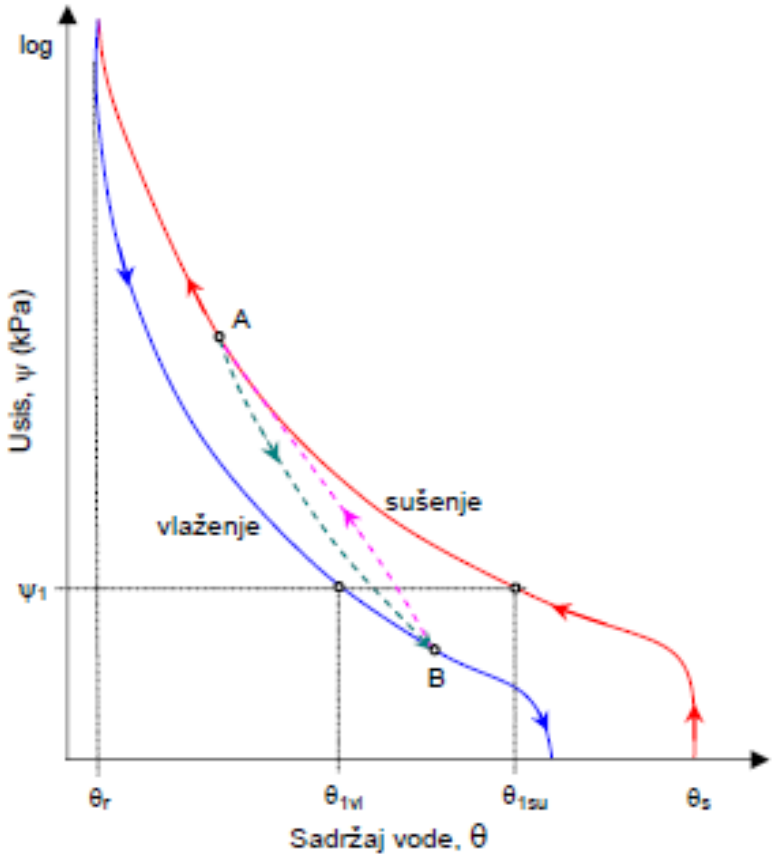
tokom evaporacije. Međutim ako se suhi materijal izlaže procesu vlaženja, odnos usisa i vlažnosti bit će nešto drugačiji zbog značajne histereze u ponašanju materijala (Kavur, 2009).

3.1.1. Histereza

Općenito u procesu sušenja materijal zadržava više vode u usporedbi s procesom vlaženje pri jednakoj vrijednosti usisa (Slika 3-2). Zbog postojanje histereze, ne postoji jedinstvena krivulja, tj. jedinstven odnos između usisa i vlažnosti. Možemo reći da postoje krajnje ili granične krivulje za slučajeve:

- potpunog evaporacije materijala počevši od potpuno saturiranog do suhog stanja
- potpunog vlaženja materijala počevši od suhog stanja do maksimalne saturacije.

U prirodnim uvjetima krivulje stvarnog odnosa između usisa i vlažnosti nalaze se negdje između opisanih krajnjih krivulja.



Slika 3-2. Histereza krivulje retencije vode (Kavur, 2009)

3.1.2. Eksperimentalno određivanje krivulje retencije

Glede eksperimentalnog određivanja usisa odnosno krivulje retencije koriste se različite tehnike koje se međusobno znatno razlikuju u pogledu mjernog opsega koji pokrivaju, kompleksnosti i pouzdanosti samog mjerenja, vremena koje je potrebno utrošiti na mjerenje, troškova i dr.

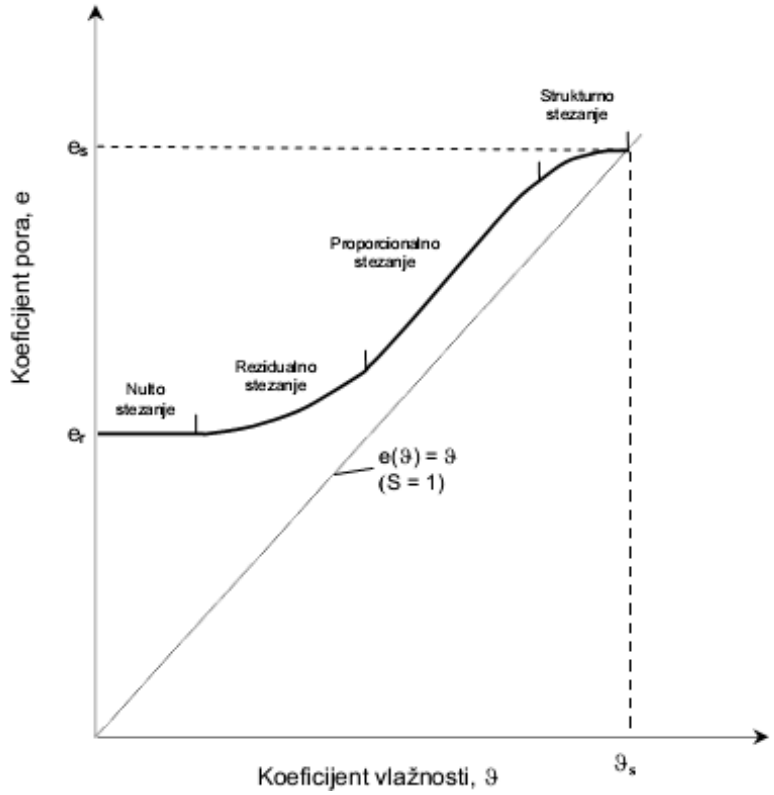
Za mjerenje matrične komponente usisa koriste se tenziometri (direktno mjerenje negativnog pornog tlaka), tehnika translacijom osi (razdvajanje zraka i vode pomoću polupropusne membrane, te podizanje vrijednosti tlaka zraka), mjerni pretvornici na bazi električne ili termalne provodljivosti, tehnika mjerenja filter papirom koji se nalazi u kontaktu s uzorkom. Za mjerenje ukupnog usisa koriste se tehnike kontrole vlažnosti uzorka (npr. korištenje slanih otopina poznate koncentracije), tehnike mjerenja vlažnosti (termopar-psihrometri, otpornički ili kapacitivni mjerni pretvornici na bazi polimera, higrometar s hlađenim zrcalom) i tehnika mjerenja filter papirom koji nije u direktnom kontaktu s uzorkom (uzorak i filter papir smješteni su razdvojeno u hermetički zatvorenoj posudi) (Kavur, 2009).

U slučaju bubrive stijene može se očekivati da će pri istom sadržaju vode porozitet u vlaženju biti veći od onog u sušenju. To znači da će saturacija u vlaženju biti manja od one u sušenju pri jednakom sadržaju vode (Kavur, 2009)..

3.2. Karakteristična funkcija promjene volumena

Krivuljom stezanja prikazuje se odnos između promjene volumena (koeficijenta pora) i sadržaja vode, koje se dešava prilikom sušenja bubrive stijene. Na slici 3-3. prikazane su faze tijekom sušenja bubrivog tla. Navedene faze u smjeru smanjenja vlažnosti su:

- strukturno stezanje
- proporcionalno stezanje
- rezidualno stezanje
- nulto stezanje.



Slika 3-3. Faze stezanja volumena tijekom sušenja (Kavur, 2009)

U fazi nultog stezanja, koje nastupa nakon što se smanjenjem volumena dosegne granicu stezanja materijala, nema daljnje promjene volumena s gubitkom vlažnosti. U fazama strukturnog i rezidualnog stezanja promjene volumena su manje u odnosu na volumen izgubljene vode. U fazi proporcionalnog stezanja, promjena volumena odgovara volumenu evaporirane vode, a volumen eventualno prisutne plinovite faze ostaje stalan, sve do točke u kojoj dolazi do prodora zraka u materijal. Općenito, faze proporcionalnog i rezidualnog stezanja volumena dominiraju tijekom procesa sušenja jer se njima ostvaruje najveće promjene volumena i vlažnosti. (Kavur, 2009)

Međutim ne pokazuje svaki bubrivo-stišljivi materijal sve faze stezanja volumena. Pretpostavlja se da će povećanjem normalnog naprezanja krivulja stezanja biti paralelno pomaknuta niže na dijagramu koeficijenta pora-vlažnosti (Kavur, 2009).

Dok je krivulju stezanja moguće relativno lako odrediti pokusom sušenja deformabilno-ekspanzivog materijala, određivanje krivulje bubrenja tijekom vlaženja je vrlo zahtjevan zadatak. Zbog nepoznavanja mehanizma i tijeka ovog kompleksnog procesa najčešće se pretpostavlja da je krivulja bubrenja identična krivulji stezanja volumena. Ako bi krivulja

bubrenja imala oblik krivulje stezanja onda bi pred kraj procesa vlaženja promjene volumena bubrivog materijala, obzirom na volumen infiltrirane vode, trebale biti intenzivnije od onih na početku procesa (Kavur, 2009).

Međutim, postojanje histereze u krivulji retencije vode ukazuje da bi i ovdje trebalo očekivati histerezu između krivulje stezanja i krivulje bubrenja. Naime, zbog histereze u krivulji retencije, vrijednost usisa je tijekom vlaženja manja od vrijednosti usisa u sušenju, pri jednakom sadržaju vode. To znači da bi tijekom vlaženja, pri istom sadržaju vode, vrijednost koeficijenta pora trebala biti veća od one u sušenju (Kavur, 2009).

4. METODE MJERENJA USISA

Za dobivanje podataka za interpretaciju ponašanja nesaturiranih tala koriste se metode negativnog stupca vode i translacija osi. Metoda negativnog stupca vode (visećeg stupca) koristi se kao kontrolna metoda usisa pri niskim rasponima usisa (0-30 kPa). Za veće raspone usisa (0-500 kPa i više) koristi se metoda translacije osi (Tarantino i dr., 2008).

Unatoč napretku proširenja mehanike nesaturiranih tala još je potrebno puno rada kako bi se razumjelo korištenje metoda negativnog stupca vode te translacije osi.

Kako je Terzaghi definirao princip efektivnih naprezanja za saturirana tla, znanstvenici su se mogli okrenuti problemu nesaturiranih tala. Tako je Bishop modificirao Terzagijevu jednadžbu efektivnog naprezanja uvođenjem parametara funkcije saturacije tla kako bi interpretirao ponašanje nesaturiranih tala. Tijekom prošla tri stoljeća predloženi su okviri za interpretaciju inženjerskog ponašanja nesaturiranih tala u uvjetima dva ili više neovisnih stanja naprezanja kroz veliki raspon usisa. Razumijevanje opsežnog hidrauličkog i mehaničkog ponašanja nesaturiranih tala uglavnom je temeljeno na eksperimentalnim studijima u kojima je metoda translacije osi korištena kao alat za njihovu interpretaciju. Razvojem mehanike nesaturiranih tala pojavile su se različite nove metode pomoću kojih je bilo moguće predvidjeti ili procijeniti inženjersko ponašanje nesaturiranih tala.

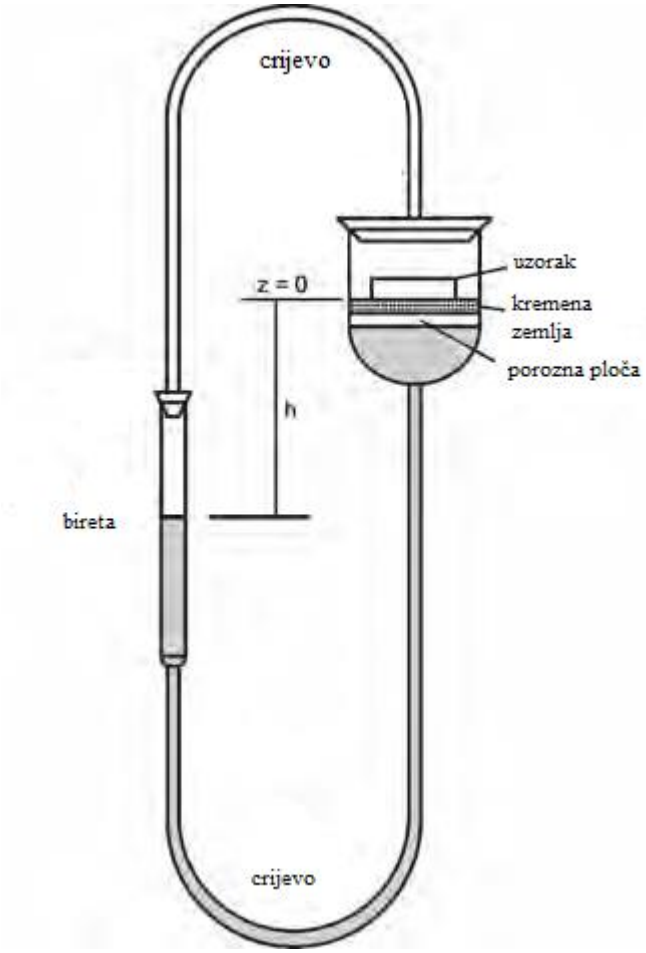
Osnovni alat za predviđanje ili procjenu inženjerskog ponašanja nesaturiranih tala je karakteristična krivulja tlo-voda (SWCC) koja predstavlja vezu između vlažnosti i usisa, a naziva se još i retencijska krivulja tlo-voda (SWRC) ili krivulja tlo-vlažnost (SMC). Njenim poznavanjem moguće je procijeniti tok vode u tlu, posmičnu čvrstoću tla i promjenu volumena nesaturiranih tala.

4.1. Metoda negativnog stupca vode

Buckingham je još na početku 20. stoljeća mjerio odnos (povezanost) između kapilarnog potencijala i sadržaja vode koristeći se metodom negativnog stupca vode te isti odnos izrazio kao funkciju. Mjerenja je provodio na različitim tlima koristeći 122 cm visok stupac tla smješten u metalnom cilindru. Donji dio cilindra bio je vezan s rezervoarom vode koji je učvršćen na 50 mm visine od donjeg kraja cilindra.

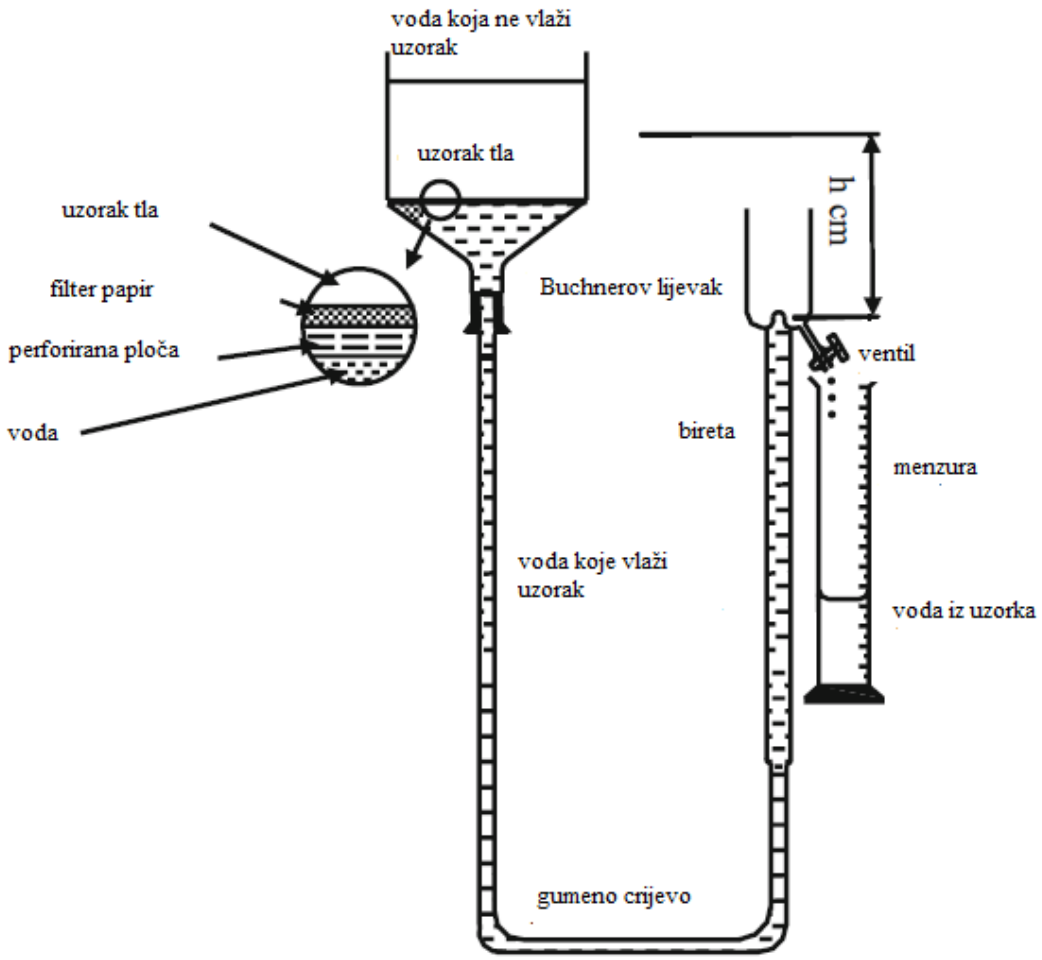
Slika 4-1. prikazuje uređaj koji su osmislili Bucher i Haines tridesetih godina 20. stoljeća. Haines je uveo koncept metode negativnog stupca vode koji i danas služi za mjerenje

SWRC za krupnoznata tla. Uređaj sa slike je modificiran uređaj Hainsa. Tlak u vodi ispod porozne ploče može biti smanjen na subatmosfersku razinu povećavajući razliku između visine uzorka i visine rezervoara.



Slika 4-1. Buchner-Hainesov uređaj (Tarantino i dr., 2008).

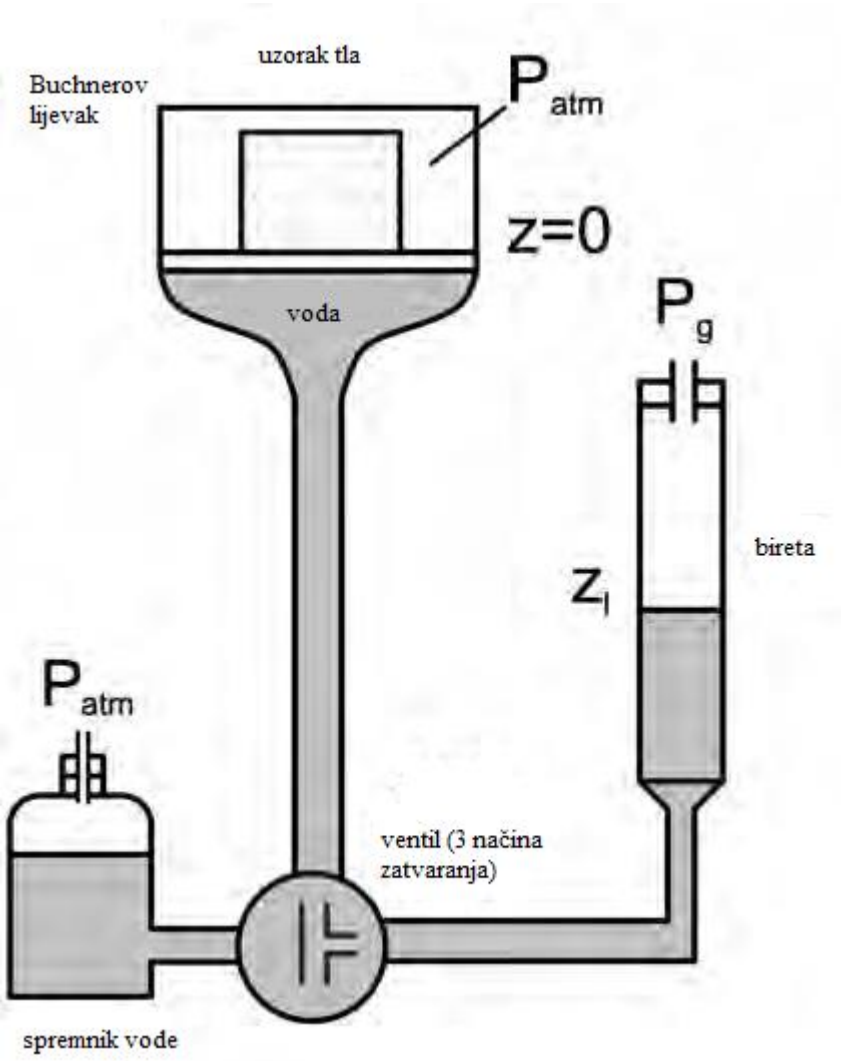
Sharma i Mohamed koriste Buchnerov lijevak za determinaciju SWRC u nesaturiranim/saturiranim tlima. Na slici 4-2. prikazuje uređaj za mjerenje. Kod uređaja s Buchnerovim lijevkom uzroci su pripremljeni kao tekuće tlo koje se ulijeva sa stalne visine u vodom ispunjen lijevak držeći tako razinu vode uvijek iznad razine tla. Tako saturirane uzorke izlažu povećanju kapilarne napetosti (tj. matrični usis) smanjivanjem visine birete kako bi se dobila krivulja sušenja. Metoda se može proširiti i za dobivanje krivulje vlaženja.



Slika 4-2. Prikaz rasporeda aparature koji koriste Sharma i Mohamed (Tarantino i dr., 2008).

Slikom 4-3. se možemo poslužiti kako bi ilustrirali Hainselov pristup u kojem matrični usis može biti reguliran mijenjajući razinu z_1. Kod Hainselovog uređaja metodom negativnog stupca vode usis je kontroliran vakuumom te kontrolom visine.

Maksimalni usis koji može biti postignut koristeći se metodom negativnog stupca ograničen je na vrijednosti 20-30 kPa zbog ograničenja postizanja većeg tlaka pri podešavanju negativnog stupca vode. Razina z_1 u metodi negativnog stupca može biti podešavanja s rezolucijom od otprilike 0,01 kPa. Metoda negativnog stupca vode uglavnom se koristi za istraživanje značajki zadržavanja vode krupnozrnatih tala i krupnozrnatih tala s malim količinama sitnozrnatih tala odnosno tala kod kojih se može postići rezidualna vlažnost pri niskim vrijednostima usisnih naprezanja. Ovom metodom moguće je dobiti pouzdanu SWRC kao i točku ulaza zraka (eng. Air entry) u uzorak pri malim vrijednostima usisa. (Tarantino i dr., 2008)



Slika 4-3. Prikaz klasične aparature negativnog stupaca vode (Tarantino i dr., 2008).

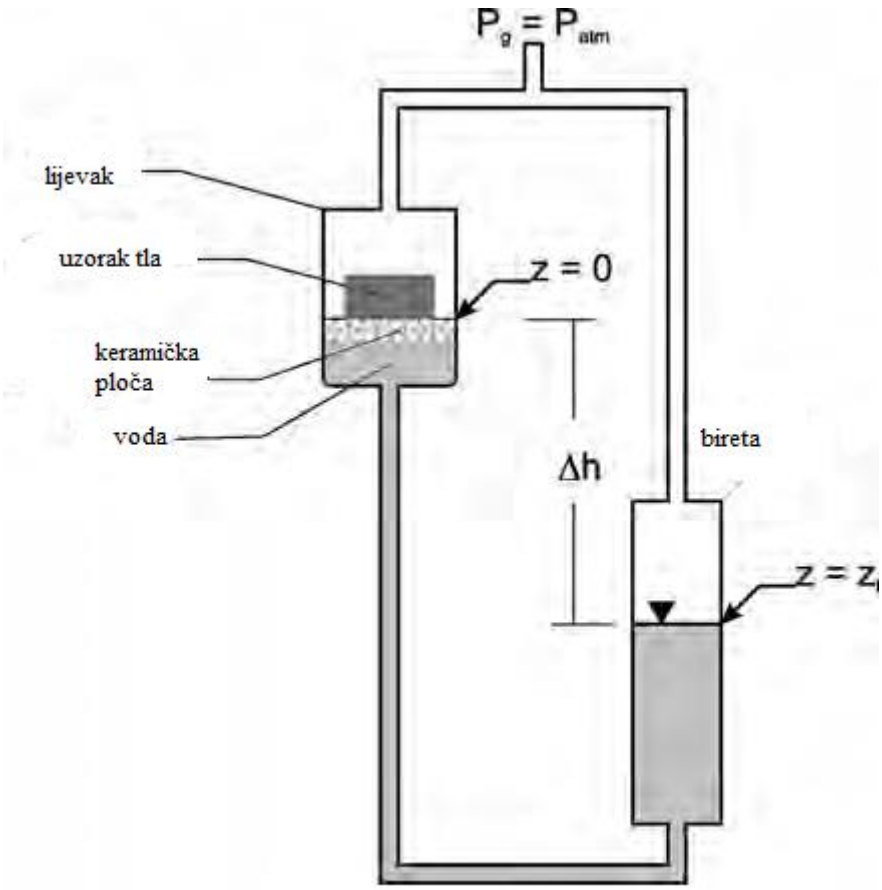
Ukoliko postoji potreba za većim vrijednostima usisa moguće je negativne stupce vode serijski spojiti odnosno koristiti višestruke negativne stupce vode.

Veće vrijednosti usisa moguće je postići i upotrebom vakuuma. Metodom kontrole vakuumom tlak plina P_g održavan je na subatmosferskim vrijednostima. Nedostatak ove metode je u razlici tlakova zraka, tlak zraka iznad porozne ploče je atmosferski, dok je u bireti subatmosferski, te stoga zrak može prolaziti kroz sustav odvodnje prema bireti. Ovakav difuzni zrak može utjecati na mjerenje volumena vode koja ulazi ili izlazi iz uzorka. (Tarantino i dr., 2008)

Prema tome, originalna metoda negativnog stupca vode, gdje je tlak plina P_g iznad rezervoara za vodu (birete) atmosferski nema problema povezanih s difuzijom zraka kroz poroznu ploču i u drenažnom sustavu. Kod metode kontrole vakuumom, uzroci saturiranog

tla se ugrađuju na isti način. Vakuum se primjenjuje za smanjivanje tlaka vode u porama uzorka zadržavajući tlak plina u porama uzorka u atmosferskim uvjetima. Primjena negativnog tlaka vode uzrokuje tečenje vode iz uzorka. Uspostavom ravnoteže sadržaja vode pri primijenjenom negativnom tlaku vode sadržaj vode u tlu odgovarat će matričnom usisu.

Provjera da li je uspostavljena ravnoteža između sadržaja vode u uzorku i usisa može se postići na više načina. Jedna od metoda je upotreba Hainesovog uređaja (slika 4-4).

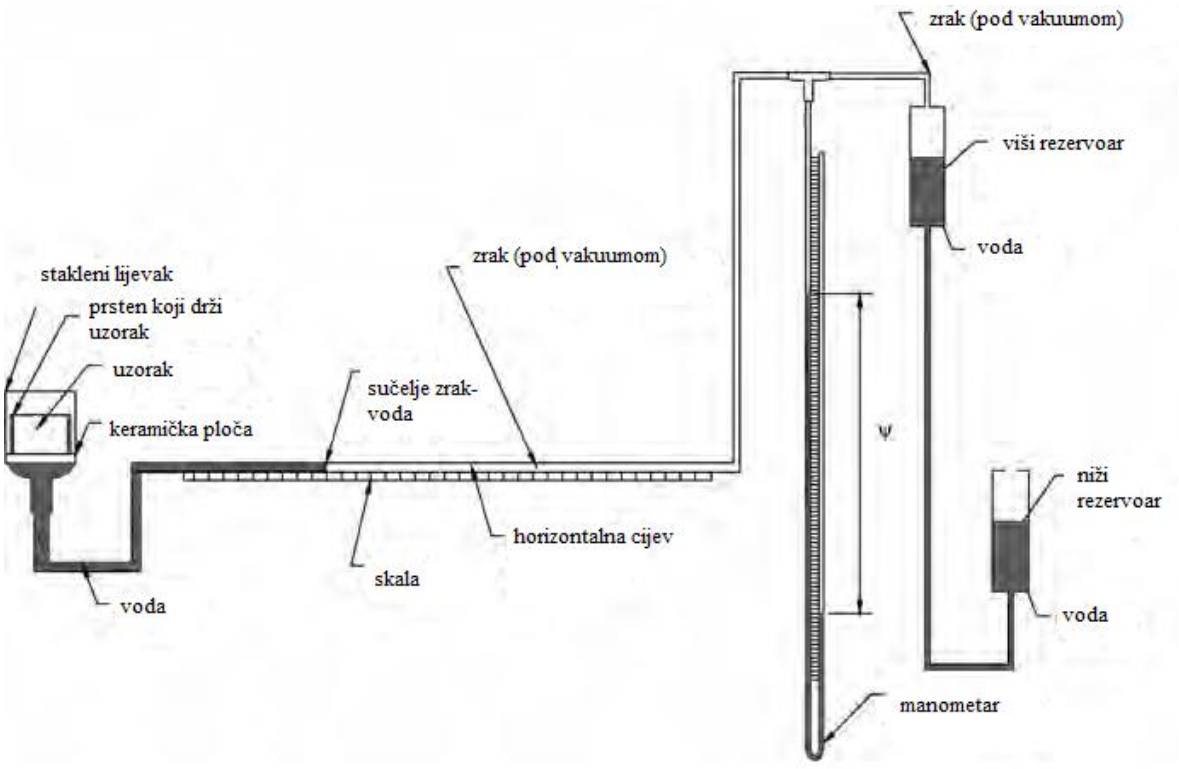


Slika 4-4. Hainesov uređaj (Tarantino i dr., 2008).

U ovom slučaju postizanje ravnotežnog stanja promatra se praćenjem razine vode. Kod ovog uređaja potrebno je konstantna podešavati položaja birete kako bi razlika h bila konstanta, što je glavni nedostatak ovog uređaja. Također, nedostatak može biti moguća pojava evaporacija vode bilo iz uzorka ili poroznog kamena ili i iz birete. Ako postoji sumnja da bi moglo doći do pojave evaporacije, moguće je postaviti nulti (dodatni) uređaj

bez uzorka tla mjerila za mjerenje evaporacije u sistemu. Dobivena vrijednost evaporacije koristila bi se za korekciju rezultata (Tarantino i dr., 2008).

Slikom 4-5 prikazana je konfiguracija uređaja negativnog stupca vode po ASTM standardu. Uređaj se sastoji od komore za uzorak, cijevi za mjerenje odljeva i opskrbe sistema usisom. Volumen vode koji teće u ili iz uzorka tokom ispitivanja mjeri se pomoću kapilarne (horizontalne) cijevi koja je povezana sa krajem odljeva u komori za uzorak. Drugi kraj kapilarne cijevi spojen je sa sistemom za kontrolu vakuuma koji se sastoji od dva rezervoara. Relativna visinska razlika ovih dvaju rezevoara prilagođena je održavanju subtmosferskog tlaka s vodom u kapilarnoj cijevi. Kapilarna cijev postavljana je vodoravno u istoj razini kao i dno uzorka tla, pa vrijednost usisa na donjoj strani uzorka odgovara relativnoj visinskoj razlici ovih dvaju rezervoara.Veličina primjenjenog usisa može se mjeriti i manometrom.

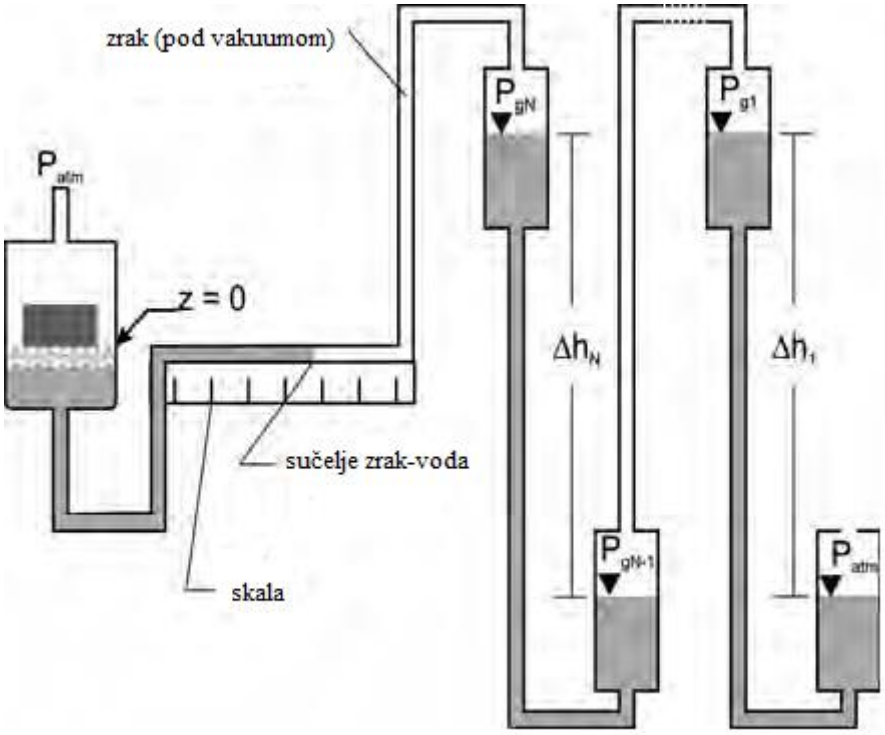


Slika 4-5. Konfiguracija uređaja negativnog stupca (Tarantino i dr., 2008).

Glavna prednost ove verzije uređaja negativnog stupca vode je u činjenici da je ravnotežno stanje uspostavljena kada voda prestaje teći u ili iz uzorka bez potreba nužnog kontinuiranog podešavanja relativne visinske razlike rezrvoara kako bi se održao konstantan usis. Obzirom da se u kapilarnoj cijevi nalazi zrak pod vakuumom moguća je

pojava difuzije zraka prema kapilarnoj cijevi što može utjecati na mjerenje promjene volumena vode u uzorku.

Na slici 4-6. prikazana je metoda višestrukih negativnih stupaca koja se može koristiti ukoliko postoji potreba za mjerenjem usisa iznad 20-30 kPa. Također, kako je prethodno navedeno, veće vrijednosti usisa mogu se postići primjenom sustava s vakuumom koji se sastoji od izvora vakuuma i subatmosferskog regulatora tlaka.

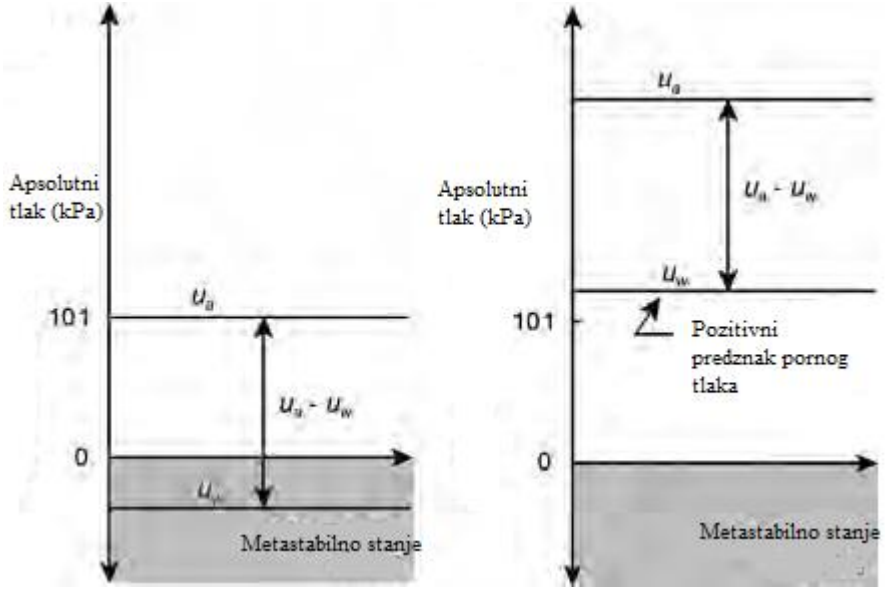


Slika 4-6. Metoda višestrukih negativnih stupaca vode (Tarantino i dr., 2008).

4.2. Metoda translacije osi

Kao što je već navedeno matrični usis u nezasićenom tlu definira se kao razlika između tlaka zraka u porama (u_a) i tlaka vode u porama (u_w). U nezasićenom tlu tlak zraka u porama je atmosferski odnosno jednak je nuli (u_a=0) dok je tlak vode u porama manji od atmosferskog odnosno negativan je. Metoda translacije osi se koristi za primjenu matričnog usisa na uzorak tlakova većih i od 100 kPa. Ovom metodom se premješta referentno stanje iz standardnih atmosferskih uvjeta u stanje gdje je tlak zraka u porama tla veći od atmosferskog (slika 4-7) (Liu i Likos, 2004).

Naime, porastom negativnog pornog tlaka raste mogućnost pojave kavitacije u vodi. Kavitacijom u vodi odnosno pojavom mjehurića zraka vodena faza prestaje biti kontinuirana što značajno utječe na točnost mjerenja promjene volumena vode u uzorku. Metodom translacije osi tlak vode u porama ostaje u mjerljivim granicama dok se veće vrijednosti usisnih naprezanja postižu povećanjem tlaka zraka u porama (u ovom slučaju on će biti veći od nule).



Slika 4-7. Metoda translacije osi

4.3. Oprema

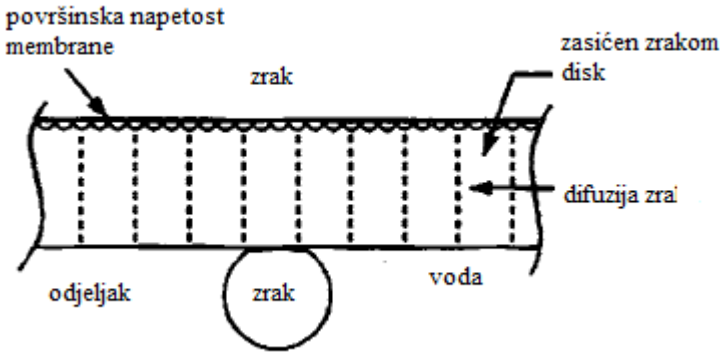
Prilikom mjerenja SWRC potrebno je razdvojiti faze zraka i vode. Navedeno se postiže primjenom High air entry diskova (HAE). Sitne pore HAE diska ponašaju se kao sučelje koje razdvaja faze zraka i vode. Ovo razdvajanje je moguće postizati do točke ulaska zraka koju ima HAE disk. Točka ulaska zraka odnosi se na maksimalni matrični usis koji se može primijeniti na disk prije nego slobodan zrak uđe u disk.

Maksimalna održiva razlika između tlaka zraka i vode je funkcija površinske napetosti i maksimalne efektivne veličine pora na keramičkom materijalu diska (Lu i Likos, 2004).

U slučaju metode translacije osi uzorak se stavlja u ćeliju na prethodno saturirani HAE disk. S gornje strane uzorka nanosi se tlak zraka koji je veći od atmosferskog dok se sa donje strane uzorka nanosi negativan porni tlak vode. Sa donje strane uzorka voda mora

biti u kontinuiranom stanju kako bi se točno mogla izmjeriti promjena volumena vode u uzorku nakon promjene usisa (razlika tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama). Postizanje ravnotežnog stanja za odgovarajući matrični usis ovisi o vrsti uzorka. Kod većine tala ravnotežno stanje moguće je postići u roku od 3 do 6 sati za komprimirane uzorke debljine 20 mm (Lu i Likos, 2004).

Kroz duži vremenski period provedbe metode translacije osi dio zraka proći će kroz disk. Mjehuriće zraka koji se stvore ispod zasićenog diska potrebno je ukloniti. Izmjerena vrijednost matričnog usisa nije pouzdana ukoliko se u obzir ne uzme zrak koji je procurio. Iz toga razloga je potrebno ugraditi sisteme ispiranja da se periodično ukloni razrijeđeni zrak koji se stvori unutar sistema. Difuzija zraka kroz HAE disk može se umanjiti povećanjem tlaka vode ispod njega, slika 4-8 .



Slika 4-8. Dizufija zraka u disk (Tarantino i dr., 2008).

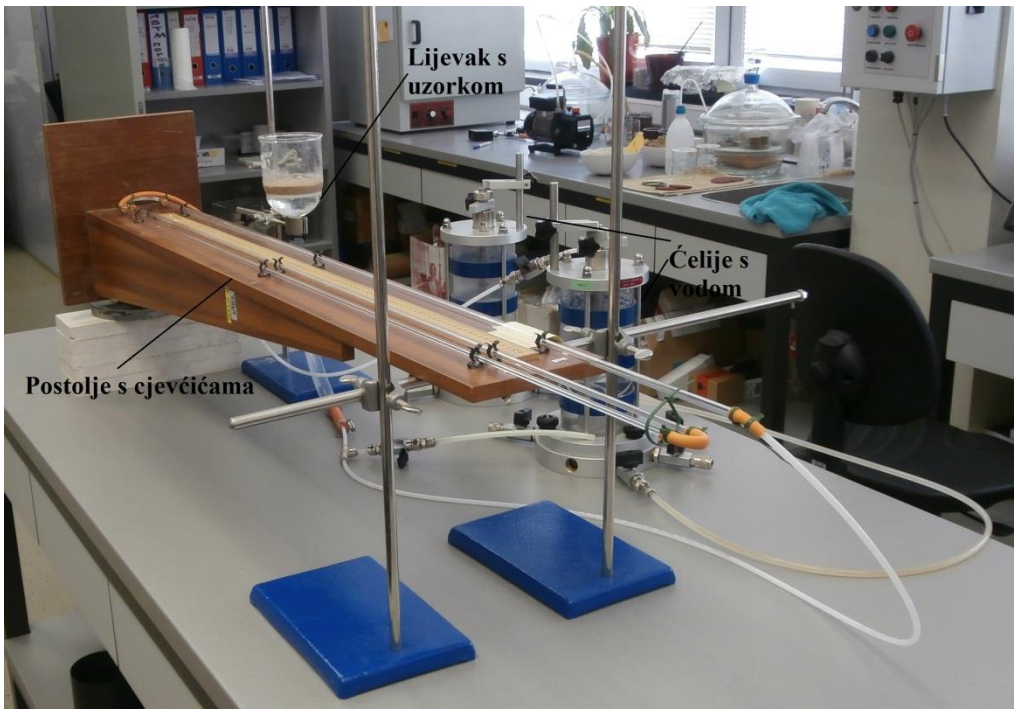
5. MJERENJA

Mjerenja su provedena u Geomehaničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

Korištena je sljedeća oprema: drveno postolje na kojemu su smještene tri staklene cjevčice povezane u seriju, stakla na kojemu je učvršćen Buchnerov lijevak, dvije ćelije, milimetarski mjerač na drvenom postolju. Buchenerov lijevak je spojen pomoću gumenog, prozirnog crijeva na prvu staklenu cjevčicu. Zadnja staklena cjevčica također je spojena gumenom, prozirnom cijevi na vrh staklene ćelije, ta staklena ćelija povezana je na isti način s drugom staklenom ćelijom.

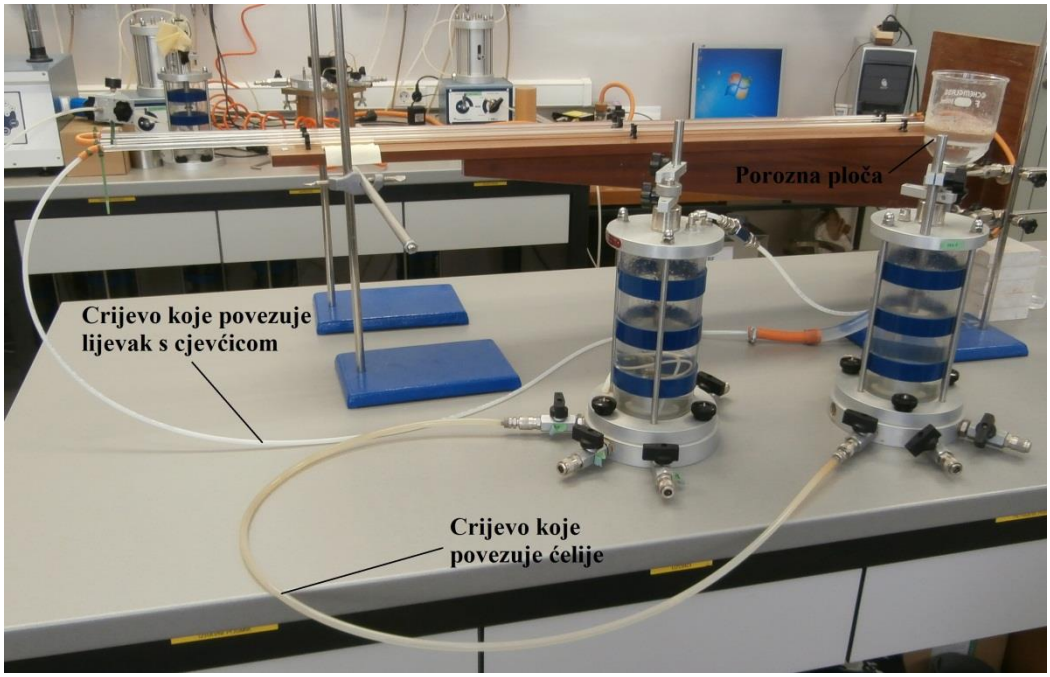
5.1. Oprema

Prije početka mjerenja nivelirano je drveno postolje sa staklenim cjevčicama (Slika 5-1). Staklene cjevčice su na istoj visinskoj razini kao i dno uzorka. U Bucherovom lijevku nalazi se porozna pločica (air entry disk) te je donji dio lijevka do porozne pločice napunjen vodom.



Slika 5-1. Prikaz korištene aparature

Ćelije su napunjene vodom do iste razine, ali ne do vrha (Slika 5-2). Svi ventili prije početka mjerenja su zatvoreni. U Buchenerov lijevak na poroznu ploču ugrađen je uzorak, koji se saturira prije početka mjerenja. Otvaranjem kombinacije ventila ispod ćelije dovedena je voda do prve staklene cjevčice na nultu točku milimetarskog mjerača. Nakon što je voda došla do nulte točke milimetarskog mjerača ventili se zatvaraju. Time su postavljeni početni uvjeti mjerenja.



Slika 5-2. Prikaz korištene aparature, detalj povezivanja

5.2. Način mjerenja

Ćelija 1 je spuštena za određenu visinu u odnosu na ćeliju 2, čime se postiže visinska razlika između razina vode u ćelijama (Δh). Ventili se otvaraju te se za svakih 30 sekundi na milimetarskom mjeraču očitava pomak vode u staklenim cjevčicama. Mjerenje za tu visinsku razliku između razina vode u ćelijama provodi se dok god se voda u cjevčicama kreće odnosno voda izlazi iz uzorka. Kada voda u cjevčici dođe u stanje mirovanja, ventili se zatvaraju te se ćelija opet spušta za određenu visinu, ovime povećavamo razliku razina vode u ćelijama što rezultira većim negativnim pornim tlakom na bazi uzorka u

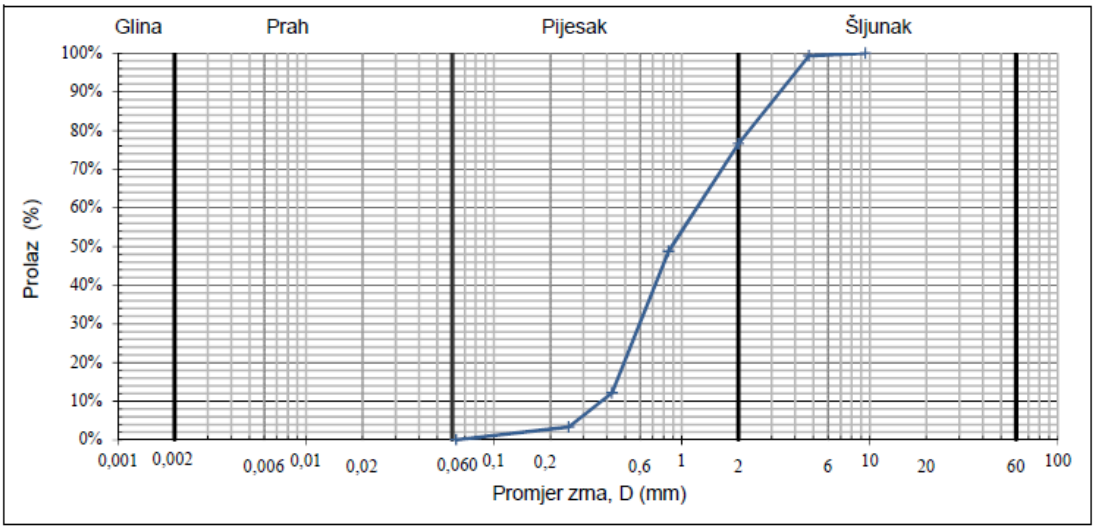
Buchnerovom lijevku. Otvaraju se ventili te se postupak ponavlja, sve do postizanja ravnotežnog stanja. Najveća razlika ćelija prikazana je na slici 5.3., pri čemu je došlo do najveće desaturacije uzorka. Nakon desaturacije uzorka proveden je obrnuti postupak, kojim se uzorak vlaži što se postiže smanjenjem visinske razlike između ćelija. Postupak zatvaranje ventila i mjerenja je identičan kao kod sušenja uzorka.



Slika 5-3. Prikaz najveće visinske razlike između ćelija.

5.3. Uzorak I

Za uzorak je odabran drobljeni dolomit, frakcije 0-4,75 mm. Na slici 5-4. prikazana je granulometrijska krivulja uzorka. Uzorak sadrži 15,71% zrna veličine šljunka, te 83,93 % veličine pijeska (62,70 % čini krupni pijesak), dok zrna veličine praha i gline ima svega 0,34%.



Slika 5-4. Granulometrijska krivulja uzorka I

5.3.1. Prvo mjerenje

Masa suhog uzorka iznosila je 94,42 g, dok je visina iznosila 0,97 cm, a promjer 13,43 cm.

U fazi sušenja uzorka mjerenja su provedena pri 12 različitih vrijednosti usisa. Minimalna visinska razlika između ćelija iznosila je 7 cm, dok je maksimalna razlika iznosila 89 cm. Rezultati sušenja uzorka prikazani su tablicom 5-1.

Tablica 5-1. Prikaz dobivenih rezultata sušenja prvog mjerenja uzorka I

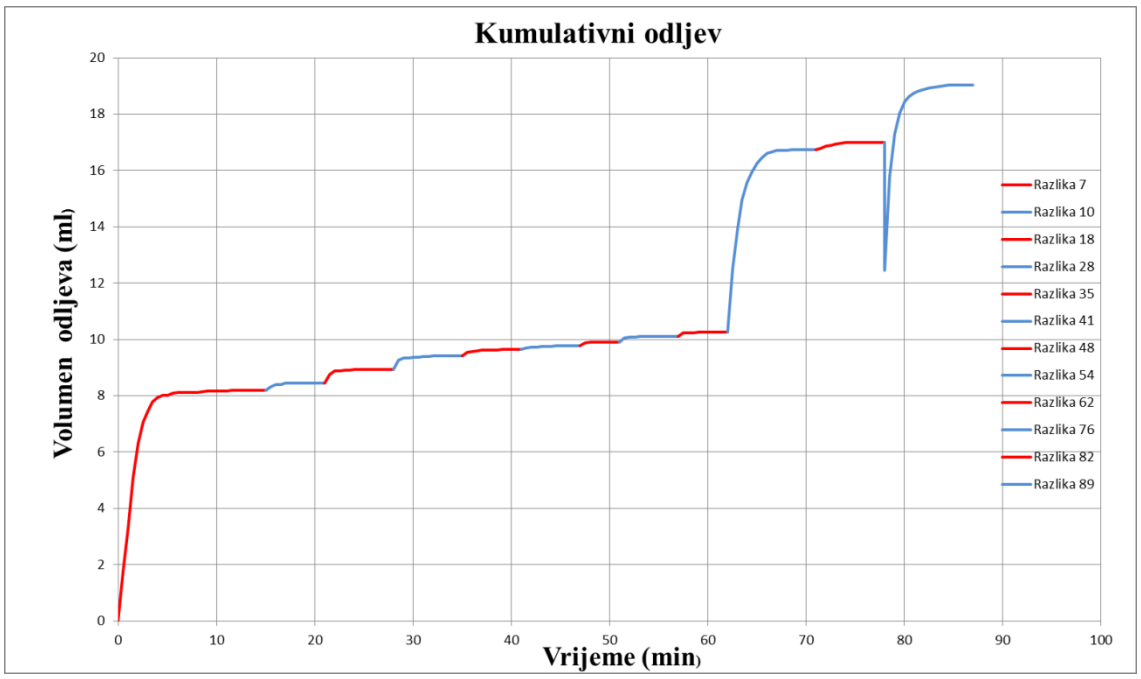
Razlika	Usis	$V_{cjevcice}$	ΔVcjevcic	Δw	w	Stupanj saturacije	Volumski sadržaj vlage
(cm)	(kPa)	(ml)	(ml)	(%)	(%)		(%)
7	0,7	8,193179393	0	0	12,50455	1	0,754589961
10	1	8,459083795	0,265904	0,281619	12,22294	0,97747908	0,737595901
18	1,8	8,941035524	0,481952	0,510434	11,71256	0,936663618	0,706796963
28	2,8	9,406368228	0,465333	0,492833	11,21966	0,897245655	0,677052564
35	3,5	9,63903458	0,232666	0,246416	10,97331	0,877545143	0,662186756
41	4,1	9,771986781	0,132952	0,140809	10,83245	0,866280449	0,65368653
48	4,8	9,904938982	0,132952	0,140809	10,6917	0,855024223	0,645192696
54	5,4	10,10436728	0,199428	0,211214	10,48041	0,838127181	0,632442357
62	6,2	10,25393851	0,149571	0,158411	10,32207	0,825464986	0,622887592
76	7,6	16,73535831	6,48142	6,864456	3,45753	0,276501677	0,20864539
82	8,2	17,00126272	0,265904	0,281619	3,175916	0,253980757	0,19165133
89	8,9	19,02878378	2,027521	2,147343	1,028596	0,082257682	0,062070821

Za vlaženje uzorka napravljeno je 3 mjerenja (različitih visina između ćelija). Maksimalna visinska razlika između ćelija iznosi 82 cm, dok je minimalna razlika 32 cm. Rezultati dobiveni vlaženjem uzorka prikazani su u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Prikaz dobivenih rezultata vlaženja prvog mjerenja uzorka I

Razlika	Usis	$V_{cjevcice}$	ΔVcjevcic	Δw	w	Stupanj saturacije	Volumski sadržaj vlage
(cm)	(kPa)	(ml)	(ml)	(%)	(%)		(%)
89	8,9	19,02878378	2,027521	2,147343	0,010286	0,082257682	0,062070821
82	8,2	18,54683205	-0,48195	-0,51043	0,015391	0,123081614	0,09287615
76	7,6	18,72964133	0,182809	0,193613	0,013454	0,107590541	0,081186742
32	3,2	15,78807388	-2,94157	-3,11541	0,044609	0,356743572	0,269195118

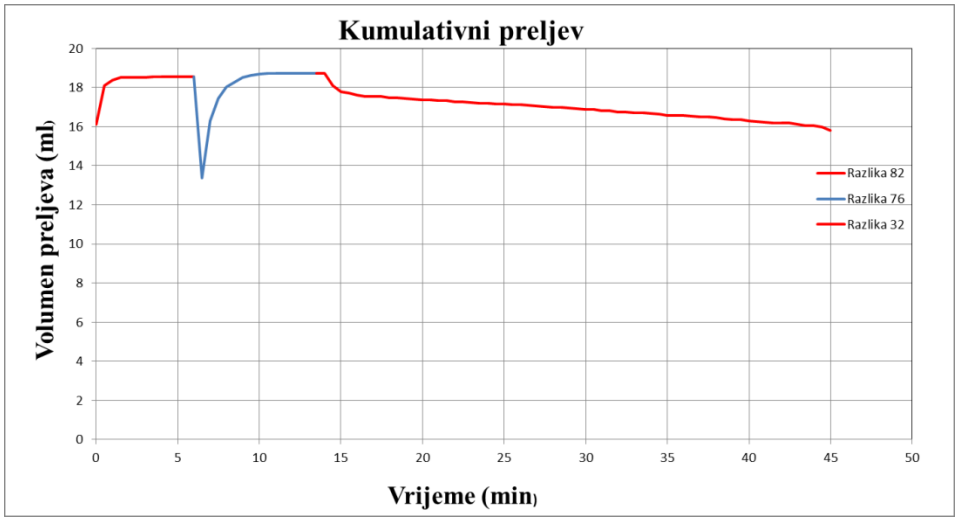
Slika 5-5. prikazuje dijagram koji predstavlja odnos vremena i volumena odljeva vode. Zbog velikog međuprostora između čestica u uzorku pri prvoj visinskoj razlici između ćelija volumen odljeva je velik, što je vidljivo na dijagramu. Pomak razlika između ćelija većinom je bio u rasponu od 6-10 cm, što je u skladu s promjenom volumena odljeva. Velika visinska razlika 14 cm rezultirala je velikom promjenom volumena odljeva. Pri zadnjem mjerenju zbog vraćanja razina vode u ćelijama na jednaku razinu dio vode se vratio u uzorak, kao što je vidljivo na dijagramu.



Slika 5-5. Dijagram odljeva (uzorak I, prvo mjerenje)

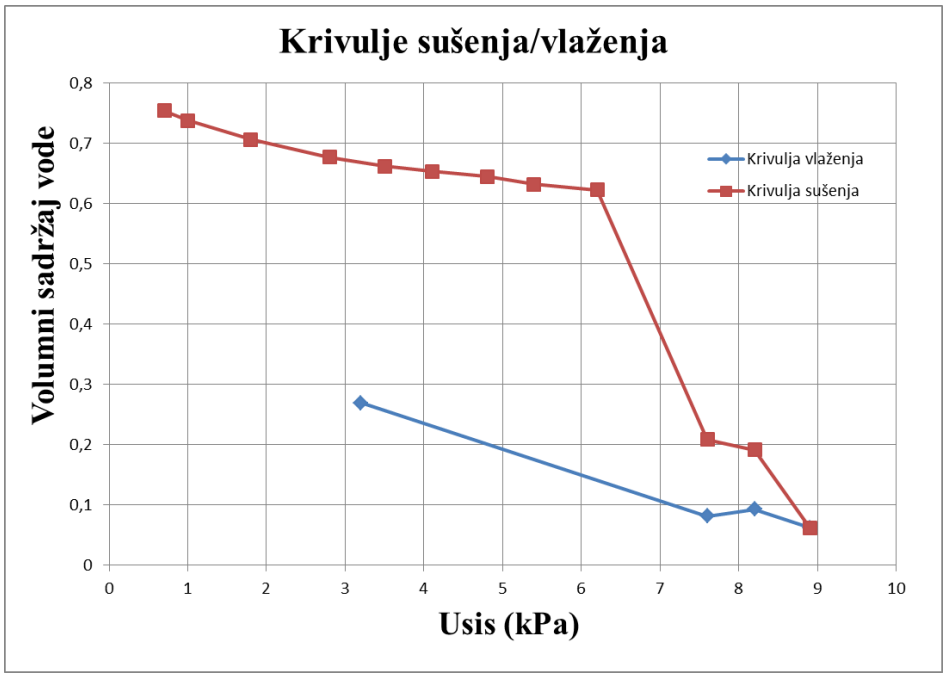
Kod ovog uzorka pojavile su se teškoće s brtvljenjem opreme pa je mjerenje volumena vode pri većim negativnim stupcima vode bilo otežano. Navedeno se posebno vidi na skokovima na dijagramu koji su rezultat vraćanja razina vode u ćelijama na iste visine

(Slika 5-6). Nakon promjene razlike visina između ćelija uočen je početni skok volumena vode koji je vraćen u uzorak.



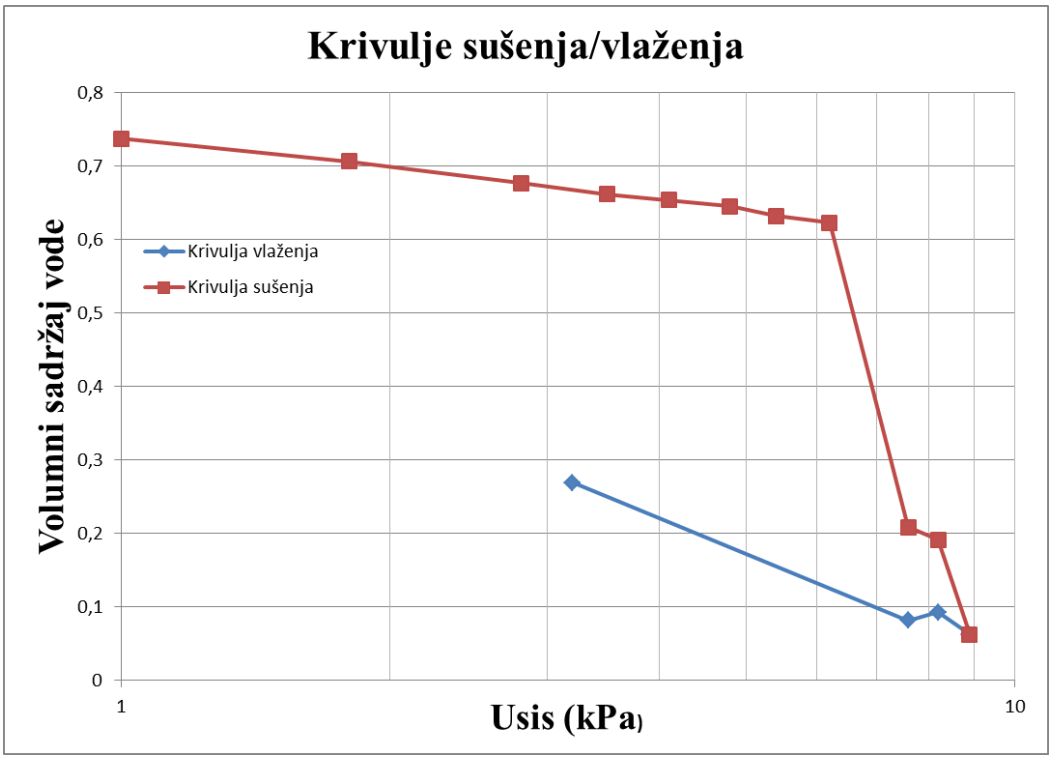
Slika 5-6. Dijagram upijanja (uzorak I, prvo mjerenje)

Krivulja sušenja prikazuje odnos volumnog sadržaja vode naspram usisa. Na dijagramu (Slika 5-7) je vidljivo smanjivanje vode s povećanjem usisa, za vrijednost usisa 6,2 kPa dogodio se skok, tj. naglo sušenja uzorka. Sa usisom vrijednosti 8,9 kPa gotovo je sva voda iz uzorka izvučena. Krivuljom vlaženja prikazano je vraćanje vode u uzorak.



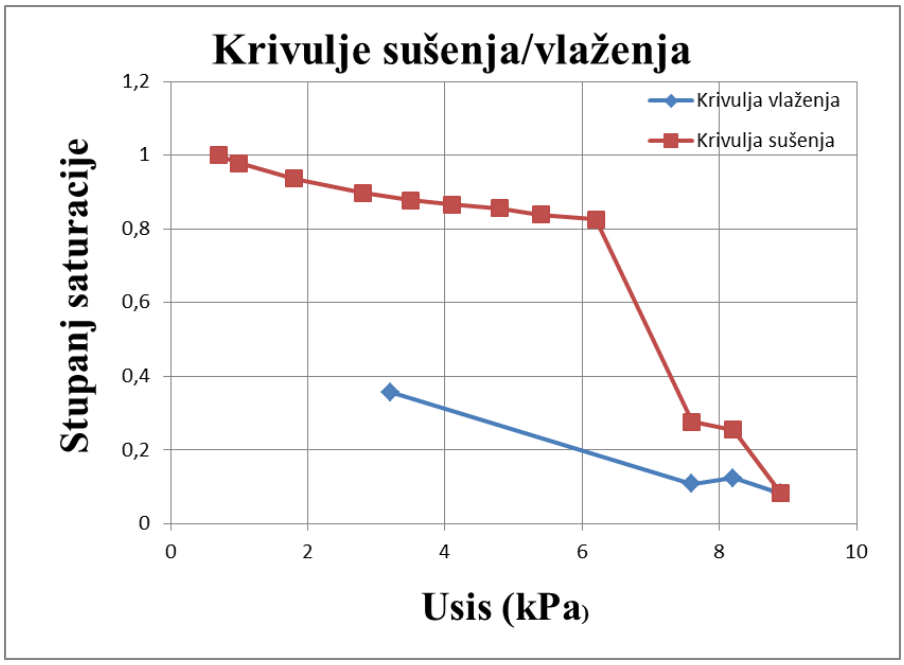
Slika 5-7. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak I, prvo mjerenje)

Na slici 5-8. prikazane su krivulje sušenja i vlaženja u logaritamskom mjerilu.



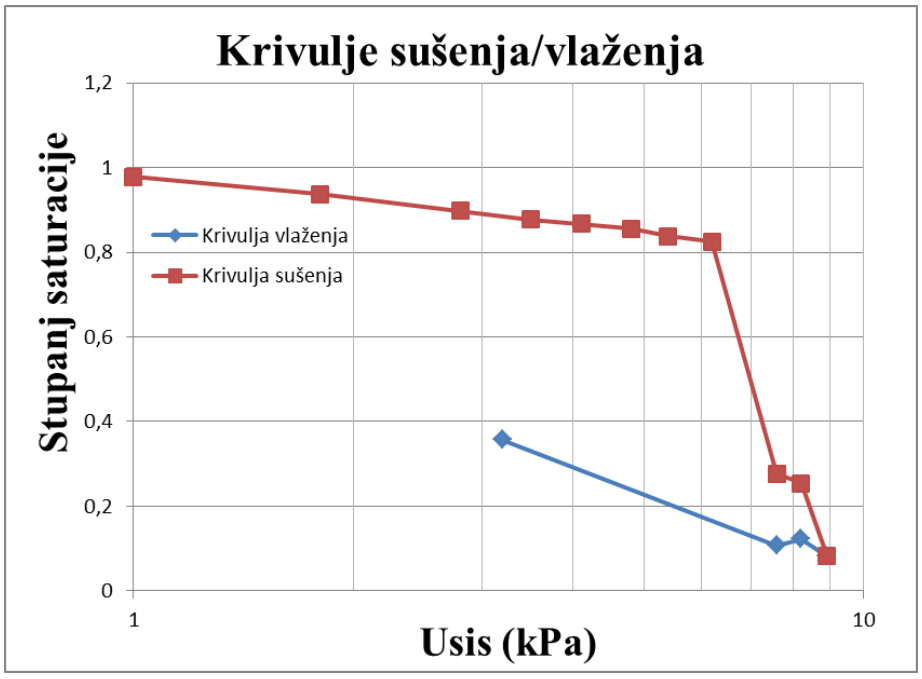
Slika 5-8. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, prvo mjerenje)

Odnos stupnja saturacije i usisnih naprezanja vidljiv je na slici 5-9. Krivulja sušenja pokazuje početno stanje uzorka, gdje je stupanj saturacije 1. Povećanjem vrijednosti usisa stupanj saturacije se smanjuje, što je logično obzirom da voda iz uzorka odlazi. Pri najvećoj vrijednosti usisa od 8,9 kPa stupanj saturacije iznosio je 0,08. Krivuljom vlaženja, smanjivanjem usisa stupanj saturacije raste, voda se vraća u uzorak. Za usis vrijednosti 3,2 kPa stupanj saturacije iznosi 0,36. Na temelju mjerenja može se zaključiti kako je teže vratiti vodu u uzorak, nego li istu izvlačiti iz uzorka što je već ranije objašnjeno histerezom.



Slika 5-9. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis (uzorak I, prvo mjerenje)

Slika 5-10. prikazuje krivulje sušenja i vlaženje u ovisnosti o stupnju saturacije u logaritamskom mjerilu.



Slika 5-10. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, prvo mjerenje)

5.3.2. Drugo mjerenje

Uzorak bio je isti kao u prethodnom mjerenju. Masa suhog uzorka iznosila je 206,67 g. visina uzorka je 1,58 cm, promjera 13,43 cm.

Dijagram kumulativnog odljeva (slika 5-11.) prikazuje fazu sušenja uzorka. Najveći volumen odljeva je pri visinskoj razlici između ćelija od 77 cm. Maksimalni volumen odljeva iznosi 22 ml, pri visinskoj razlici između ćelija od 107 cm.

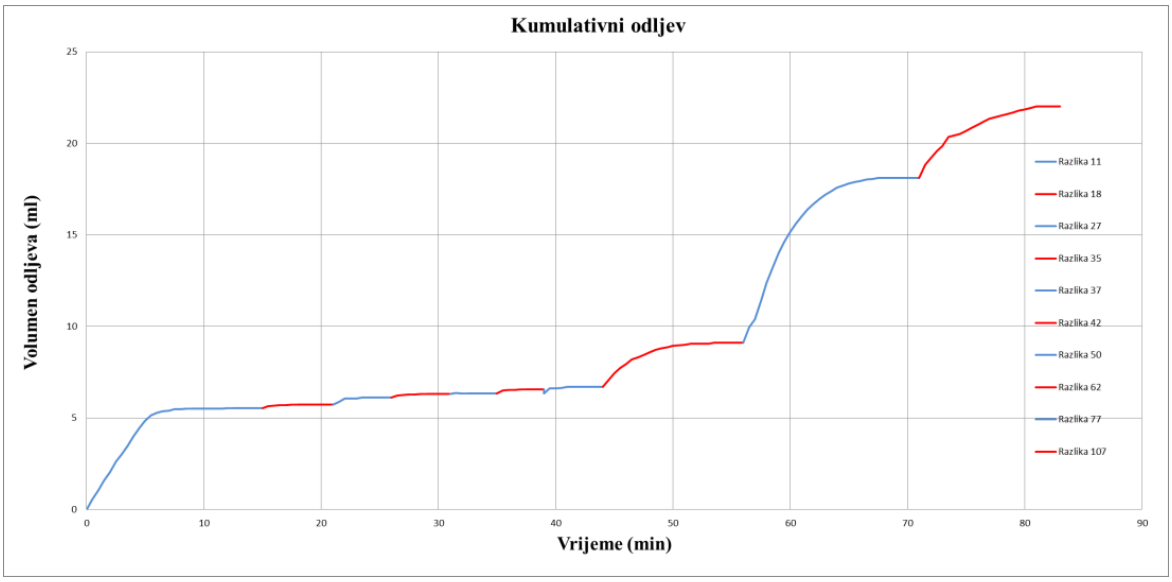
U fazi sušenja uzorka provedeno je 10 (tablica 5-3) mjerenja (visinskih razlika razina vode u ćelijama). Kod najveće razlika razina vode u ćelijama, iznosila 107 cm, pri čemu je postignut stupanj saturacije od 0,03, iz čega se može zaključiti kako je gotovo sva voda iz uzorka odvedena.

I u ovom slučaju pojavili su se problemi s brtvljenjem opreme pri graničnim vrijednostima usisa te nije rađeno vlaženje uzorka.

Tablica 5-3. Prikaz rezultata dobiveni sušenjem (uzorak I, drugo mjerenje)

Razlika	Usis	$V_{cjevcice}$	ΔVcjevcic	Δw	w	Stupanj saturacije	Volumski sadržaj vode
(cm)	(kPa)	(ml)	(ml)	(%)	(%)		(%)
11	1,1	5,517516	0	0	11,12885	1	0,4628374
18	1,8	5,716945	0,199428	0,096496	8,362385	0,751414833	0,347782888
27	2,7	6,099182	0,382238	0,184951	8,177434	0,734795808	0,340090982
35	3,5	6,298611	0,199428	0,096496	8,080938	0,726125013	0,336077813
43	4,3	6,331849	0,033238	0,016083	8,064856	0,72467988	0,335408952
47	4,7	6,547896	0,216047	0,104537	7,960318	0,715286518	0,331061352
50	5	6,697467	0,149571	0,072372	7,783409	0,699390059	0,323703877
62	6,2	9,090607	2,39314	1,157952	6,625457	0,59534051	0,275545854
77	7,7	18,09812	9,007512	4,358403	2,267054	0,20370957	0,094284408
107	10,7	22,00359	3,905471	1,889714	0,377341	0,033906527	0,015693209

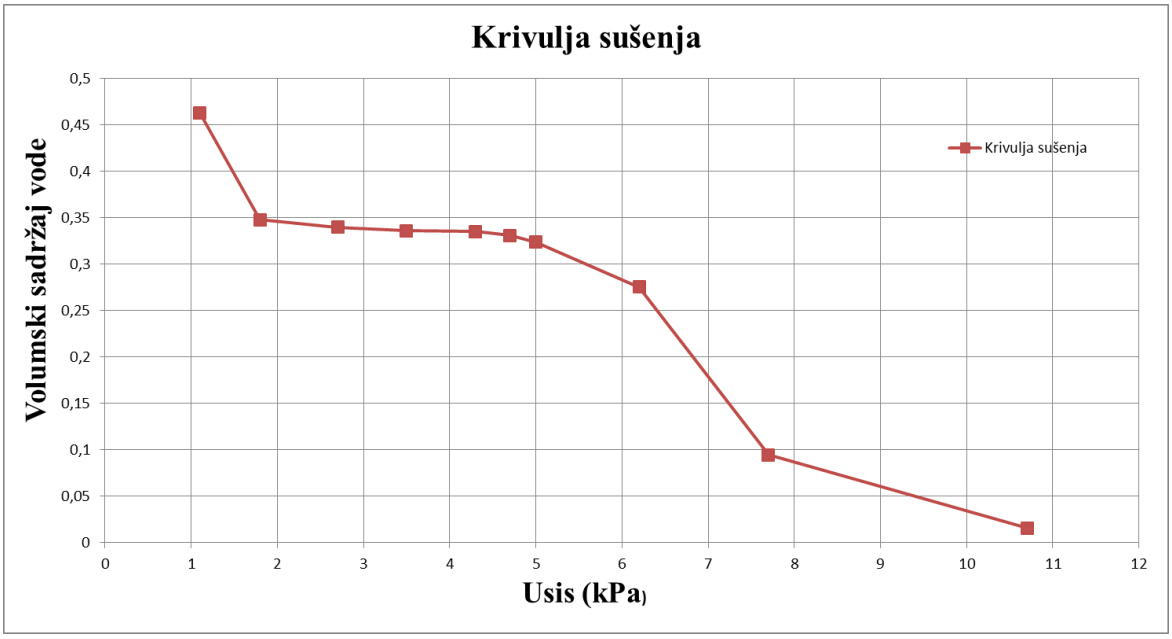
Dijagram kumulativnog odljeva (slika 5-11.) prikazuje postepeno sušenje uzorka u vremenu. Za razliku visine između ćelija koji je postignut sa 62 na 77 cm, dogodio se skok, koji se može objasniti zbog najveće promjene usisa koju smo podesili. Maksimalni volumen vode koji je odveden iz uzorka iznosi 22,0 ml.



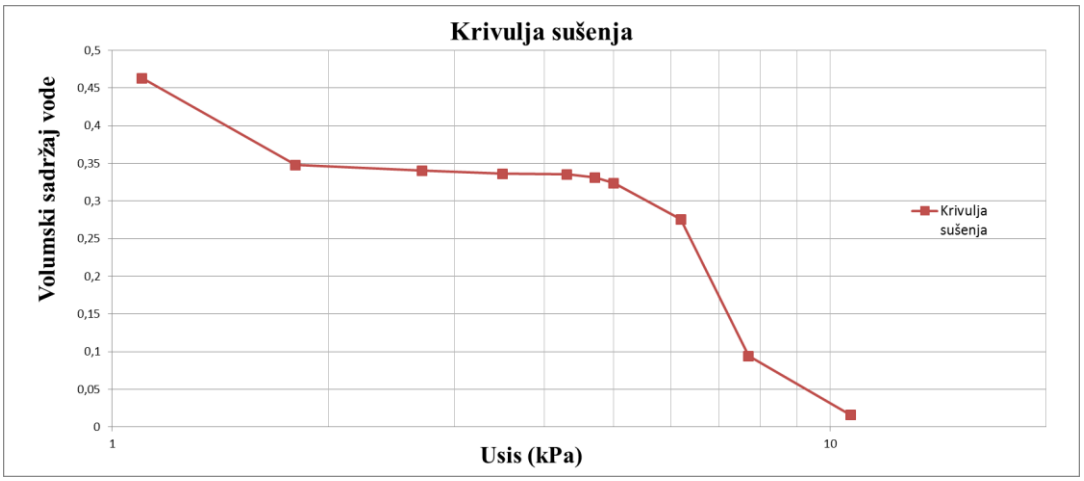
Slika 5-11. Dijagram odljeva (uzorak I, drugo mjerenje)

Krivulja sušenja (Slika 5-12) prikazuje postepeno odvođenje vode iz uzorka. Za promjenu usisa sa 6,2 na 7,7 kPa vidljiva je velika promjena volumena vode u uzorku. Skok se desio zbog velike promjene usisa. Međutim, za veliku promjenu usisa sa 7,7 na 10,7 kPa skok nije toliko velik, iz razloga što je većina vode iz uzorka već odvedena.

Slika 5-13. prikazuje krivulju sušenja u logaritamskom mjerilu.

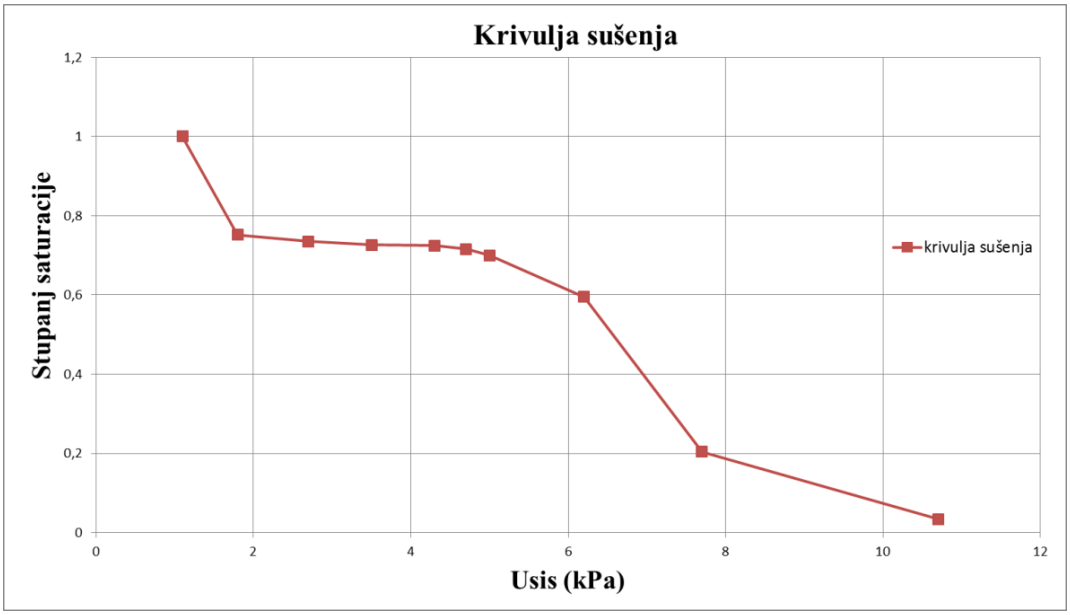


Slika 5-12. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak I, drugo mjerenje)

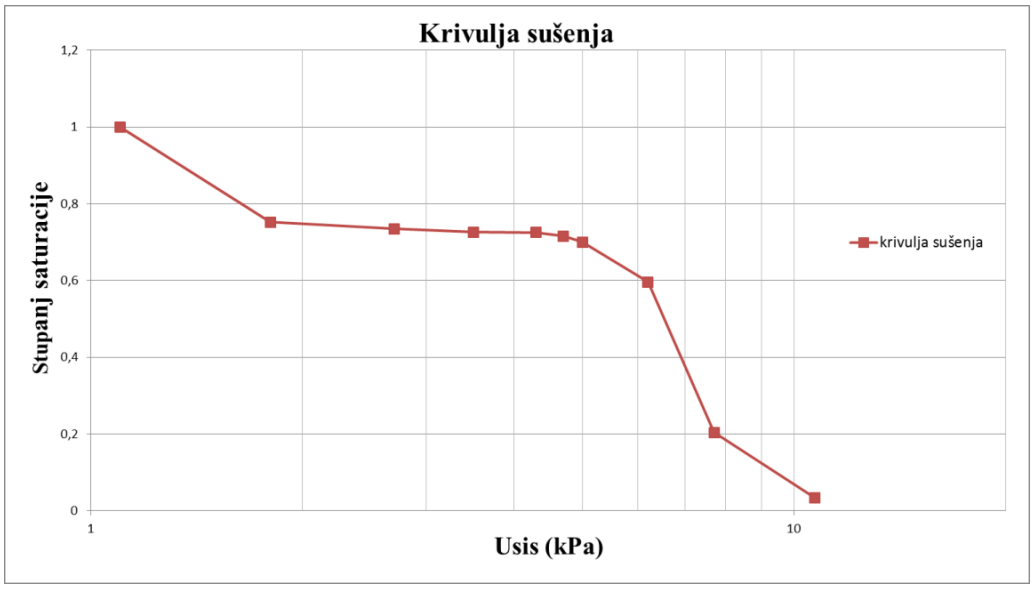


Slika 5-13. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, drugo mjerenje)

Dijagram na slici 5-14. prikazuje odnos stupnja saturacije i usisa, odnosno na slici 5-15 prikazan je isti odnos u logaritamskom mjerilu. Krivulje su istog oblika kao i krivulje koje prikazuju odnos usisa s volumnim sadržajem vode. Kao i prethodni uzorak, na početku mjerenja stupanj saturacije iznosi 1, dakle uzorak je potpuno saturiran.



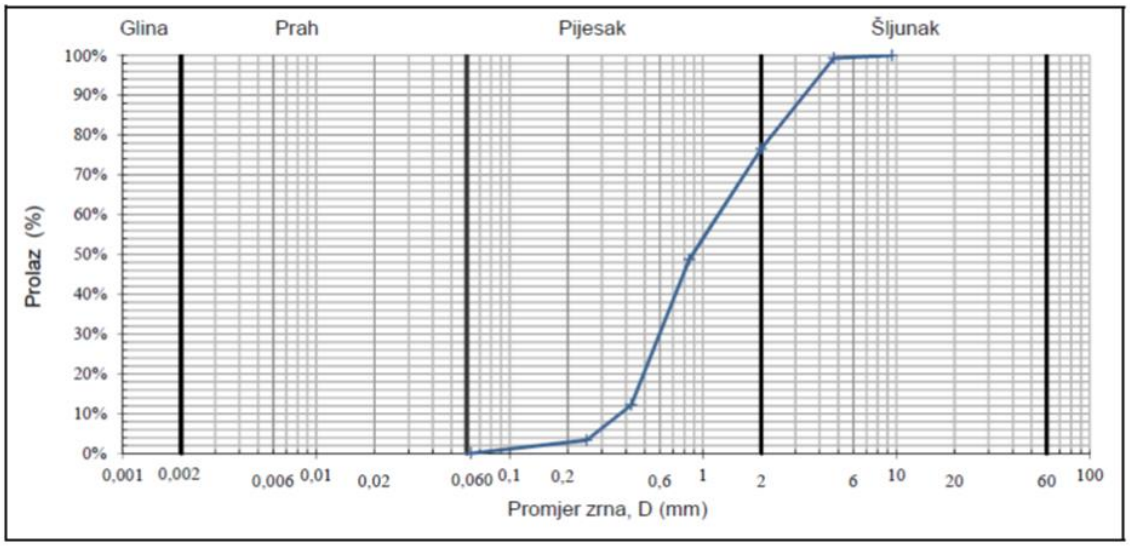
Slika 5-14. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis (uzorak I, drugo mjerenje)



Slika 5-15. Dijagram stupnja saturacije uzorka u odnosu na usis, logaritamsko mjerilo (uzorak I, drugo mjerenje)

5.4. Uzorak II

Za uzorak je upotrjebljen drobljeni vapnenac, frakcije 0-4,75 mm. Slika 5-16. prikazuje granulometrijsku krivulju uzorka. Uzorak sadrži 23,45% zna veličine šljunka, te 76,55% pijeska (47,91% čini krupni pijesak), dok zna veličine gline i praha ne sadrži uopće.



Slika 5-16. Granulometrijski sastav uzorka II

Uzorak je bio visine 1,58 cm, i promjera 13,43 cm. Masa uzorka bila je 128,2 g.

Za sušenje uzorka napravljeno je 5 mjerenja (različitih visinskih razlika razina vode u ćelijama). Minimalna visinska razlika između razina vode u ćelijama iznosila je 18 cm, dok je maksimalna bila 87 cm, što odgovara maksimalnom usisnom naprezanju od 8,7 kPa. Rezultati sušenja uzorka prikazani su tablicom 5-4.

Tablica 5-4. Prikaz dobivenih rezultata sušenja mjerenja uzorka II

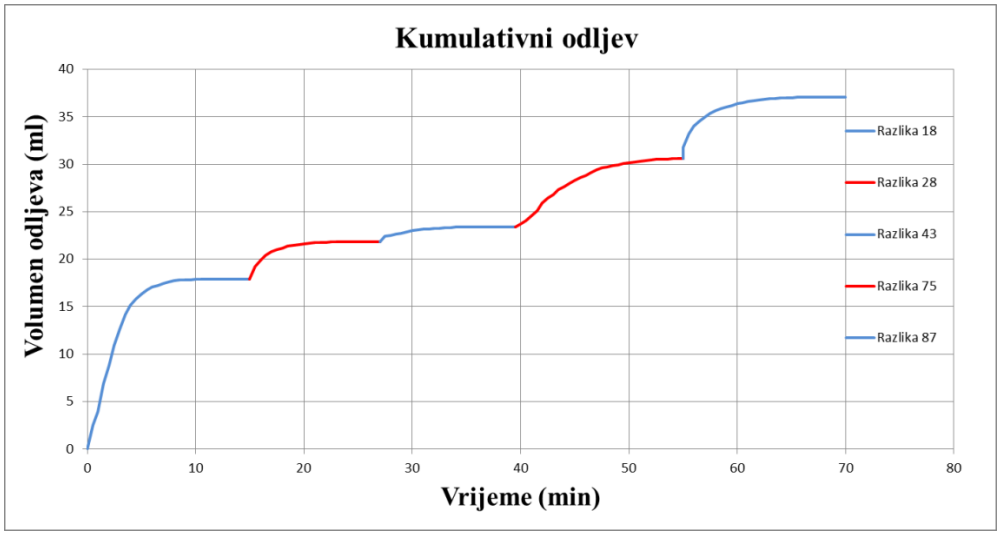
Razlika	Usis	$V_{cjevcice}$	ΔVcjevcic	Δw	w	Stupanj saturacije	Volumski sadržaj vode
(cm)	(kPa)	(ml)	(ml)	(%)	(%)		(%)
18	1,8	17,89869	0	0	17,23971	1	0,666791284
28	2,8	21,8374	3,938709	3,072316	14,1674	0,821788438	0,547961368
43	4,3	23,41621	1,578807	1,231519	12,93588	0,750353424	0,500329123
75	7,5	30,61224	7,196038	5,613134	7,322742	0,424760149	0,283226365
87	8,7	37,04381	6,431563	5,01682	3,239285	0,187896681	0,125287869

Za vlaženja uzorka napravljeno je 2 mjerenja (različitih visinskih razlika između ćelija). Rezultati dobiveni vlaženjem uzorka prikazani su tablicom 5-5.

Tablica 5-5. Prikaz dobivenih rezultata vlaženja mjerenja uzorka II

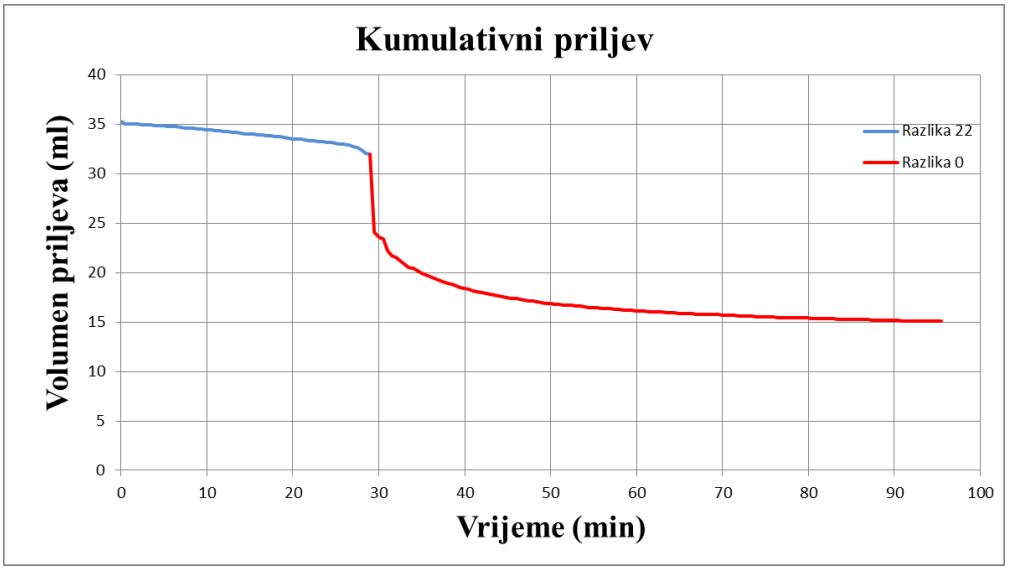
Razlika	Usis	Vcjevcice	ΔVcjevcic	Δw	w	Stupanj saturacije	Volumski sadržaj vode
(cm)	(kPa)	(ml)	(ml)	(%)	(%)		(%)
22	2,2	32,00824	-5,03556	-3,9279	5,806029	0,336782289	0,224563495
0	0	15,10669	-16,9015	-13,1837	12,81921	0,743585896	0,495816595

Slika 5-17. prikazuje dijagram koji predstavlja odnos vremena i volumena odljeva vode. Na dijagramu je vidljivo kako se postepeno s vremenom volumen odljeva povećava. Za razliku visine između razina vode u ćelijama od 87 cm volumen odljeva iznosi 37 ml.



Slika 5-17. Dijagram odljeva (uzorak II)

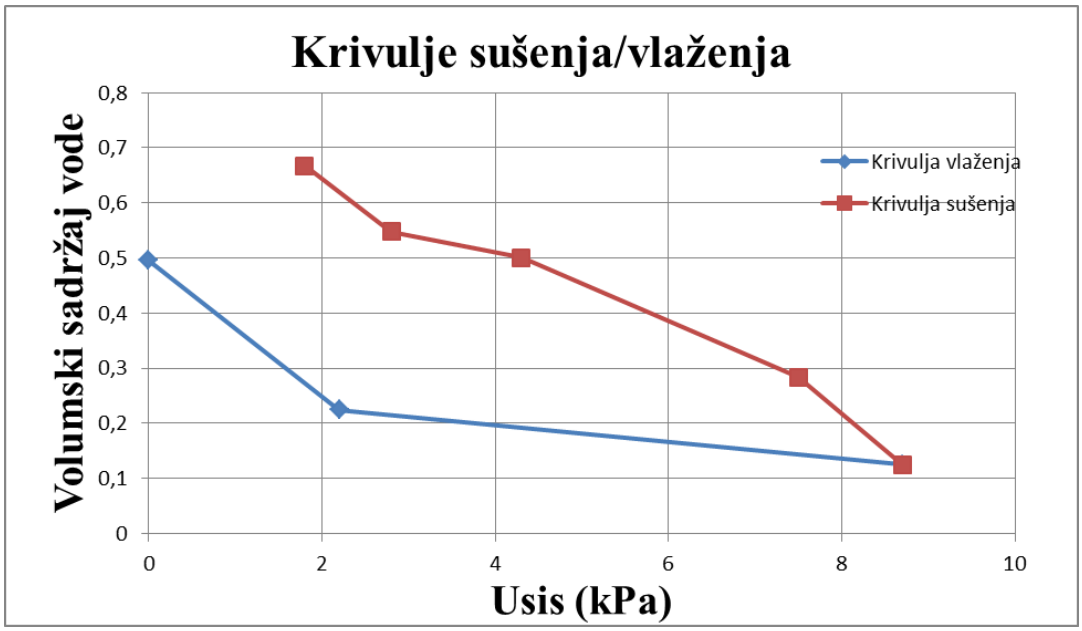
Obrnutim postupkom, smanjivanjem vrijednosti usisa, vraća se voda u uzorak (Slika 5-18). Za razliku od 22 cm, što odgovara vrijednosti usisa 2,2 kPa volumen vode koji se vratio u uzorak iznosi 3 ml. Može se primijetiti kako vraćanje uzorka na ovome grafu nije početo od najviše vrijednosti volumena vode koji je odveden iz uzorka (37 ml), već je on nešto niži. Dok se namještala aparatura za sljedeće mjerenje, došlo je do pada usisa i povratka vode u uzorak. Za razliku od 0 cm, dakle ćelije su na istoj razini, vraćanje vode postignuto je do 15 ml što govori da 15 ml vode, nije moguće vratiti uz pomoć podtlaka.



Slika 5-18. Dijagram priljeva (uzorak II)

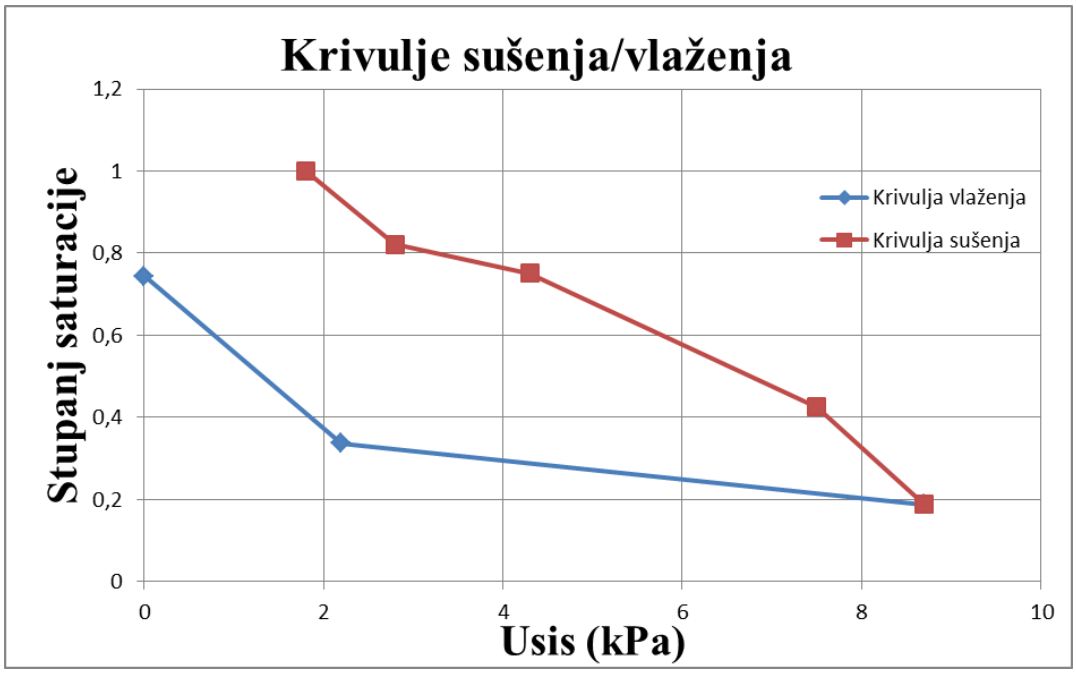
Krivuljom sušenja na slikama 5-19. i 5-20. prikazano je odvođenje vode iz uzorka za određene vrijednosti usisa, u linearnom i logaritamskom mjerilu. Za vrijednost usisa od 8,7 kPa stupanj saturacije uzorka iznosio je 0,08. Plava krivulja označava krivulju vlaženja. Vidljivo je ako se najviše vode vratilo u uzorak kada je vrijednost usisa na 0 kPa, tj. usisa nema.

Crvena krivulja na slikama 5-21. i 5-22. prikazuje odnos stupanja saturacije i usisa, u linearnom i logaritamskom mjerilu. Iz ovoga se vidi kako je stupanj saturacije usko povezan s volumskim sadržajem vode.

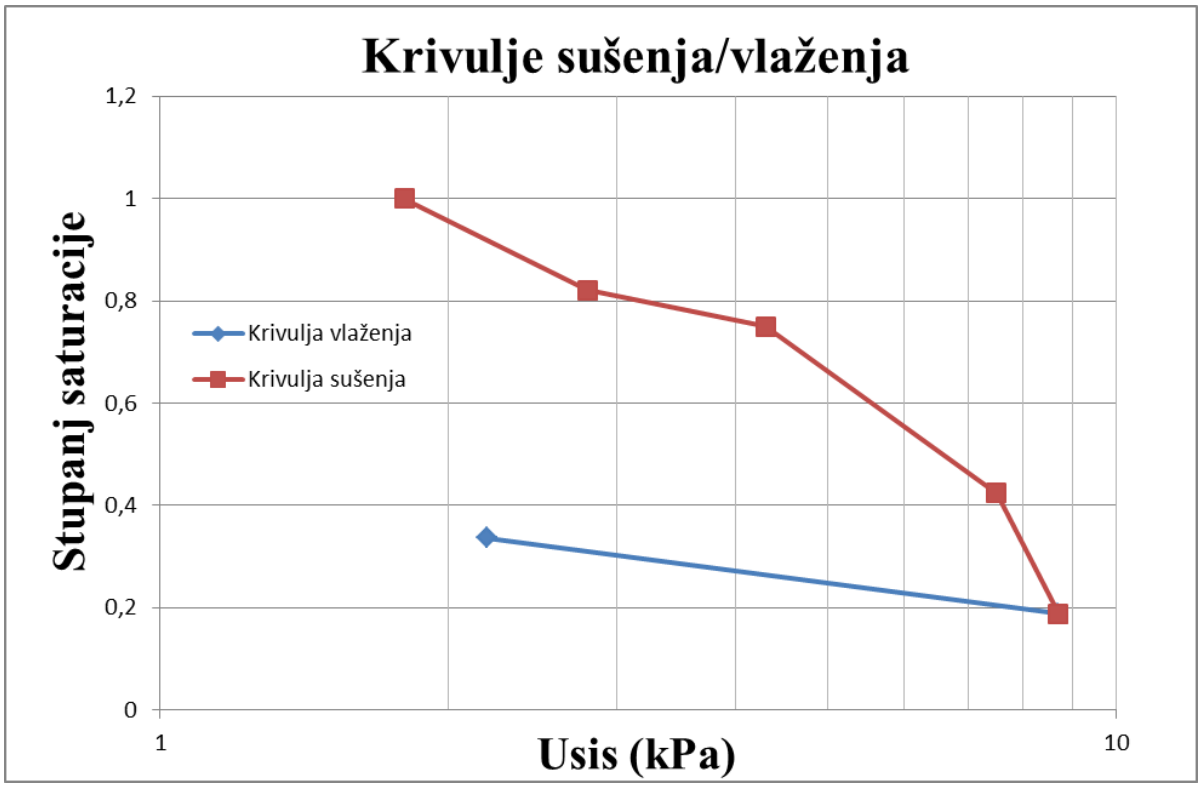


Slika 5-19. Dijagram volumnog sadržaja vode u odnosu na usis (uzorak II)

Slika 5-20. Dijagram krivulja sušenja/vlaženja prikazan sa volumnim sadržajem vode, logaritamsko mjerilo (uzorak II)



Slika 5-21. Krivulje sušenja/vlaženja za stupanj saturacije (uzorak II)



Slika 5-22. Krivulje sušenja/vlaženja za stupanj saturacije, logaritamsko mjerilo (uzorak II)

5.5. Rezultati mjerenja

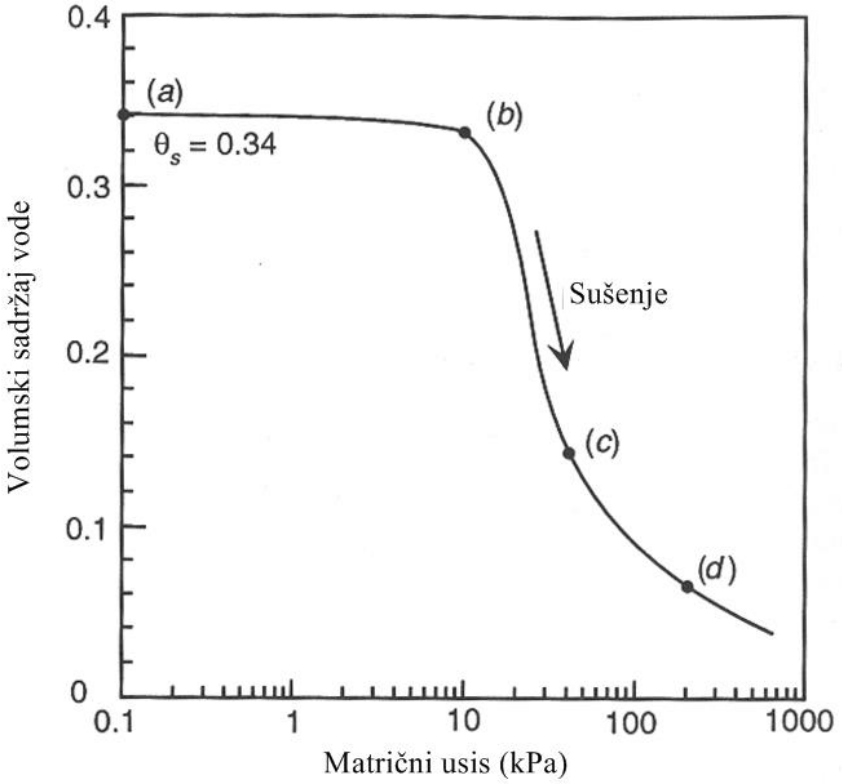
Pokusi sušenja i vlaženja provedeni su na dva uzorka drobljenih stijena. Za uzorak I, provedena su dva ispitivanja, gdje je razlika bila u masi i visini uzorka te u vrijednostima usisa. Međutim unatoč razlikama u ispitivanjima, dijagrami kumulativnog odljeva su dosta slični. Dijagrami kumulativnog priljeva se razlikuju, međutim velike su razlike u zadanim usisnima. Za isti uzorak maksimalni volumen odljeva kod prvog mjerenja iznosi 19,028 ml za vrijednost usisa 8,9 kPa, dok je kod drugog mjerenja maksimalno volumen odljeva 22,004 ml za vrijednost usisa 10,7 kPa. Rezultati su logični obzirom da je uzorak kod drugog mjerenja veće visine (h= 1,58 cm) u odnosu na prvo mjerenje uzorka (h=0,97 cm). Također kod drugog mjerenja postignut je veći maksimalni usis, što također rezultira većim volumenom odljeva.

Kod volumena priljeva (vraćanja vode) u prvom mjerenju postignuto je vraćanje vode do 15,75 ml za vrijednost usisa od 3,2 kPa, dok u drugom mjerenju zbog poteškoća s opremom krivulja vlaženja nije dobivena.

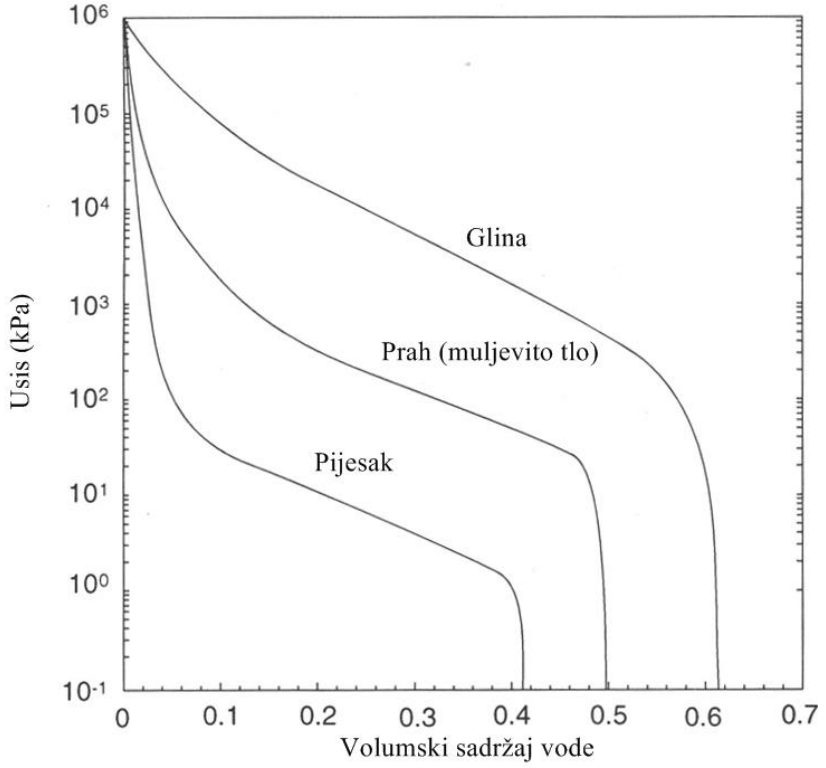
Ako gledamo dobivene vrijednosti stupnja saturacije, za isti uzorak vidljivo je kako je u prvom mjerenju vrijednost stupnja saturacije 0,08 kod usisa od 8,9 kPa, dok je u drugom mjerenju vrijednost stupnja saturacije 0,03 za vrijednost usisa od 10,7 kPa. Rezultate možemo smatrati opravdanim obzirom na razliku u vrijednosti usisa ali i različitom poroznošću uzoraka.

Uzmemo li u obzir rezultate dobivene ispitivanjem uzorka II u odnosu na uzorak I (u oba slučaja mjerenja), vidljivo je uzorak II ima veću kapacitet upijanja vode. Razlog većem upijanju vode je veći porni prostor između čestica u uzorku. Uzorak II teže prima vodu, koja se vraća smanjivanjem usisa. Uzorak II za vrijednost usisa 0 kPa ima vrijednost stupnja saturacije 0,74, dok je uzorak I pri isto vrijednosti usisa stupnja saturacije 0,95.

Kako bi se što bolje shvatili dobiveni podaci mjerenja, slikom 5-23. prikazana je krivulja definirana odnosom usisa i volumskog sadržaja vode. Navedena slika je vezana uz faze sušenja tla (slika 2-3.) i retencije vode (slika 3-1). Za stanje (a) uzorak je potpuno saturiran (kao što je slučaj u provedenim ispitivanjima), usis iznosi nula a ulazak zraka u uzorak nije moguć. Stanje (b) predstavlja povećanje usisa koje dovodi do odvodnje vode iz uzorka i ulaska zraka u porni prostor. U točki (c), odvodnja pod sve većim usisom rezultira značajnim smanjenjem sadržaja vode. Smanjenje je u početku relativno strmo jer pore iz kojih se prvo odvodi voda najveće i najviše povezane, te samim time i najviše provodljive. U točki (d), koja prikazuje zaostalu vodu u uzorku. U ovoj fazi voda u porama je nepovezana (Lu i Likos, 2004). Slika 5-24 prikazuje teoretske krivulje sušenja za pijesak, muljevitog tla i glina.



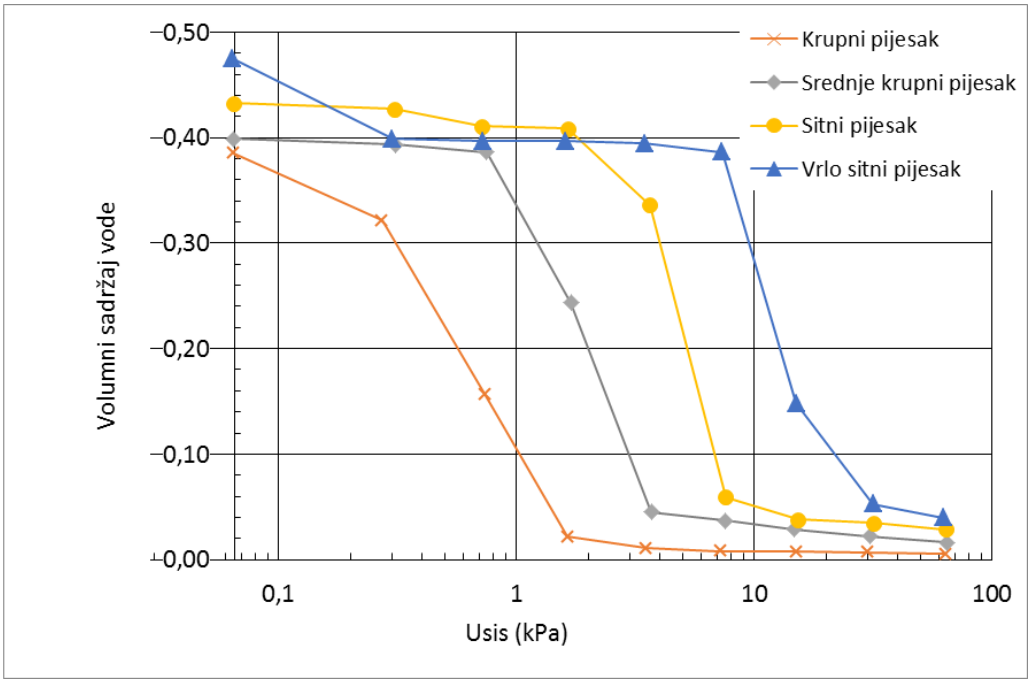
Slika 5-23. Prikaz faza sušenja uzorka (Lu i Likos, 2004).



Slika 5-24. Teoretske krivulje sušenja za različite materijale (Lu i Likos, 2004).

Na slici 5-24 vidljivo je kako za istu vrijednost usisa, najveći je volumen vode u uzorku gline, zbog ekstremno malih dimenzija kako čestica tako i pornih prostora. Dok je odvodnja vode u slučaju pijeska moguća uz niže vrijednosti usisa.

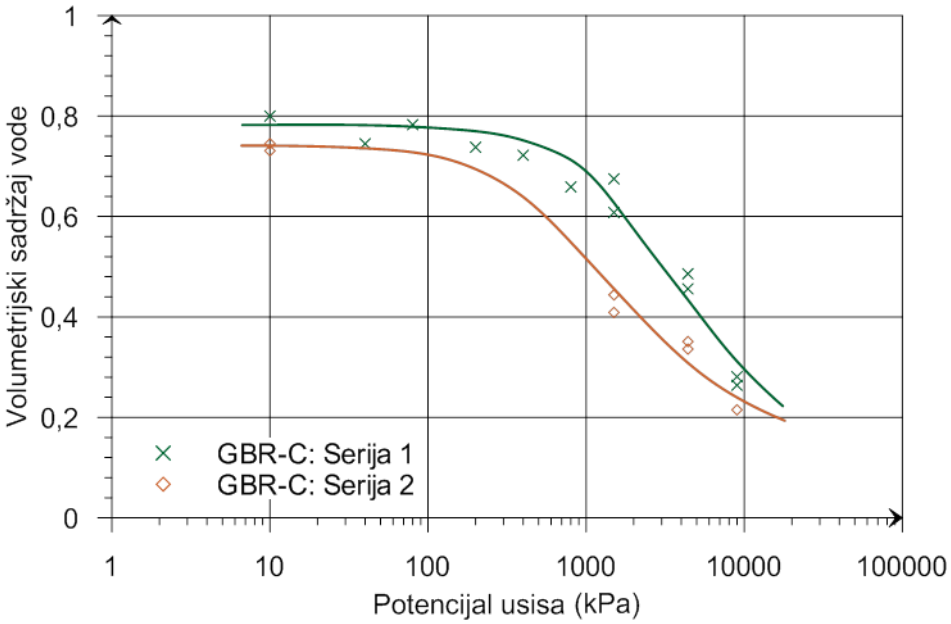
Za pijeske drugačije granolometrije, vidljivo je kako i vrijednosti usisa nisu iste (slika 5-25). Kod pijeska s najkrupnijom formom čestica, odljev vode je najveći za istu vrijednosti usisa koja se primijenila i na ostale uzorke. Na svakoj krivulji vidljiv je velik pad u volumenu odljeva. Ovaj skok moguće je objasniti zbog veličina pora i međuprostora između njih. Pad se dogodio iz razloga što je odljev vode velikih pora koje su međusobno povezane, što samim time ne iziskuje potrebu za velikom vrijednosti usisa.



Slika 5-25. Krivulje retencije vode izmjerena u pijescima (Krupni pijesak, 710-2000 μm; Srednje krupni pijesak, 180-500 μm; Sitni pijesak, 105-220 μm; Vrlo sitni pijesak, 45-125 μm) (modificirano prema Bruand i dr., 2005).

Kao primjer, prikazana je slika 5-26. koja prikazuje krivulje retencije vode izmjerene u glinenim geosintetičkim barijerama (GBR-C, eng. geosynthetic clay barrier) , koje pokazuju da je za sušenje glinene geosintetičke barijere potrebno ostvariti znatno veća usisna naprezanja.

Obzirom na poteškoće tijekom ispitivanja (mijenjanje razina vode u ćelijama), rezultati ispitivanja su zadovoljavajući.



Slika 5-26. Karakteristična krivulja retencije vode izmjerena za glinene geosintetičke barijere (GBR-C) (Southen i Rowe, 2005)

6. ZAKLJUČAK

Ciljevi istraživanja bili su uspostaviti opremu za mjerenje karakteristične krivulje retencije vode metodom negativnog stupca vode te zatim mjerenjima dobiti realnu sliku o vezi promjene volumena vode u uzorku i vrijednosti usisa kod nekoherentnih uzoraka tla.

Mjerenje je obavljeno na dvije vrste uzorka, drobljeni vapnenac i drobljeni dolomit frakcija 0-4,75 mm.

Probna mjerenja ukazala su da je moguće mjeriti promjenu volumena vode u uzorku s promjenom vrijednosti usisa odnosno dobiti krivulju sušenja uzorka. Zbog problema s brtvljenjem sustava, mjerenja za krivulje vlaženja bi bilo poželjno ponoviti. Usporede li se rezultati koji su dobiveni mjerenjima s literaturnim podacima za slična nekoherentna tla, vidljivo je kako je kako su krivulje sušenja međusobno slične.

Kao glavni zaključak se nameće da je još ostalo prostora za modificiranje samog mjerenja. Tijekom ispitivanja javljali su se problemi s brtvljenjem sustava, bilo bi poželjno povećati razliku razina vode u ćelijama, sustav kapilara za mjerenje promjene volumena vode u uzorku ima mali kapacitet te bi ga bilo dobro povećati.

Rezultati su pokazali da je metodom negativnog stupca vode moguće dobiti realnu sliku o retenciji vode u nekoherentnim tlima. Poboljšanjem konstruirane aparature za mjerenje retencije vode metodom negativnog stupca vode moglo bi se na relativno jednostavan način odrediti ponašanje nesaturiranih nekoherentnih tala pri manjim vrijednostima usisnih naprezanja.

7. LITERATURA

Bruand, A., Hartmann, C. Lesturgez G. (2005). Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics., 2005, Khon Kaen, Thailand. 2005, 27.11.2005 au 2.12.2005.

Bošković, M. (2013): "Analiza utjecaja usisnih naprezanja na stabilnost djelomično zasićenog nasipa", Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.

Kavur, B. (2009): "Utjecaj sušenja na ponašanje bubrive stijene", Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.

Lu, L., Likos, W. J., (2004): Unsaturated soil mechanics, J. Wiley, New Jersey.

Southen, J.M. and Rowe, R.K. (2007). "Evaluation of the soil-water characteristic curve for geosynthetic clay liners," Geotextiles and Geomembranes, 25 (1):2-9.

Suzuki, N., (2000): Unsaturated soil http://www.scribd.com/doc/43646500/Unsaturated-Soil

Szavits-Nossan, V. (2012): Nesaturirano tlo. Procesi tečenja u tlu i stijeni. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Tarantino i dr., (2008): Laboratoy and Field Testing of Unsaturated soils, Springer, London.