

Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska

Špoljarić, Magdalena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:860453>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Magdalena Špoljarić

**Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti
pijeska**

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Geotehnika
Ispitivanje i opažanje u geotehnici**

**Magdalena Špoljarić
JMBAG:0114027942**

**Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti
pijeska
Determination of the water retention curve and coefficient of
permeability of sand**

Diplomski rad

Rijeka, veljača, 2021.

Naziv studija: Sveučilišni diplomski studij građevinarstva

Znanstveno područje/područja: Tehničke znanosti

Znanstveno polje/polja: Građevinarstvo

Znanstvena grana/grane: Geotehnika

Tema završnog rada

Određivanje krivulje retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska

Determination of the Water Retention Curve and Coefficient of Permeability of Sand

Kandidat: **MAGDALENA ŠPOLJARIĆ**

Kolegij: **ISPITIVANJE I OPAŽANJE U GEOTEHNICI**

Diplomski rad broj: _____

Zadatak:

Krivulja retencije vode predstavlja jedan od temeljnih konstitutivnih odnosa u mehanici nesaturiranih tala. Definirajući odnos između sukcije i sadržaja vode u tlu, poznavanje ovih nelinearnih funkcija neophodno je pri rješavanju problema procjeđivanja i distribucije vode u nesaturiranim tlima. Budući da se krivulje retencije vode mogu koristiti za procjenu drugih materijalnih značajki u nesaturiranim uvjetima, poput čvrstoće i propusnosti, njihovo poznavanje je od fundamentalnog značaja za implementaciju principa mehanike nesaturiranih tala u inženjerskoj praksi.

Diplomskim radom potrebno je odrediti krivulju retencije vode i koeficijenta propusnosti pijeska korištenjem raspoložive laboratorijske opreme, poput tenziometara i troosnih uređaja. Dobivene rezultate potrebno je usporediti s najčešće korištenim predikcijskim modelima.

Tema rada je uručena: _____

Komentor:

Josip Peranić, mag.ing.aedif.

Mentor:

Doc.dr.sc. Vedran Jagodnik

IZJAVA

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

Magdalena Špoljarić

U Rijeci, 23.veljače, 2021.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstveno istraživačkog projekta:
**Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima
statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS)**

Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Željko Arbanas
Šifra projekta IP-2018-01-1503
Financijer projekta Hrvatska zaklada za znanost
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 23.veljače, 2021.

Mentor:

Doc.dr.sc. Vedran Jagodnik

ZAHVALA

Zahvala Hrvatskoj zakladi za znanost koja je omogućila korištenje dijela opreme kroz projekt Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS)

Zahvaljujem se svom mentoru doc.dr.sc. Vedranu Jagodniku na pomoći, strpljenju, velikom razumijevanju i svom stručnom znanju koje mi je pružio tijekom izrade diplomskog rada, ali i tijekom studiranja.

Veliko hvala i komentoru dr.sc. Josipu Peraniću, koji mi je svojim prijateljskim pristupom pomogao sa svojim savjetima pri izradi diplomskog rada i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje brojne upite.

Neizmjernu zahvalnost ukazujem cijeloj svojoj obitelji i dečku na bezuvjetnoj ljubavi i podršci koju su mi pružili za vrijeme studiranja, a posebno majci koja me je uvijek bodrila i svojom ljubavlju poticala.

Svima koji su bili uz mene tokom studija od srca veliko hvala.

SAŽETAK

Krivulja retencije vode, WRC (*eng. Water Retention Curve*) ključna je materijalna funkcija za definiranje nesaturiranog ponašanja tla. U mnogim slučajevima može biti korisno imati procjenu WRC rano u projektu, kada su dostupni mali ili nikakvi rezultati ispitivanja. Predikcijski modeli koji se dobiju iz osnovnih značajki materijala, kao što je granulometrija, također mogu biti korisni za procjenu utjecaja promjenjivih parametara (npr. poroznost materijala, veličina čestica) na krivulju retencije vode. U ovom radu odrediti će se krivulja retencije vode i saturirani koeficijent propusnosti pijeska mjerenjima na tenziometrima, troosnom uređaju s dvostrukom ćelijom i troosnom uređaju za ispitivanje propusnosti. Ispitivani materijal se koristi u pokusima u sklopu znanstvenog-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja, ModLandRemSS“ (IP-2018-01-1503). Pokusi su provedeni u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Ključne riječi: krivulja retencije vode, koeficijent propusnosti, nesaturirano tlo, predikcija, mjerenja, poroznost, granulometrija

ABSTRACT

Water retention curve, WRC is a key material function in defining the unsaturated behavior of soils. It can be useful to have early estimations of WRC, especially when there are little or no test results available. Predictive models which are based on geotechnical properties of soils, can also be employed to evaluate how changing (e.g., porosity or grain size) affect the WRC. In this paper, water retention curve and saturated coefficient of permeability will be defined on the sand, using tensiometers, double wall triaxial cell and triaxial permeameter. Material used for experiments conducting is a part of scientific research project called "Physical modelling of landslide remediation constructions behavior under static and seismic actions (ModLandRemSS)" (IP-2018-01-1503). Experiments were conducted in the Geotechnical laboratory at the Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka.

Key words: water retention curve, coefficient of permeability, unsaturated soil, prediction models, sand

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	KRIVULJA RETENCIJE VODE.....	3
1.1.1	<i>Jednadžbe retencijskih krivulja vode</i>	9
1.1.2	<i>Predikcijski modeli za određivanje krivulje retencije vode</i>	12
1.2	SUKCIJA TLA.....	18
1.2.1	<i>Matrična sukcija</i>	21
1.2.2	<i>Površinska napetost</i>	23
1.2.3	<i>Kapilarni fenomen</i>	29
1.3	KOEFICIJENT PROPUSNOSTI TLA.....	30
1.3.1	<i>Određivanje koeficijenta propusnosti</i>	30
1.3.2	<i>Jednadžbe za procjenu koeficijenta propusnosti</i>	34
2	FAZNE RELACIJE I KOLIČINA VODE U TLU	36
2.1	ODREĐIVANJE KOLIČINE VODE U TLU.....	38
3	METODE ODREĐIVANJA KRIVULJE RETENCIJE VODE	40
3.1	METODA TRANSLATIRANIH OSI	40
3.1.1	<i>Troosna ćelija s dvostrukom stijenkom za ispitivanje nesaturiranih uzoraka</i>	44
3.2	TENZIOMETAR	48
3.3	POSTUPAK ISPITIVANJA	53
4	REZULTATI ODREĐIVANJA KRIVULJE RETENCIJE VODE	63
4.1	OSNOVNE ZNAČAJKE ISPITIVANOG PIJESKA.....	63
4.2	REZULTATI ODREĐIVANJA KRIVULJE RETENCIJE	64
4.3	REZULTATI MODELA ZA PROCJENU KRIVULJE RETENCIJE VODE	73
4.4	ODREĐIVANJE VAN GENUCHTENOVE JEDNADŽBE KRIVULJE RETENCIJE	77
4.5	REZULTATI MJERENJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI.....	78
5	ZAKLJUČAK	80
6	LITERATURA	82

POPIS SLIKA

SLIKA 1: SHEMATSKI PRIKAZ OKOLIŠA SA NESATURIRANOM ZONOM (LU I LIKOS)	2
SLIKA 2: KRIVULJA RETENCIJE VODE ZA PROCESE SUŠENJA I VLAŽENJA (FREDLUND ET AL., 2012B).....	4
SLIKA 3: KONCEPTUALNI DIJAGRAM UTJECAJA SREDNJE VELIČINE ČESTICA UJEDNAČENOG PIJESKA (A) I ŠIRINE RASPODJELE VELIČINE ČESTICA (B) NA OBLIK SWCC PIJESKA (BENSON ET AL., 2014B) 5	
SLIKA 4: POSTUPAK ODREĐIVANJA VRIJEDNOSTI ULASKA ZRAKA I REZIDUALNE VLAŽNOSTI TLA (ZHAI AND RAHARDJO, 2012B).....	6
SLIKA 5: HIOSTEREZNO PONAŠANJE KRIVULJA RETENCIJE VOZE ZA PROCESE SUŠENJA I VLAŽENJA (FREDLUND ET AL., 2012B).....	7
SLIKA 6: ILUSTRACIJE NESATURIRANE ZONE TLA: (A) REŽIMI VODE U PORAMA, (B) GRAFIČKI PRIKAZ SATURACIJE, TOTAL HEAD, PORNOG PRITISKA U ODNOSU NA DUBINU (LU AND LIKOS, 2004).....	8
SLIKA 7: PRIMJER RETENCIJSKE KRIVULJE VODE U OVISNOSTI VOLUMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE I SUKCIJE ZA PROCESE SUŠENJA I VLAŽENJA DOBIVENE VAN GENUCHTENOVOM JEDNADŽBOM; ψ_a , VRIJEDNOST SUKCIJE PRI ULASKU ZRAKA (ENG. AIR ENTRY SUCTION), ψ_w , VRIJEDNOST SUKCIJE PRI ULASKU VODE (WATER ENTRY SUCTION), θ_s SATURIRANI SADRŽAJ VODE (BENSON ET AL., 2014B).....	11
SLIKA 8: PREDIKCIJSKI MODELI ODREĐENI NA TEMELJU D_{60} I w_{PI} (ELLITHY, 2017).....	13
SLIKA 9: UTJECAJ D_{60} NA A ČISTOG I JEDNOLIKOG PIJESKA ($C_u = 1$) (A) I UTJECAJ RASPONA VELIČINE ČESTICA (ODNOSI SE NA C_u) NA A ČISTOG PIJESKA (B) (BENSON ET AL., 2014B)	16
SLIKA 10: UTJECAJ D_{60} NA N ČISTOG I JEDNOLIKOG PIJESKA ($C_u = 1$) (A) I UTJECAJ RASPONA VELIČINE ČESTICA (ODNOSI SE NA C_u) NA N ČISTOG PIJESKA (B) (BENSON ET AL., 2014B).....	16
SLIKA 11: SHEMATSKI PRIKAZ MATRIČNE I OSMOTSKE SUKCIJE U TLU (TOLL, 2016).....	21
SLIKA 12: KAPILARNI FENOMEN KAPILARNI FENOMEN (MURRAY AND SIVAKUMAR, 2010).....	22
SLIKA 13: KAPILARNI FENOMEN (SMITH, 2014)	24
SLIKA 14: RAZLIKA TLAKOVA NA GRANICI ZRAKA I VODE: (A) MJHURIĆ ZRAKA U VODI, PRITISAK ZRAKA JE VEĆI OD PRITISKA VODE, (B) KAPLJICE VODE U ZRAKU, PRITISAK ZRAKA MANJI JE OD PRITISKA VODE (LU AND LIKOS, 2004).....	26

SLIKA 15: POVRŠINSKA NAPETOST NA GRANICI ZRAKA I VODE: (A) INTERMOLEKULARNE KOHEZIJSKE SILE MEĐU MOLEKULAMA VODE U BLIZINI GRANICE, (B) KONCEPTUALNA RASPODJELA TLAKA S DUBINOM, (C) MODEL POVRŠINSKE NAPETOSTI KOJI PRIKAZUJE T_s KAO REZULTANTU NEURAVNOTEŽENIH INTERMOLEKULARNIH SILA KOJE DJELUJU NA GRANICI ZRAKA I VODE (LU AND LIKOS, 2004)	26
SLIKA 16: POVRŠINSKA NAPETOST (FREDLUND ET AL., 2012B).....	27
SLIKA 17: PRIKAZ KAPILARNOG PODIZANJA VODE U CIJEVIMA RAZLIČITOG POLUMJERA (LU AND LIKOS, 2004).....	30
SLIKA 18: ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI METODOM STALNE RAZLIKE HIDRAULIČKOG POTENCIJALA (VLASTA SZAVITS-NOSSAN, N.D.)	31
SLIKA 19: STRUKTURA TLA I FAZNI DIJAGRAM (SMITH, 2014)	36
SLIKA 20: (A) SUHO TLO, (B) SATURIRANO TLO, (C) NESATURIRANO TLO (SMITH, 2014).....	36
SLIKA 21: KAMEN S VISOKOM VRIJEDNOSTI ULASKA ZRAKA, HAEPS U TROOSNOM UREĐAJU S DVOSTRUKOM ČELIJOM (ISTRUZIONI, N.D.)	41
SLIKA 22: METODA TRANSLATIRANIH OSI (LU AND LIKOS, 2004).....	42
SLIKA 23: PRINCIP RADA HAEV POROZNOG KAMENA OPISAN KAPILARNIM MODELOM (FREDLUND ET AL., 2012B).....	43
SLIKA 24: SHEMATSKI PRIKAZ WF4170 I WF4171 DVOSTRUKIH ČELIJA TROOSNOG UREĐAJA.....	46
SLIKA 25: TROOSNI UREĐAJ S DVOSTRUKOM ČELIJOM (MECHANICAL ET AL., 2012)	47
SLIKA 26: POJEDNOSTAVLJENI DIZAJN TENZIOMETRA (“SOILMOISTURE – SOILMOISTURE’S BLOG,” N.D.).....	49
SLIKA 27: STANDARDNI T1 TIP TENZIOMETRA	50
SLIKA 28: TEROS 32 TENZIOMETAR.....	52
SLIKA 29: VANJSKO PUNJENJE CIJEVI TEROS 32 TENZIOMETRA.....	52
SLIKA 30: SHEMATSKI PRIKAZ ZA PRORAČUN PRITISKA U TOČKI B (FITTS, 2013).....	53
SLIKA 31: KOREKCIJA REZULTATA MJERENJA ZA 4kPA.....	
SLIKA 32: PRELIMINARNI POKUSI ZA ODREĐIVANJE ADSORPCIJSKE I DESORPCIJSKE GRANE KRIVULJE RETENCIJE STANDARDNIM T1 TENZIOMETRIMA	55
SLIKA 33: POJAVA SLOBODNE VODE NA UZORKU PIJESKA S UGRAĐENIM STANDARDNIM T1 TENZIOMETROM.....	56
SLIKA 34: UGRAĐENI TEROS 32 TENZIOMETAR U UZORAK	57

SLIKA 35: UZORAK S UGRAĐENIM STABDARDNIM T1 TENZIOMETROM (LIJEVO) I UZORAK S UGRAĐENIM TEROS 32 TENZIOMETROM (DESNO).....	58
SLIKA 36: DIGITALNI ZAPIS TEROS 32 TENZIOMETRA POKAZUJE KONTINUIRANO MJERENJE	58
SLIKA 37: DETALJ UGRAĐENOG UZORKA U TROOSNI UREĐAJ S DVOSTRUKOM ČELIJOM.....	59
SLIKA 38: PRIKAZ ČELIJE ZA VRIJEME MJERENJA KRIVULJE RETENCIJE.....	60
SLIKA 39: PODACI O MJERENIM VOLUMENIMA U FAZI MJERENJA POČETNE SUKCIJE U UZORKU ZA VLAŽNOST JEDNAKU VLAŽNOSTI PRI UGRADNJI $w = 5.2\%$	60
SLIKA 40: PODACI O MJERENIM PRITISCIMA U FAZI MJERENJA MATRIČNE SUKCIJE U UZORKU ZA VLAŽNOST JEDNAKU POČETNOJ VLAŽNOSTI PRI UGRADNJI $w = 5.2\%$	61
SLIKA 41: VRIJEME POTREBNO ZA OSTVARIVANJE RAVNOTEŽNIH UVJETA I KONSTANTNE VRIJEDNOSTI MATRIČNE SUKCIJE U TROOSNOM UREĐAJU S DVOSTRUKOM ČELIJOM.....	62
SLIKA 42: GRANULOMETRIJSKA KRIVULJA PIJESKA	64
SLIKA 43: REZULTATI PRELIMINARNIH MJERENJA STANDARDNIM T1 TENZIOMETROM, $Dr = 50\%$, $S = 50\%$	65
SLIKA 44: REZULTATI PRELIMINARNIH MJERENJA STANDARDNIM T1 TENZIOMETROM, $Dr = 50\%$, $S = 70\%$	65
SLIKA 45: OVSINOST STUPNJA SATURACIJE, S O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 30\%$	67
SLIKA 46: OVSINOST VOLUMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, θ O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 30\%$	68
SLIKA 47: OVSINOST GRAVIMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, w O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 30\%$	68
SLIKA 48: OVSINOST STUPNJA SATURACIJE, S O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 50\%$	69
SLIKA 49: OVSINOST VOLUMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, θ O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 50\%$	70
SLIKA 50: OVSINOST GRAVIMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, w O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 50\%$	70
SLIKA 51: OVSINOST STUPNJA SATURACIJE, S O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 80\%$	71
SLIKA 52: OVISNOST VOLUMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, θ O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 80\%$	72

SLIKA 53: OVSINOST GRAVIMETRIJSKOG SADRŽAJA VODE, w O MATRIČNOJ SUKCIJI ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 80\%$	72
SLIKA 54: PRIKAZ PROMJENE VLAŽNOSTI PO DUBINI UZORAKA.....	73
SLIKA 55: MODEL I ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr(30\%)$	74
SLIKA 56: MJERENI PODACI ZA $Dr(30\%)$ U USPOREDBI S MODELIMA ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE	74
SLIKA 57: MODEL I ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr(50\%)$	75
SLIKA 58: MJERENI PODACI ZA $Dr(50\%)$ U USPOREDBI S MODELIMA ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE	75
SLIKA 59: MODEL I ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE ZA STUPANJ ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr(80\%)$	76
SLIKA 60: MJERENI PODACI ZA $Dr(80\%)$ U USPOREDBI S MODELIMA ZA PREDIKCIJU KRIVULJE RETENCIJE VODE	76
SLIKA 61: KRIVULJA RETENCIJE VODE ZA STUPENJE ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 30\%$, $Dr = 50\%$, $Dr = 80\%$	77
SLIKA 62: MODEL I OPISANI JEDNADŽBAMA ZA PREDIKCIJU KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI MATERIJALA.....	79
SLIKA 63: IZMJERENI KOEFICIJETI PROPUSNOSTI ZA RELATIVNE ZBIJENOSTI MATERIJALA $Dr = 30\%$, $Dr = 50\%$ I $Dr = 80\%$	79

POPIS TABELA

TABELA 1: RASPON VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI ZA RAZLIČITU VRSTU MATERIJALA (VLASTA SZAVITS-NOSSAN, N.D.)	34
TABELA 2: PROMJERI UZORAKA KOJI SE MOGU UGRADITI U DVOSTRUKE ĆELIJE TROSONOG UREĐAJA ("DOUBLE WALL TRIAXIAL CELLS FOR UNSATURATED TESTS, SOIL MECHANICS TESTING EQUIPMENT, CONTROLS," N.D.)	45
TABELA 3: TEHNIČKE SPECIFIKACIJE DVOSTRUJE ĆELIJE TROSONOG UREĐAJA ("DOUBLE WALL TRIAXIAL CELLS FOR UNSATURATED TESTS, SOIL MECHANICS TESTING EQUIPMENT, CONTROLS," N.D.)...	47
TABELA 4: OSNOVNE ZNAČAJKE T1 TENZIOMETRA	51
TABELA 5: OSNOVNE ZNAČAJKE TEROS 32 TENZIOMETRA	52
TABELA 6: OSNOVNE ZNAČAJKE ISPITIVANOG MATERIJALA:.....	63
TABELA 7: IZMJERENI PODACI STANDARDNOM T1 TENZIOMETRU, TEROS 32 TENZIOMETRU I DCTx-U:	66
TABELA 8: VAN GENUCHTENOVI PARAMETRI DOBIVENI NELINEARNOM REGRESIJOM.....	77
TABELA 9: VRIJEDNOSTI DOBIVENIH KOEFICIJENTA PROCJEDIVANJA, k_s (CM/S).....	78

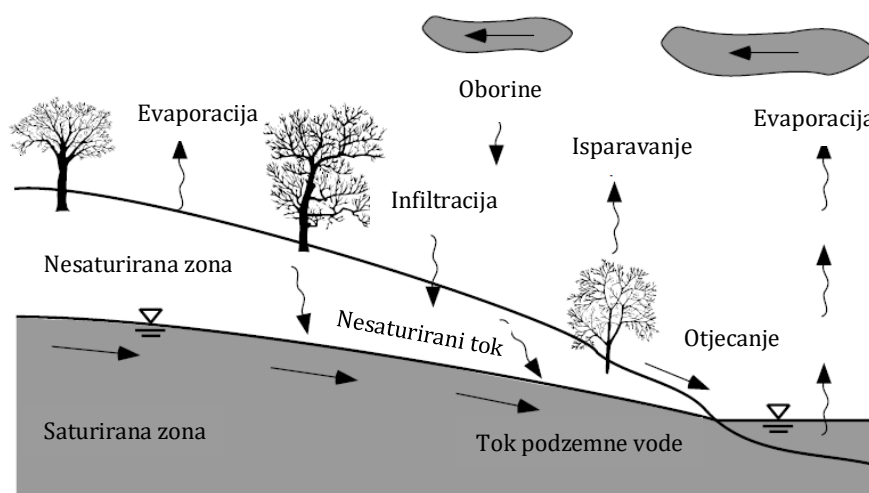
1 UVOD

Djelomično saturirana, odnosno nesaturirana tla, su tla čije su šupljine dijelom ispunjene vodom, a dijelom zrakom. Nesaturirano tlo se sastoji od tri faze, čvrste faze (odnosno čestica tla), tekuće faze (najčešće voda) i plinovite faze (zrak). Plinovita faza je općenito ograničena dijelom prostora u porama koji ne zauzima tekućina. Čvrsta faza sastoji se od zrna tla ili čestica i može se kretati od relativno sitnozrnatih materijala poput praha i gline, preko organskog materijala, do krupnozrnatih materijala poput pijeska ili šljunka. Mnogo svojstava, poput površinske napetosti vode, jedinstvena su ne samo za fazu koju opisuju, već imaju i važnu ulogu u upravljanju interakcijama između različitih faza (Lu and Likos, 2004).

Međutim, ispravnije je prepoznati i četvrtu fazu koju čini interakcija zraka i vode, odnosno "kontraktilna opna" (*eng. contractile skin*), koja djeluje poput tanke opne protkane kroz praznine tla, tvoreći time fiksnu pregradu između zraka i vode. Drugim riječima, kontraktilna opna djeluje poput elastične membrane koja istvremeno vuče čestice tla bliže jedne drugima dok se voda uklanja iz strukture tla. Prisutnost i najmanje količine slobodnog zraka, tlo čini nesaturiranim. Ukoliko se zrak pojavljuje u obliku zarobljenih mjehurića u tekućinama učiniti će da se one doimaju kompresibilnim. Promjene stanja naprezanja na kontraktilnoj opni mogu dovesti do promjene sadržaja vode, promjene volumena i promjene posmične čvrstoće. Upravo kontraktilna opna kao barijera između zraka i vode određuje omjer volumena zraka i volumena vode u šupljinama tj stupanj saturacije. Fizička svojstva kontraktilne opne utječu na ponašanje strukture tla. Kontraktilna opna može se smatrati dijelom vodene faze pri razmatranju promjene volumetrijskih i masenih svojstava tla, međutim mora se smatrati zasebnom fazom pri opisivanju stanja naprezanja nesaturiranog tla. Pri rješavanju praktičnih problema, uobičajeno se uzima da su čestice tla i voda nestlačivi, dok se zrak smatra stišljivim medijem, to jest, njegov se volumen smanjuje kada se pritisak povećava. Zbog ove osobitosti, ponašanje nesaturiranih tala može se bitno razlikovati u odnosu na ponašanje saturiranih tala. Krivulja retencije vode definira odnos između sadržaja vode u tlu i sukucije, te stoga ima presudnu ulogu pri određivanju hidrauličkih svojstava tla i

povezanih mehaničkih svojstava (Wang et al., 2017). U prirodnom stanju, tla su podvrgnuta vremenskim i prostornim promjenama sadržaja vode.

Klima igra važnu ulogu u stvaranju nesaturiranih tala s isparavanjem po vrućem vremenu, što dovodi do isušivanja tla te skupljanja sitnozrnastih tala i, u konačnici, do pucanja i skupljanja. Buduće klimatske promjene zbog globalnog zagrijavanja potencijalno bi mogle uzrokovati značajne promjene u režimu vlažnosti tla, a time i u uvjetima tla na velikim dijelovima svijeta. Preuzimanje vode kroz vegetaciju također može dovesti do značajne desaturacije tla uslijed evapotranspiracije, dok uklanjanje vegetacije može dovesti do naknadnog ponovnog saturiranja što dovodi do potencijalnih problema sa stabilnošću, posebno nestabilnosti obronaka uslijed krčenja šuma (Murray and Sivakumar, 2010). Oborine, isparavanje i evapotranspiracija važni su prirodni okolišni mehanizmi koji djeluju na dubinu i opseg nesaturirane zone (Fredlund et al., 2012a). Na slici 1 je prikazan shematski dijagram okoliša s nesaturiranom zonom tla i njegove uloge u prirodnom hidrološkom ciklusu.



Slika 1: Shematski prikaz okoliša sa nesaturiranom zonom (Lu i Likos)

Tlak vode u porama negativan je u odnosu na tlak zraka u porama. Tla blizu površine terena, a koja se nalaze iznad razine podzemne vode, izložna su uvjetima negativnih pritisaka vode u porama i mogućoj redukciji stupnja saturacije (Fredlund et al., 2012b). Većina slučajeva s kojima se susrećemo u geotehničkoj inženjerskoj praksi

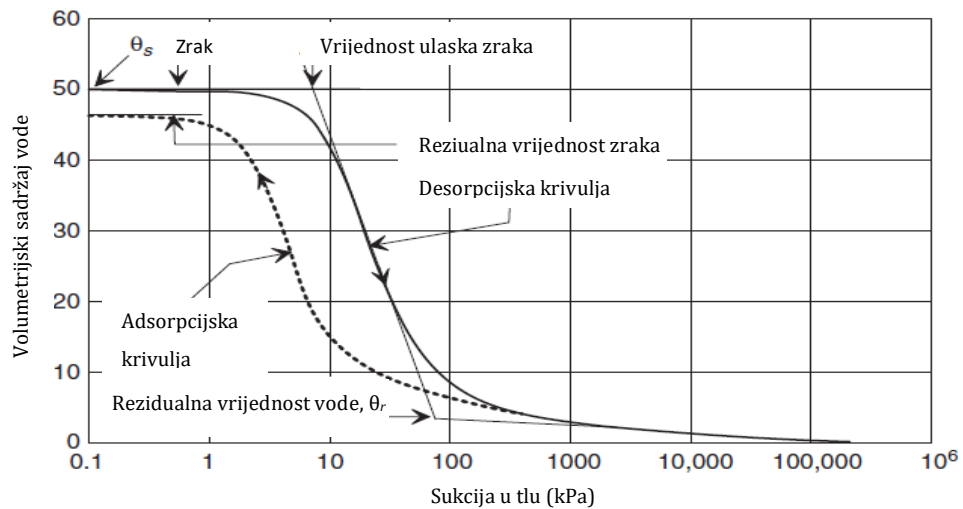
uključuju nesaturirana tla. Tradicionalni pristup analizi i projektiranju pretpostavljao je ograničavajuće uvjete koji pretpostavljaju postojanje potpuno suhих ili potpuno saturiranih uvjeta u tlu. Primarni razlog za ovu pretpostavku je da je mjerenje svojstava i opis ponašanja tla koje sadrži samo jednu tekuću fazu (tj. zrak ili vodu) znatno lakše nego u slučaju kada tlo sadrži dvije tekuće faze. Tumačenje ponašanja nesaturiranih tla zahtijeva da se uzmu u obzir razlike u tlakovima zraka i vode, fazne kompresibilnosti i njihove interakcije, kao i kemijski učinci. Primjerice, svako tlo blizu površine terena može biti izloženo relativno suhom okruženju, zbog čega se razvija negativan tlak vode u porama (tlak vode u porama niži je u odnosu na atmosferski tlak zraka), što dovodi do desaturacije odnosno ulaska zraka u pore. Iako tlo može biti saturirano do određene visine iznad razine podzemne vode, ako tlak vode u porama dovoljno padne, stupanj saturacije pasti će ispod jedinične vrijednosti i zrak će ući u pore. Na slici 2 prikazano je da se negativni tlak vode u porama (*eng. soil suction*) smanjuje prema površini terena.

Nesaturirana zona u tlu odnosi se na sloj između površine terena i razine podzemne vode, iako se kapilarni sloj dizanja iznad razine podzemne vode u suštini smatra saturiranim. U geotehničkom inženjerstvu, postoji uvriježeno pravilo da se zonu povrgnutu negativnom pornom pritisku definira kao nestaturiranu, odnosno kao prijelaznu zonu između vode pri atmosferskom pritisku i podzemne vode. Porni pritisak u nesaturiranoj zoni tla može varirati od nule na razini podzemne vode do maksimalnog naprežanja od približno 1,000,000 kPa pri suhim uvjetima. Također, stupanj saturacije može varirati od sto posto (100%) do nule. Različiti stupanj saturacije utječe na promjenu sukucije u tlu. Zone saturacije mogu biti definirane in situ i u laboratoriju uz pomoć krivulja retencije vode. Stupanj saturacije pri in situ uvjetima smanjuje se prema površini terena. Materijal tla na površini terena često se naziva problematičnim, razlog tome je pojava visoko negativnog pornog pritiska.

1.1 Krivulja retencije vode

Krivulje retencije vode, (*eng. Water Retention Curve, WRC*) koriste se kao ključna informacija o tlu potrebna za analizu problema procjeđivanja, stabilnosti i promjene volumena koji uključuju nesaturirana tla. Histereza je važna značajka krivulja retencije

vode. Kao što je prikazano na slici 2, tlo sadrži različitu količinu vode ovisno o tome dolazi li do sušenja tla (desorpcija) ili vlaženja (adsorpcija).



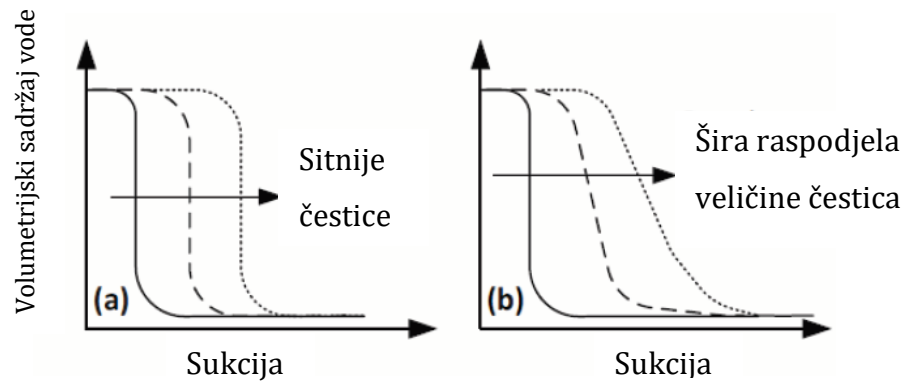
Slika 2: Krivulja retencije vode za procese sušenja i vlaženja

(Fredlund et al., 2012b)

Na slici 2 prikazane su tri glavne značajke koje definiraju oblik SWCC-a:

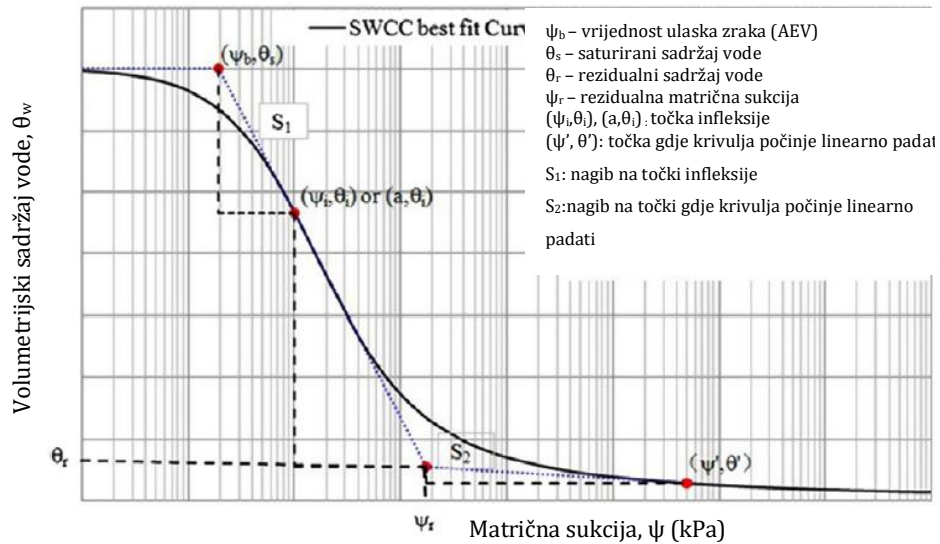
- Vrijednost ulaza zraka, AEV (*eng. Air Entry Value*), što odgovara onoj vrijednosti sukucije, odnosno vrijednosti matrične sukucije gdje zrak počinje istiskivati vodu iz najvećih pora u tlu. Na AEV utječe raspodjela veličine pora unutar strukture tla. Tla s velikim, uniformnim porama, poput pijeska, imaju relativno nizak AEV, jer se voda može lako ukloniti pod relativno malim vrijednostima sukucije. Vrijednost ulaska zraka, AEV, može se opisati i kao matrična sukucija koja razbija kapilarna opna nastala površinskom napetošću vode u najvećim porama tla (Zhai and Rahardjo, 2012a).
- Rezidualni sadržaj vode (θ_r), je volumetrijski sadržaj vode u tlu gdje daljnje povećanje sukucije ne dovodi do značajnih promjena u sadržaju vode. Drugim riječima, dolazi do promjene brzine kojom se voda može izvući iz tla.
- Nagib kvazilinearnog dijela krivulje predstavlja brzinu kojom se volumen vode pohranjen u tlu mijenja sa sukucijom, u rasponu vrijednosti od AEV do vrijednosti koja odgovara rezidualnom sadržaju vode. Uniformnost pora u pjeskovitim tlima uzrokuje dreniranje svih pora u malom rasponu sukucije, što čini nagib WRC strmijim nego u tlima s finijim česticama (Ellithy, 2017).

Benson i sur., zaključili su da za kod krivulje sušenja za uniformne pijeske, kako čestice postaju sitnije, AEV se povećava, a nagib krivulje se lagano smanjuje. Povećanjem raspona veličine čestica, koje se kvantificira povećanjem koeficijenta jednolikosti, ($C_c = \frac{D_{60}}{D_{10}}$), također se povećava AEV i smanjuje nagib WRC krivulje (Benson et al., 2014a).



Slika 3: Konceptualni dijagram utjecaja srednje veličine čestica ujednačenog pijeska (a) i širine raspodjele veličine čestica (b) na oblik SWCC pijeska (Benson et al., 2014b)

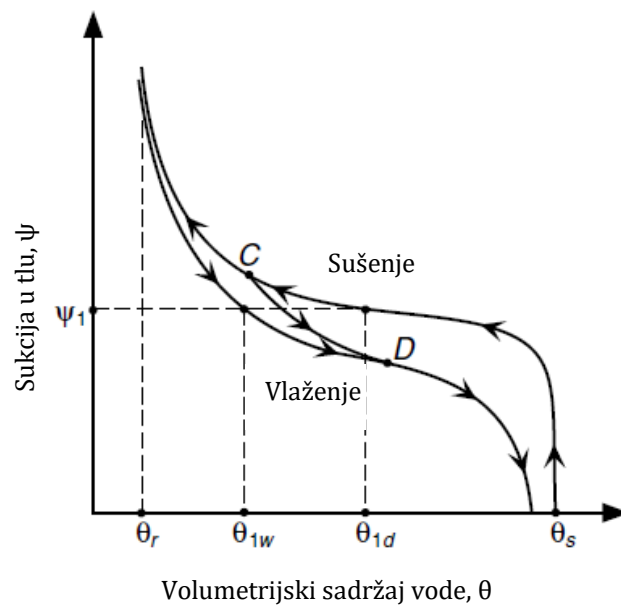
Modeli razvijeni za procjenu retencijskih značajki imaju parametre koji uglavnom odgovaraju navedenim trima značajkama krivulje retencije vode (Ellithy, 2017). Jedan od načina određivanja vrijednosti ulaska zraka i rezidualnog sadržaja vode u tlu, prikazan je na slici 4. Prvo, tangenta linija provuče se kroz točku inflekcije krivulje, zatim se povuče vodoravna linija kroz početnu točku, dok se druga tangenta linija povuče kroz točku gdje krivulja poprima linearni oblik u području visokih vrijednosti sukucije. Konačno, presjeci tih tangentskih linija označavaju AEV i rezidualno stanje (Zhai and Rahardjo, 2012a).



Slika 4: Postupak određivanja vrijednosti ulaska zraka i rezidualne vlažnosti tla (Zhai and Rahardjo, 2012b)

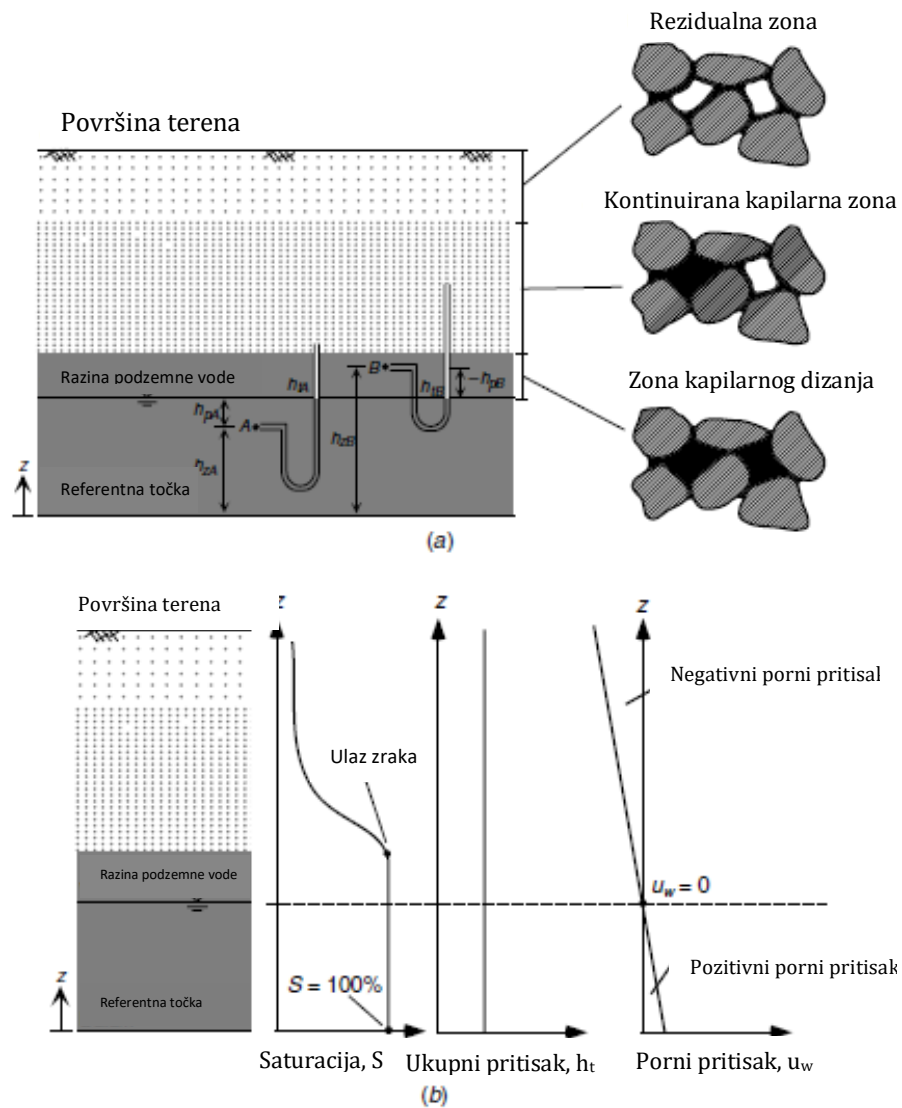
Krivulje retencije vode pokazale su se kao interpretativni model koji koristi osnovni kapilarni model kako bi pružio razumijevanje raspodjele vode u porama. Klasifikacija tla može dati određene informacije o vrijednosti ulaza zraka i o ostalim rezidualnim uvjetima. Pretpostavljeni oblik retencijske krivulje pojedinog materijala može se odrediti pomoću osnovnih klasifikacijskih značajki. Krivulje retencije vode se mogu koristiti za procjenu in situ sukcijske tla, ali korisnik mora razumjeti razinu točnosti povezanom s korištenjem krivulja i vjerojatni raspon vrijednosti sukcijske tla u odnosu na izmjereni prirodni sadržaj vode u tlu. Pri korištenju retencijskih krivulja za procjenu in situ vrijednosti sukcijske, mora se uzeti u obzir histereza povezana s procesima sušenja i vlaženja (Fredlund et al., 2012a). Mjerenje funkcija nesaturiranih svojstava tla, kao što su krivulja retencije vode, funkcija nesaturirane provodljivosti, ili funkcija zavisnost čvrstoće od vlažnosti (ili sukcijske) tla, postaje neprihvatljivo skupo za rutinske geotehničke inženjerske svrhe. Uslijed toga, javlja se potreba za praktičnim rješenjima. Upravo su se retencijske krivulje pokazale kao dovoljno točan alat za procjenu nesaturiranih svojstava tla za većinu geotehničkih problema. One daju primarne informacije o tlu potrebne za provođenje analiza procjeđivanja vode kroz nesaturirano tlo, određivanja posmične čvrstoće ili promjene volumena nesaturiranog tla, protoka zraka i topline u nesaturiranim tlima itd. Funkcija propusnosti i funkcija skladištenja vode nesaturiranog tla izravno su povezane s retencijskim krivuljama. Pritom je kod

procjene nesaturiranih funkcija tla važno koristiti odgovarajući oblik krivulje retencije vode. Tlo tijekom procesa sušenja obično zadržava više vode nego što ga adsorbira tlo za istu vrijednost sukucije tijekom postupka vlaženja (slika 5).



Slika 5: Histerežno ponašanje krivulja retencije voze za procese sušenja i vlaženja (Fredlund et al., 2012b)

Horizontalna linija na nekoj vrijednosti sukucije ψ_1 presijeca krivulje kod različitih sadržaja vode duž krivulje vlaženja θ_{1w} i duž krivulje sušenja θ_{1d} , pri čemu vrijedi $\theta_{1d} > \theta_{1w}$. Slika 5 također ilustrira da se tijekom procesa vlaženja možda neće postići potpuno zasićenje zbog mjehurića zraka koji ostaju zarobljeni u tlu. Dominantan utjecaj na opći oblik krivulje retencije vode imaju svojstva materijala, uključujući raspodjelu veličina pora, raspodjelu zrna, gustoću, sadržaj organskog materijala, sadržaj gline i mineralogija. Razumijevanje retencijskih značajki tla i odnosa s fizičkim svojstvima tla, kritična je komponenta mehanike nesaturiranih tala (Lu and Likos, 2004). Sadržaj vode obično se izražava kao gravimetrijski sadržaj. Alternativno se može izraziti preko stupnja saturacije ili volumetrijskog sadržaja vode (Elkady et al., 2013).



Slika 6: Ilustracije nesaturirane zone tla: (a) režimi vode u porama, (b) grafički prikaz saturacije, ukupnog pritiska, pornog pritiska u odnosu na dubinu (Lu and Likos, 2004)

Zona neposredno iznad razine podzemne vode naziva se kapilarna zona i u suštini se smatra saturiranom ukoliko je porni pritisak negativan u odnosu na fazu zraka. Principi i koncepti za opisivanje ponašanja nesaturiranog tla postaju nužni kad se pritisak zraka i porni pritisak počnu značajno razlikovati. Može se reći da nesaturirano tlo ima dvije faze koje teku pod utjecajem gradijenta naprezanja (tj. zrak i voda) i dvije faze koje dolaze u ravnotežni položaj pod utjecajem gradijenta naprezanja (tj. strukturni raspored čestica tla i kontraktilne opne koja stvara pregradu između tekućih faza) (Fredlund et al., 2012b). Prisutnost površinske napetosti na granici između zraka i vode omogućava postojanje različitih pritisaka unutar zraka i vode. U nesaturiranim

uvjetima na terenu, pritisak zraka u porama obično je jednak atmosferskom pritisku, a pritisak vode u tlu je niži od atmosferskog. Obzirom da za atmosferski pritisak usvajamo da je jednak nuli, tada je pritisak vode u porama negativan. Taj negativni pritisak nazivamo sukcijski, jer ako se tlo stavi u dodir s vodom, pod atmosferskim uvjetima, tlo će „usisavati“ vodu. Problemi u mjerenju tlaka zraka u troosnim sustavima zbog stišljivosti zraka u uzorku doveli su do toga da su uzorci tla saturirani na početku ispitivanja. Time je omogućeno mjerenje brze i točne reakcije tlaka u porama.

Dva najveća problema kod laboratorijskih mjerenja nesaturiranim uvjetima su pojava kavitacije uslijed negativnih vrijednosti pornih pritisaka i mjerenje promjene volumena uzorka zbog kompresibilnosti zraka u porama. Ukupna vrijednost sukcijski tla ima dvije komponente: osmotsku i matričnu sukciju. Osmotska sukcija povezana je s potencijalom otopljene vode i obično se zanemaruje u nesaturiranoj mehanici tla. Matrična sukcija predstavlja napetost tekućine koja nastaje interakcijom vode u tlu i matrice tla i definira se kao razlika tlaka između vode u tlu i okolnog plina (zraka). Sukcija u tlu utječe na mehaničko ponašanje nesaturiranih tala, uključujući posmičnu čvrstoću i značajke deformabilnosti.

1.1.1 Jednadžbe retencijskih krivulja vode

Eksperimentalne tehnike za izravno mjerenje retencijskih krivulja vode daju niz diskretnih podataka koji sadrže odnos između sukcijski tla i sadržaja vode. Naknadna primjena ovih mjerenja za predviđanje pojava protoka, naprezanja i deformacija, obično zahtijeva da se izmjerene krivulje retencije opisuju u kontinuiranom matematičkom obliku. Predložen je velik broj empirijskih jednadžbi zatvorenog oblika koji najbolje odgovaraju laboratorijskim podacima krivulja retencije vode. Ove jednadžbe mogu se općenito klasificirati kao dvoparametarske i troparametarske retencijske jednadžbe. Svaka od ovih jednadžbi može se prilagoditi laboratorijskim podacima korištenjem metode regresijske analize (Fredlund i Xing, 1994). Jednadžbe najčešće imaju jednu varijablu koja se odnosi na vrijednost ulaska zraka u tlo, AEV i drugu varijablu koja je povezana s brzinom desaturacije tla. Svaka od retencijskih jednadžbi odgovara krivulji sušenja (desorpcije) i/ili krivulji vlaženja (adsorpcije). Primjeri nekih od empirijskih

jednadžbi koje se koriste: Gardner (1958), Brooks and Corey (1964), Farrel and Larson (1972), van Genuchten (1980), Williams et al. (1983) i Fredlund and Xing (1994).

Predloženi su brojni pristupi za matematički prikaz ili predviđanje retencijske krivulje vode. U nastavku su opisana dva modela koja su najčešće primjenjuju u geotehničkom inženjerstvu: van Genuchten-ov model (1980.) i Fredlund&Xing model (1994).

Van Genuchten (1980) je predložio „glatku“ troparametarsku jednadžbu krivulje retencije vode zatvorenog oblika i prikazana je izrazom (1):

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

gdje je,

α parametar tla ovisan o vrijednosti ulaska zraka, AEV

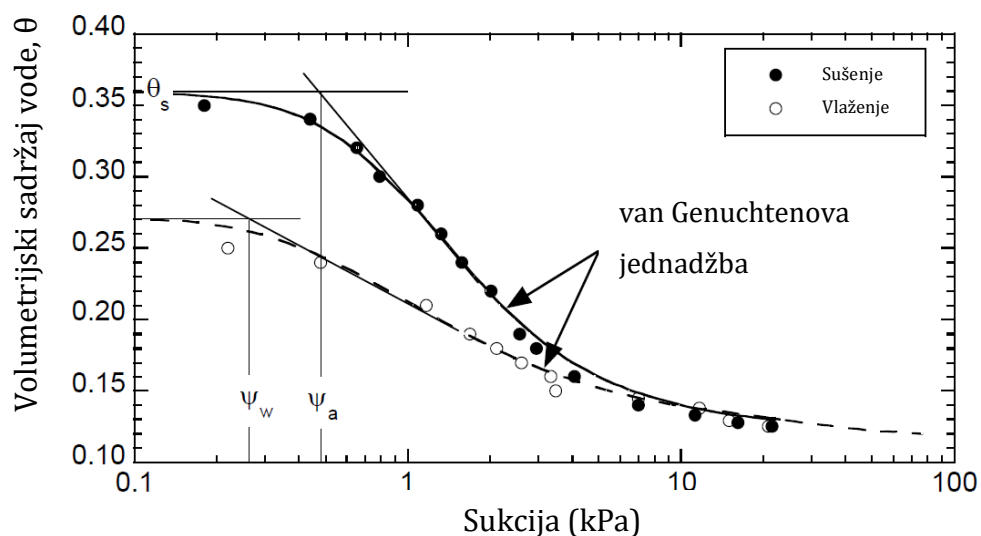
n opisuje nagib karakteristične krivulje,

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

θ_s saturirani sadržaj vode

θ_r rezidualni sadržaj vode

Parametar α , obrnuto je proporcionalan vrijednosti AEV: kod uniformnih pijesaka α se smanjuje kako se vrijednost sukcije na mjestu ulaska zraka povećava, a vrijedi za krivulju sušenja. Kako čestice tla postaju sve sitnije, smanjuje se i strmina krivulje, odnosno smanjuje se i vrijednost parametra n (Benson et al., 2014b). Parametri α , n i m im općenito se dobivaju nelinearnom regresijom iz mjerenih podataka, kao što je prikazano na slici 7.



Slika 7: Primjer retencijske krivulje vode u ovisnosti volumetrijskog sadržaja vode i sukcije za procese sušenja i vlaženja dobivene van Genuchtenovom jednađbom; ψ_a , vrijednost sukcije pri ulasku zraka (*eng. air entry suction*), ψ_w , vrijednost sukcije pri ulasku vode (*water entry suction*), θ_s saturirani sadržaj vode (Benson et al., 2014b)

Fredlund i Xing (1994.) razvijaju model zasnovan na razmatranju raspodjele veličina pora u obliku sličnom van Genuchtenovom modelu:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

gdje su:

α , n i m konstante retencijskekrivulje,

e Eulerov broj,

$C(\psi)$ korekcijski faktor za područje visoke vrijednosti sukcija koji je definiran izrazom (28):

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1,000,000}{\psi_r} \right)} \right] \quad (3)$$

ψ_r konstanta vezana za vrijednost sukcije pri rezidualnom sadržaju vode θ_r

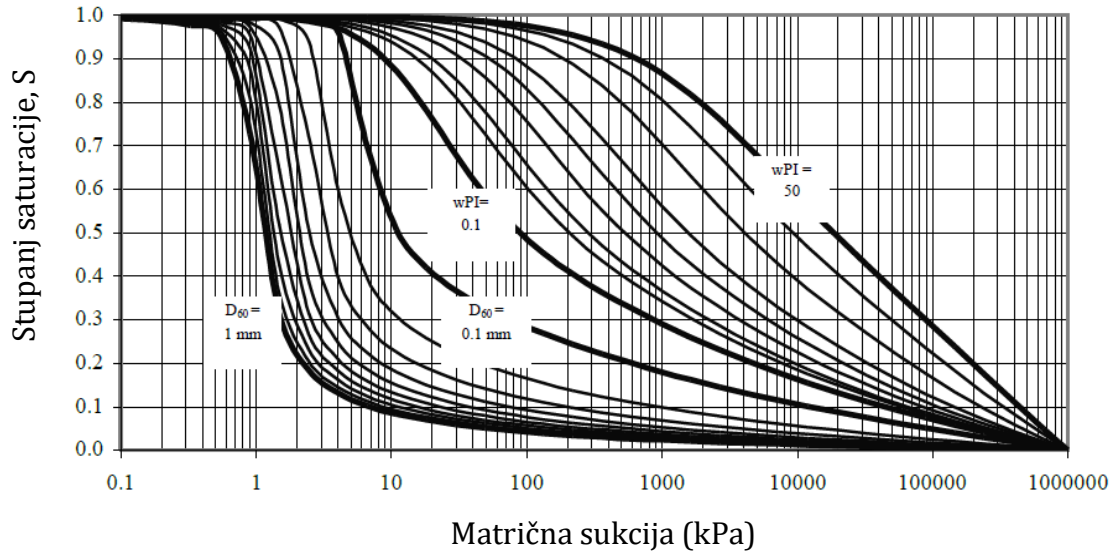
1.1.2 Predikcijski modeli za određivanje krivulje retencije vode

Izravna mjerenja krivulja retencije vode i dalje su relativno zahtjevan, dugotrajan (ovisno o vrsti materijala pokusi mogu trajati od nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci) i često skup posao. Zbog troškova i složenosti povezanih s uzorkovanjem, transportom i pripremom laboratorijskih uzoraka ili instaliranjem, održavanjem i praćenjem terenskih instrumenata, broj mjerenja dobivenih za određeno mjesto je premalen da bi se adekvatno prikazala prostorna varijabilnost svojstava tla i uvjeti naprezanja na terenu. Dostupna mjerenja često obuhvaćaju samo mali dio krivulje retencije vode, najčešće u rasponu vlažnosti koje su od interesa za praktičnu primjenu. Iz svih ovih razloga poželjne su alternative izravnim mjerenjima – metode procjene retencijskih krivulja (Lu and Likos, 2004).

Krivulje retencije vode se mogu mjeriti u laboratoriju, međutim zbog cijene, vremena i velike varijabilnosti rezultata, empirijske jednadžbe razvijene su korištenjem pristupa višestruke regresije na bazama podataka koje se sastoje od velikog broja izmjerenih krivulja retencije (Ellithy, 2017). Empirijski odnosi koji se temelje na granulometriji, najčešće su metode za procjenu retencijskih krivulja vode. U nastavku su opisani neki od najčešće korištenih modela za procjenu parametara jednadžbi krivulja retencije vode.

- **Model 1: Zapata et al. (2000)**

Zapata je 1999. u svojoj disertaciji pod naslovom: "Nesigurnost u karakterističnoj krivulji tla i vode i utjecaji na predikcije nesaturirane posmične čvrstoće" predstavila predikcijski model izveden iz regresijske analize na skupu od 190 laboratorijskih ispitivanja. Predstavila je dva skupa parametara: jedan set za plastična tla i drugi set za neplastična tla ($IP=0$). Rezultirajući model odgovarao je jednadžbi Fredlund&Xing, (1994) i prikazan je na slici 8.



Slika 8: Predikcijski modeli određeni na temelju D_{60} i wPI
(Ellithy, 2017)

Za krupnozrnasta tla s indeksom plastičnosti jednakim nuli, parametar koji se koristi za povezivanje granulometrijske krivulje s retencijskom jednažbom je veličina promjera zrna za 60 posto prolaza (D_{60}). Pronađene korelacije su sljedeće:

$$a = 0.8627 \cdot (D_{60})^{-0.751} \quad (4)$$

$$b = 7.5 \quad (5)$$

$$c = 0.1772 \cdot \ln(D_{60}) + 0.7734 \quad (6)$$

$$\frac{h_r}{a} = \frac{1}{D_{60} + 9.7 \cdot e^{-4}} \quad (7)$$

gdje su a , b i c parametri Fredlund&Xing jednažbe

- **Model 2: Perera et al. (2005)**

Perera i sur. (2005.) proširili su rad Zapate i sur. (2000b) i koristili višestruku regresiju i jednadžbu Fredlund&Xinga (1994) s bazom podataka o 154 neplastična i 63 plastična tla. Izvođenje jednadžbi retencije temelji se na granulometriji krupnozrnastih tala i indeksu plastičnosti sitnozrnastih tala. Dobiveni rezultati ispitivanja kombinirani su s postojećom bazom podataka koju je Zapata sastavila 1999. godine. Postupak se sastoji od nekoliko koraka kako je opisano u nastavku.

Iz granulometrijske krivulje svakog tla tabelirane su vrijednosti promjera za određeni postotak prolaza ($D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}, D_{90}$) izraženi u milimetrima i vrijednosti postotka sitnih čestica, P_{200} izražene u decimalama. Izrazi (8) do (20) opisuju parametre Fredlund&Xing (1994) jednadžbe za neplastična tla (Perera et al., 2005):

$$a_f = 1.14 \cdot a - 0.5 \quad (8)$$

$$a = -2.79 - 14.1 \log(D_{20}) - 1.9 \cdot 10^{-6} P_{200}^{4.34} + 7 \log(D_{30}) + 0.055 D_{100} \quad (9)$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]} \quad (10)$$

$$m_1 = \frac{30}{[\log(D_{90}) - \log(D_{60})]} \quad (11)$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]} \quad (12)$$

$$m_1 = \frac{30}{[\log(D_{90}) - \log(D_{60})]} \quad (13)$$

$$b_f = 0.936b - 3.8 \quad (14)$$

$$b = \{5.39 - 0.29 \ln \left[P_{200} \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0.57} + 0.021P_{200}^{1.19} \} m_1^{0.1} \quad (15)$$

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{m_2} + \log(D_{30}) \right]} \quad (16)$$

$$m_2 = \frac{20}{[\log(D_{30}) - \log(D_{10})]} \quad (17)$$

$$c_f = 0.26e^{0.758c} + 1.4D_{10} \quad (18)$$

$$c = \log m_2^{1.15} - \left(1 - \frac{1}{b_f} \right) \quad (19)$$

$$h_{rf} = 100 \quad (20)$$

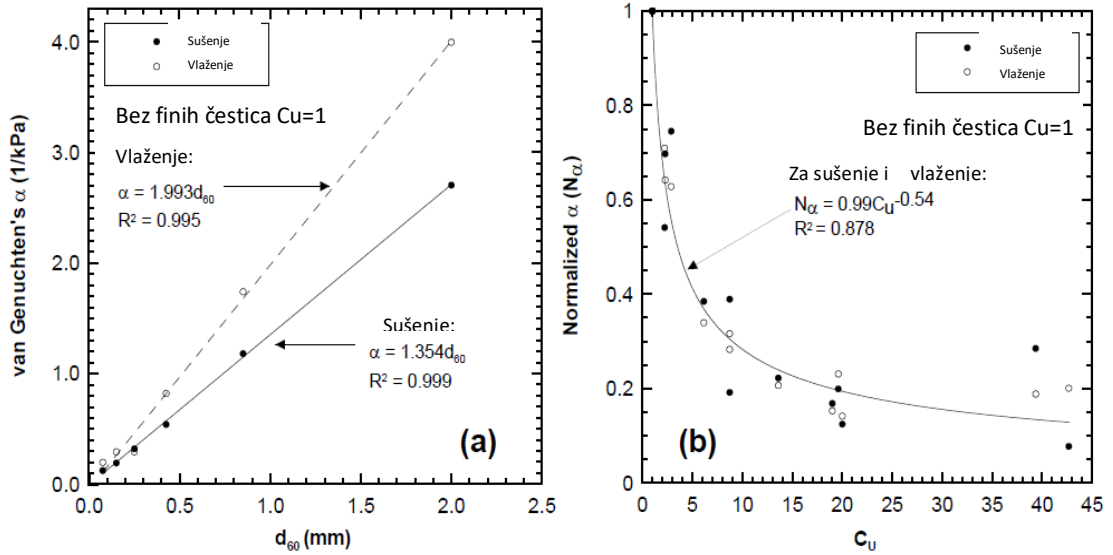
gdje je,

P_{200} postotak sitnozrnatog materijala (%)

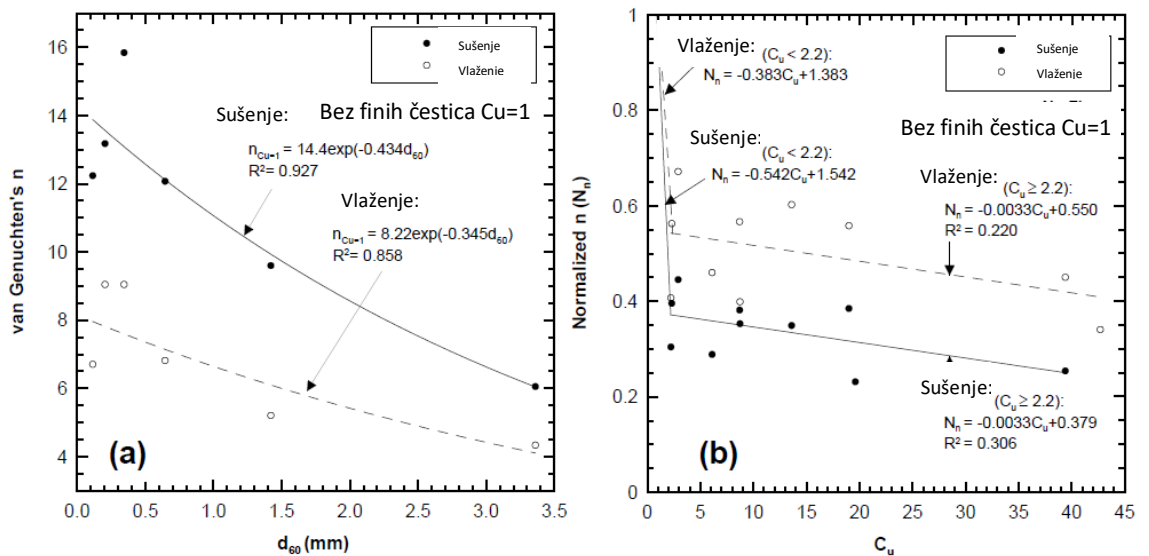
- **Model 3: Benson et al. (2014)**

Benson i sur. (2014) proučavali su učinak srednje veličine zrna i uniformnosti veličina čestica (dobro graduirane u odnosu na slabo graduirane) u čistom pijesku na krivulje retencije vode i van Genuchtenove parametre α i n . Pri sušenju jednoličnog pijeska, vrijednost ulaska zraka, AEV se povećava s udjelom sitnih čestica, dok se nagib krivulje

blago smanjuje (Ellithy, 2017). Ova metoda opisuje procjenu van Genuchtenovih parametara α i n za čisti pijesak. Metoda je intuitivna, jednostavna i brza, a oslanja se samo na podatke koji se obično navode za analizu veličine čestica (D_{60} i koeficijent jednolikosti, C_u). Regresijske linije na slikama 9 i 10 korištene su pri izvedbi modela za procjenu parametara α i n kod čistih pijesaka (Benson et al., 2014b):



Slika 9: Utjecaj D_{60} na α čistog i jednolikog pijeska ($C_u = 1$) (a) i utjecaj raspona veličine čestica (odnosi se na C_u) na α čistog pijeska (b) (Benson et al., 2014b)



Slika 10: Utjecaj D_{60} na n čistog i jednolikog pijeska ($C_u = 1$) (a) i utjecaj raspona veličine čestica (odnosi se na C_u) na n čistog pijeska (b) (Benson et al., 2014b)

Postupak prema (Benson et al., 2014b) je sljedeći:

Pretpostavlja se vrijednost parametra α za vlaženje (α_w) ili sušenje (α_d) pod pretpostavkom da je $Cu = 1$. Prve procjene označavaju se α_{1w} i α_{1d} i određuju se koristeći regresijske jednadžbe koje se odnose na α i D_{60} na slici 9a.

$$\alpha_{1w} = 1.993 \cdot D_{60} \quad (21)$$

$$\alpha_{1d} = 1.354 \cdot D_{60} \quad (22)$$

U idućem koraku, ispravlja se procjena α iz prvog koraka kako bi se uzeo u obzir raspon veličina čestica u pijesku. Izračuna se parametar N_α koristeći jednadžbu na slici 9b u ovisnosti o stvarnom koeficijentu jednolikosti, C_u pijeska i time se dobije korigirana vrijednost parametra α za vlaženje (α_w) ili sušenje (α_d) kao:

$$N_\alpha = 0.99 * C_u^{-0.54} \quad (23)$$

$$\alpha_w = \alpha_{1w} N_\alpha \quad (24)$$

$$\alpha_d = \alpha_{1d} N_\alpha \quad (25)$$

Zatim se procjenjuje parametar n za vlaženje (n_{1w}) ili sušenje (n_{1d}), koji se dobije koristeći regresijske jednadžbe na slici 10a koje se odnose na n i D_{60} , pod pretpostavkom da je pijesak jednoliko graduiran ($Cu = 1$).

$$n_{Cu=1,d} = 14.4 \exp(-0.434 \cdot D_{60}) \quad (26)$$

$$n_{Cu=1,w} = 8.22 \exp(-345 \cdot D_{60}) \quad (27)$$

Ispravlja se procjena parametra n iz trećeg koraka uzimanjem u obzir stvarnog koeficijenta jednolikosti pijeska. Izračuna se (N_n) za vlaženje i sušenje koristeći poznatu vrijednost C_u pijeska preko jednadžbi prikazanih na slici 10b. Konačno, izračuna se korigirana vrijednost parametra n za vlaženje (n_w) i sušenje (n_d) preko sljedećih navedenih izraza:

Za $C_u < 2.2$:

$$N_{n,w} = -0.383 \cdot C_u + 1.383 \quad (28)$$

$$N_{n,d} = -0.542 \cdot C_u + 1.542 \quad (29)$$

Za $C_u \geq 2.2$:

$$N_{n,w} = -0.0033 \cdot C_u + 0.550 \quad (30)$$

$$N_{n,d} = -0.0033 \cdot C_u + 0.379 \quad (31)$$

$$n_w = n_{1w} N_{nw} \quad (32)$$

$$n_d = n_{1d} N_{nd} \quad (33)$$

1.2 Sukcija tla

Kao što je ranije napomenuto, nesaturirana tla posjeduju temeljno fizičko svojstvo koje se naziva sukcija tla (*eng. soil suction*), koja opisuje potencijal s kojim određeno tlo, pri zadanom udjelu vode, može adsorbirati i zadržati vodu u porama, odnosno sukcija predstavlja vrijednost vlačnog naprezanja u porama nesaturiranog tla (Nelson et al., 2015). Ujedno predstavlja i negativni pritisak unutar praznog prostora između čestica tla, koji se povećava sa smanjenjem sadržaja vlage i ovisi o veličini

čestica tla i obliku. Pojam sukucija tla mođe se koristiti kada se govori o matričnoj sukuciji, osmotskoj sukuciji ili ukupnoj sukuciji. Postoje i druge varijable stanja povezane s nesaturiranim tlima koje će možda trebati izmjeriti ili procijeniti, kao na primjer količina vode u tlu ili njezin prirodni sadržaj vode. Odnos varijabli sukucije tla i mjerenog sadržaja vode čine tzv. krivulju retencije vode (*eng. water retention curve* ili *soil water retention curve* ili *soil water characteristic curve*). Budući da se ova funkcija vrlo često koristi za procjenu drugih svojstava nesaturiranih tala, mjerenje sukucije u laboratoriju i na terenu od iznimne je važnosti (Fredlund et al., 2012a). Mnogi inženjerski problemi povezani su s nesaturiranim tlima. Razlog tome su pore koje su djelomično ispunjene zrakom, dijelom vodom. To dovodi do pojave negativnog tlaka vode u porama, što značajno utječe na stanje naprezanja u tlu. Veličine sukucije mogu jako varirati (između 0 i 1 GPa), a instrumenti i tehnike mjerenja su korisni samo u određenim rasponima. Neki instrumenti i tehnike prikladni su samo za laboratorijska ispitivanja, dok se drugi mogu koristiti i na terenu. Neki instrumenti bilježe ukupni sukuciju, dok su drugi namjenjeni za mjerenje matrične ili osmotske sukucije (Murray and Sivakumar, 2010). Ukupna sukucija tla kvantificira termodinamički potencijal vode iz tla u odnosu na referentni potencijal slobodne vode. Slobodna voda definira se kao voda koja ne sadrži otopljene tvari, koja nema doticaj ni sam čime osim sa zrakom i koja nema drugih vanjskih sila osim sile gravitacije. Potencijal slobodne vode veći je od potencijala vode u tlu. Osmotski učinci rezultat su otopljenih tvari u porama. Otopljene tvari mogu nastati iz dva izvora: kao otopljene tvari izvana (npr. prirodnim postupcima ispiranja), ili kao otopljene tvari prirodnog porijekla adsorbirane mineralnim površinama tla (npr. izmjenjivi kationi adsorbirani glinenim česticama). Sukucija koja proizlazi iz prisutnosti otopljenih tvari naziva se osmotska sukucija, π . Ukupni usis tla, ψ_t je algebarski zbroj matrične (kapilarne) i osmotske komponente, koji se mogu zapisati kao:

$$\psi_t = (u_a - u_w) + \pi \quad (34)$$

gdje,

$u_a - u_w$ matrična sukucija, kPa,

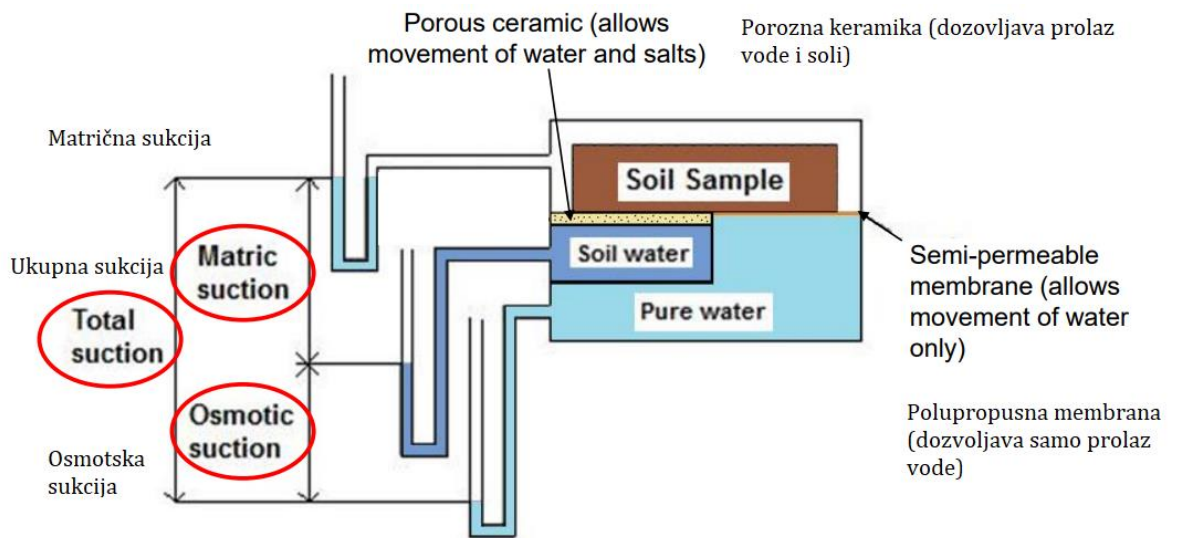
u_a pritisak zraka u porama, kPa,

u_w pritisak vode u porama, kPa,

π osmotska sukucija, kPa.

Relativna važnost pojedinačnih fizikalnih i fizikalno-kemijskih mehanizama odgovornih za sukciju u tlu ovisi o sadržaju vode nesaturiranog sustava tlo-voda-zrak. Pri relativno visokim vrijednostima sadržaja vode i odgovarajuće niskim vrijednostima sukcije, dominantni mehanizam zadržavanja vode u porama postaje kapilarnost, koja prvenstveno ovisi o strukturi čestica, veličini pora i raspodjeli veličine pora (Lu and Likos, 2004). Nešto više o kapilarnom fenomenu u potpoglavlju 2.2.3. Sada je moguće izmjeriti većinu nesaturiranih svojstava tla, međutim, izravno mjerenje nesaturiranih svojstava tla može biti dugotrajan i skup proces. Iz tog su razloga u istraživačkim studijama proizašle razne metode procjene nesaturiranih svojstava tla (Fredlund et al., 2012b).

Sukcija tla glavni je čimbenik koji utječe na ponašanje nesaturiranih tala (Murray and Sivakumar, 2010). U ovom radu provedena su mjerenja za matričnu (kapilarnu) sukciju. U nesaturiranoj mehanici tla, matrična sukcija važan je parametar koji regulira stanje naprezanja u tlu, a rezultat je adsorpcijske i kapilarne sile koja postoji u matrici tla. Osmotska sukcija nastaje zbog soli ili onečišćenja prisutnih u vodi u porama tla. Matrična sukcija tla čini važnu komponentu ukupne sukcije u neplastičnim tlima dok osmotska sukcija može biti značajna u glinama s visokom plastičnošću koje imaju visoku aktivnost zbog svoje inherentne mineralogije ili zbog koncentracije otopljenih soli. Na slici 11 nalazi se shematski prikaz pojašnjenja komponenti ukupne sukcije tla.



Slika 11: Shematski prikaz matrične i osmotske sukucije u tlu
(Toll, 2016)

Uobičajena je praksa da se pod mjerenjima sukucije do 1500 kPa podrazumijeva mjerenje matrične sukucije, dok se mjerenja sukucije u području iznad 1500kPa odnose na mjerenja ukupne sukucije. Pojam „matrična sukucija“ (*eng. matric suction*) odražava raniju upotrebu termina „matriks“ (*eng. matrix*), koja je podrazumijevala komponentu sukucije koja je posljedica interakcije između vode u porama i čestica tla, odnosno „matriksa“ tla (slika 11). Prema Međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI), sukucija se izražava u paskalima (Pa). Za većinu praktičnih problema u inženjerskoj praksi, sukucija se najčešće mjeri i izražava u kilopaskalima (kPa) (Lu and Likos, 2004).

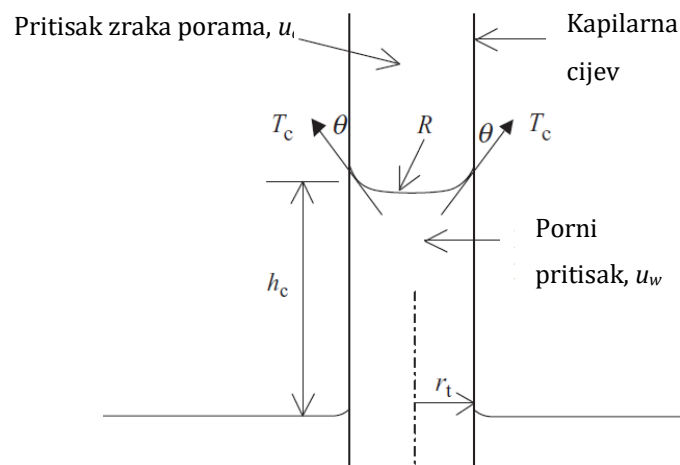
1.2.1 Matrična sukucija

Matrična sukucija (ψ_m) prestavlja razliku između tlaka zraka u porama (u_a) i tlaka vode u porama (u_w):

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (35)$$

Matrični (ili kapilarni) potencijal rezultat je kapilarnih pojava i adsorpcijskih sila između vode i čvrstog matriksa tla. Matrična sukucija obično se povezuje s kapilarnim

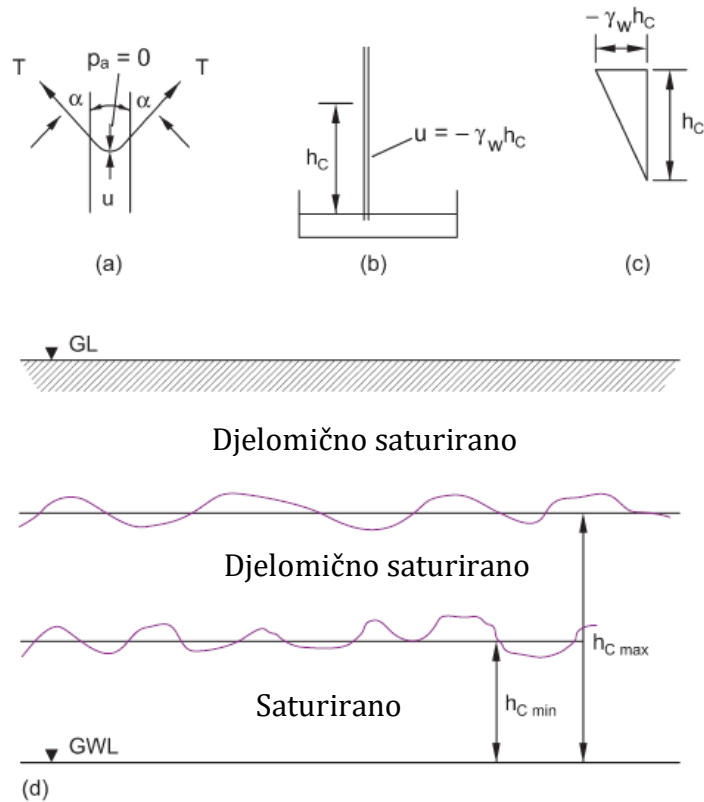
fenomenom koji proizlazi iz površinske napetosti vode (potpoglavlje 2.2.2). Pore u tlu analogne su kapilarnim cijevima s malim radijusima. Voda iz tla uzdiže se iznad nivoa vode zbog kapilara koje stvara tlo. Kapilarna voda ima negativni tlak u odnosu na tlak zraka. Tlak zraka na terenu općenito je atmosferski, odnosno u_a jednak je nuli. Pri niskom stupnju saturacije pritisak vode u tlu može poprimiti vrlo negativnu vrijednost. Razmotrimo kapilarnu cijev ispunjenu vodom istisnutom iz tla, prikazanom na slici 12. Površina vode u kapilarnoj cijevi je zakrivljena i naziva se kontraktilna opna. Relativna vlažnost u tlu smanjit će se zbog prisutnosti zakrivljene vodene površine koju proizvodi kapilarni fenomen. Polumjer zakrivljenosti obrnuto je proporcionalan razlici između tlaka zraka i vode na površini (tj. $u_a - u_w$). Iz tog razloga, komponenta matrične sukcije doprinosi smanjenju relativne vlažnosti u tlu. Matrična sukcija može se mjeriti na direktan i indirektan način. Direktne metode mjere negativni porni pritisak. Indirektne metode osim negativnog pornog pritiska mjere i druge varijable (kao na primjer toplinsku vodljivost) pomoću posebno dizajniranog keramičkog materijala. Pri korištenju indirektna (neizravna) metode mjerenja matrične sukcije potrebna je kalibracija mjernog uređaja (Fredlund et al., 2012b).



Slika 12: Kapilarni fenomen Kapilarni fenomen (Murray and Sivakumar, 2010)

1.2.2 Površinska napetost

Površinska napetost svojstvo je vode koje površinskim molekulama omogućuje da preuzmu vlačnu silu. Molekule vode se međusobno privlače i unutar mase vode te se sile uravnotežuju. Međutim, na površini molekule se privlače samo prema unutra i jedna prema drugoj, što stvara površinsku napetost. Površinska napetost uzrokuje da se površina vodenog tijela pokušava stezati na minimalno područje, stoga je kap vode sfernog oblika. Fenomen je lako razumljiv ako zamislimo da je površina vode prekrivena tankom molekularnom opnom sposobnom za preuzimanje vlačnih naprezanja. Takva opna, naravno, ne može postojati na površini tekućine, ali analogija može objasniti učinke površinske napetosti bez ulaska u relevantne molekularne teorije. Površinska napetost, T_s , može se definirati kao sila koju može preuzeti vodena površina. Tada je mjerna jedinica jednaka (N/mm). Činjenica da površinska napetost postoji može se pokazati u jednostavnom laboratorijskom eksperimentu prikazanom na slici 13 u kojem se otvorena staklena kapilarna cijev stavlja u bazen s vodom podvrgnutom atmosferskom tlaku te se tada opaža porast vode unutar cijevi. Vidljivo je da stupac vode unutar cijevi doseže određenu visinu iznad tekućine u bazenu, h_c . Na površini stupa stvara se zakrivljena površina (kontraktilna opna) pod kutom α prema stijenkama cijevi, (slika 13a). Podnožje stupa je na istoj razini kao i voda u bazenu, (slika 13b), a kako je sustav otvoren, tlak mora biti atmosferski. Pritisak na gornju površinu stupa također je atmosferski (Smith, 2014). Analogija s profilom tla prikazana je na slici 13d.



Slika 13: Kapilarni fenomen (Smith, 2014)

Radijus cijevi jednak je r , visina vode u stupcu jednaka je h_c , a zapreminska težina vode γ_w i ako uzmemo da je pritisak zraka jednak nuli, možemo izjednačiti vertikalne sile koje djeluju na vrhu stupa:

$$T \cdot 2\pi \cdot r \cdot \cos \alpha + u \cdot \pi \cdot r^2 = 0 \quad (36)$$

slijedi,

$$u = \frac{-2 \cdot T \cdot \cos \alpha}{r} \quad (37)$$

Stoga, vidimo da je pritisak vode, u negativan, što ukazuje na to da je voda unutar stupca u stanju sukrije. Maksimalna vrijednost negativnog tlaka vode, $-\gamma_w \cdot h_c$, javlja se na vrhu stupa. Raspodjela tlaka duž duljine cijevi prikazana je na slici 13c. Ako u izraz (37) uvrstimo:

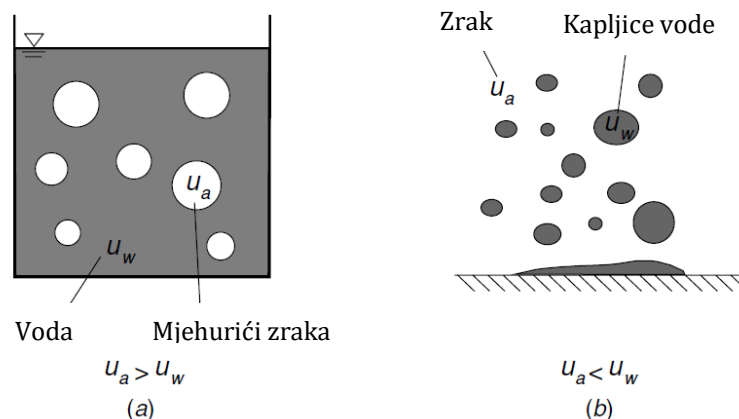
$$u = -\gamma_w \cdot h_c \quad (38)$$

dobije se izraz za h_c :

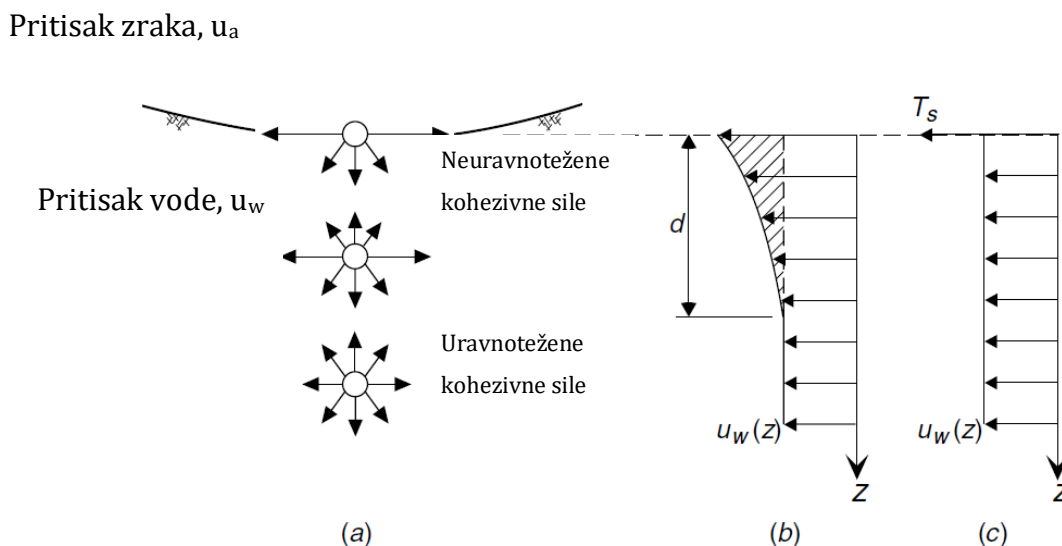
$$h_c = \frac{2 * T * \cos \alpha}{\gamma_w * r} \quad (39)$$

Iz oba izraza (38) i (39) vidljivo je da se veličine $-u$ i h_c povećavaju kako se r smanjuje (Smith, 2014). Geometrija granice između bilo koje dvije tekućine regulirana je ravnotežom sila koje postoje s obje strane granice. U sustavu tekućina-tekućina, kao što je kap ulja u vodi, te sile uključuju tlak u svakoj tekućini i međufaznu napetost koja djeluje između njih. U sustavu plin- tekućina, poput granice zrak-voda u nezasićenom tlu, površinsko naprezanje u zraku može se praktički zanemariti, što dovodi do samo tri komponente potrebne za mehaničku ravnotežu: tlak zraka, tlak vode i površinska napetost vodene faze. Površinska napetost često se definira kao maksimalna razina energije koju tekućina može pohraniti bez rastavljanja. Točnije, površinsko naprezanje može se definirati kao energija potrebna za otvaranje ili zatvaranje jedinice površine na granici faza. Sukladno tome, površinska napetost ima jedinice džula po kvadratnom metru (J/m²), što je ekvivalentno njutnima po metru (N/m), odnosno dimenzija sile po jedinici duljine može se konceptualizirati kao naprezanje na tankoj opni i odraz je količine sile koja se primjenjuje na datu duljinu površine.

Na kontaktu plin-tekućina, površinska napetost nastaje zbog neuravnoteženih intermolekularnih sila koje djeluju na molekule koje čine tekuću fazu. Na primjer, na granici zraka i vode, molekule vode smještene na određenoj udaljenosti od dodirne točke ne doživljavaju jednaku kohezivnu silu u svim smjerovima. Zbog toga molekule na površini jače koheriraju s onima koje su s njima izravno povezane na površini, stvarajući neuravnoteženu silu prema unutrašnjosti vodene faze (slika 15). Da bi sustav ostao u mehaničkoj ravnoteži, duž granice razvija se resultantna sila, površinska napetost. Radi matematičke pogodnosti površinsko naprezanje na granici tekućine i plina često se smatra koncentriranom silom koja djeluje samo duž površinske granice. Međutim, u stvarnosti to nije slučaj. Umjesto toga, površinska napetost je rezultanta distribuiranog naprezanja koje djeluje ne samo na granici, već i do neke dubine unutar tekuće faze. Kada postoji razlika u tlaku između dvije faze, tada je potrebna dodatna sila, površinska napetost, za ravnotežu. U svim slučajevima, faza s manjim tlakom ima tendenciju širenja, što rezultira površinom granice orijentiranom konkavno na stranu visokog tlaka (slika 14).



Slika 14: Razlika tlakova na granici zraka i vode: (a) mjehurić zraka u vodi, pritisk zraka je veći od pritiska vode, (b) kapljice vode u zraku, pritisk zraka manji je od pritiska vode (Lu and Likos, 2004)



Slika 15: Površinska napetost na granici zraka i vode: (a) intermolekularne kohezijske sile među molekulama vode u blizini granice, (b) konceptualna raspodjela tlaka s dubinom, (c) model površinske napetosti koji prikazuje T_s kao rezultantu neuravnoteženih intermolekularnih sila koje djeluju na granici zraka i vode (Lu and Likos, 2004)

Kontraktilna opna zbog površinske napetosti djeluje poput elastične membrane. Ponašanje kontraktilne opne slično je napuhanom balonu koji ima veći pritisk unutar balona nego izvana. Ako je fleksibilna dvodimenzionalna membrana podvrgnuta

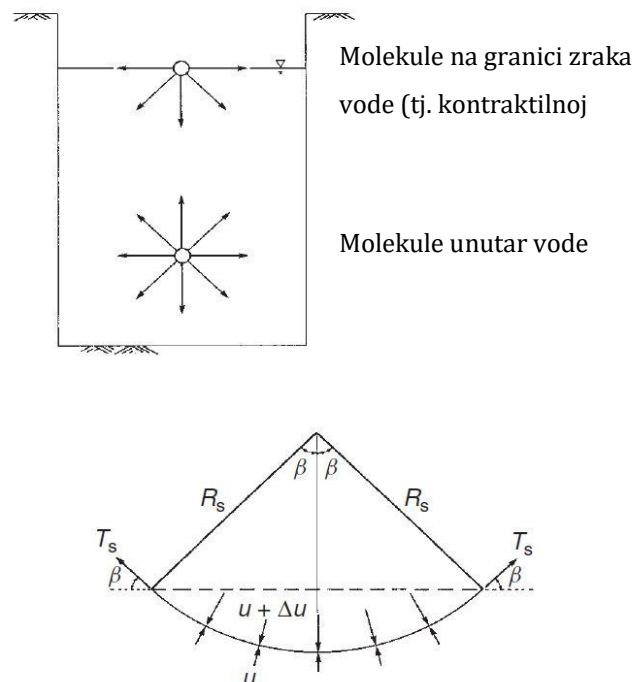
različitim naprezanjima sa svih strana, membrana mora poprimiti konkavni oblik prema većem tlaku, ali mora postojati i naprezanje u membrani kako bi postojala ravnoteža. Razlika tlaka na zakrivljenoj površini može se povezati s površinskom napetošću i radijusom zakrivljenosti membrane. Pritisci koji djeluju na membranu su u i Δu . Membrana ima radijus zakrivljenosti R_s i površinsku napetost T_s . Horizontalne sile duž membrane međusobno su u ravnoteži. Potrebna je ravnoteža vertikalnih sila (Fredlund et al., 2012a).

$$2 \cdot T_s \cdot \sin \beta = 2 \cdot \Delta u \cdot R_s \cdot \sin \beta \quad (40)$$

gdje,

$2 \cdot R_s \cdot \sin \beta$ - duljina membrane projicirane na vodoravnu ravninu.

$\Delta u = \frac{T_s}{R_s}$ - daje razliku tlakova na dvodimenzionalnoj zakrivljenoj površini s radijusom R_s i površinskom napetosti T_s .



Slika 16: Površinska napetost (Fredlund et al., 2012b)

Za iskrivljenu površinu (tj. trodimenzionalna membrana), izraz (40) se može proširiti koristeći Laplaceovu jednadžbu:

$$\Delta u = T_s \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (41)$$

gdje su,

R_1, R_2 – polumjeri zakrivljenosti iskrivljene membrane na dvije pravokutne glavne ravnine

Ako je polumjer zakrivljenosti u svim smjerovima jednak (tj. R_1 i R_2 jednaki su R_s), jednadžba (41) postaje:

$$\Delta u = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad (42)$$

U nesaturiranim tlima, kontraktilna opna podvrgnuta je pritisku zraka, u_a koji je veći od pritiska vode, u_w . Razlika tlakova $u_a - u_w$ predstavlja matričnu sukciju, odnosno kapilarnu sukciju u tlu. Razlika tlakova dovodi do savijanja kontraktilne opne do zakrivljenosti prikazane jednadžbom (43):

$$u_a - u_w = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad (43)$$

Izraz (43) predstavlja Kelvinovu jednadžbu kapilarnog modela. Polumjer zakrivljenosti kontraktilne opne smanjuje se kako se matrična sukcija tla povećava. Zakrivljena kontraktilna opna često se naziva meniskusom. Kada je razlika između tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama jednaka nuli, radijus zakrivljenosti teži u beskonačnost. Granica zraka i vode postaje ravna kada je matrična sukcija jednaka nuli. Zanimljivo je da čak i pod tim uvjetima svojstvo površinske napetosti vode ostaje na konstantnoj vrijednosti (Fredlund et al., 2012a).

1.2.3 Kapilarni fenomen

Matrična sukcijski rezultat je prvenstveno fenomena kapilarnosti, ali također je pod utjecajem površinskih efekata adsorpcije. Kapilarni fenomen izravno je povezan s površinskom napetošću vode i rezultira pojavom dizanja vode u tankoj kapilarnoj cijevi, čineći zakrivljenu površinu između vode i zraka kao što je već ranije opisano. Za ravnotežu na spoju zraka i vode u kapilarnoj cijevi, razlika tlakova na kontraktilnoj opni ($u_a - u_w$) može se izraziti kao:

$$(u_a - u_w) = \frac{2 \cdot T}{R} = \rho_w \cdot g \cdot h_c \quad (44)$$

Iz čega slijedi

$$R = \frac{r}{\cos \theta} \quad (45)$$

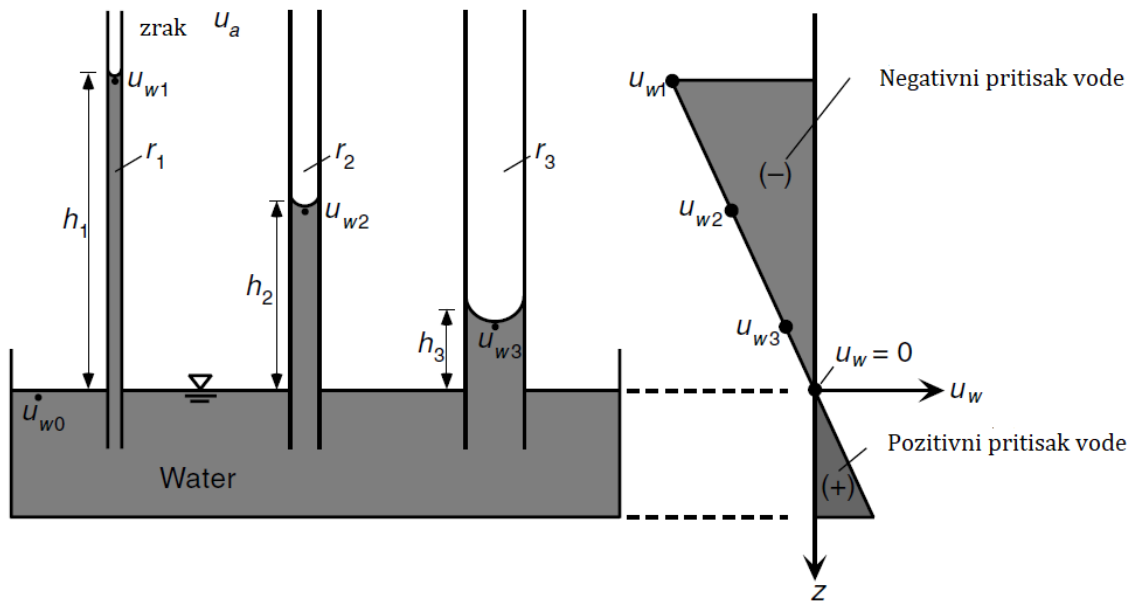
gdje je,

R – radijus kontraktilne opne,

r - radijus kapilarne cijevi,

θ – kontaktni kut meniskusa s kapilarnom cijevi

U tlima pore djeluju kao vijugave kapilarne cijevi i rezultiraju podizanjem vode u tlu iznad razine podzemne vode. Što su pore finije, odnosno manjeg radijusa r , to je veća zakrivljenost meniskusa i visina podizanja vode je veća (slika 17). Kapilarna voda ima negativni tlak vode u odnosu na tlak zraka i njena je veličina obrnuto proporcionalna radijusu zakrivljenosti meniskusa. Drugim riječima, negativni tlak vode u porama ili matrično usisavanje raste kako se radijus meniskusa smanjuje (Murray and Sivakumar, 2010). Visina porasta vode u kapilarnoj cijevi i polumjer zakrivljenosti granice zraka i vode izravno utječu na odnos sadržaja vode i matričnog usisa u tlu (tj. na krivulju retencije vode). Kapilarni uspon različit je za procese vlaženja i sušenja u tlu zbog promjena u veličini kapilarnih pora.



Slika 17: Prikaz kapilarnog podizanja vode u cijevima različitog polumjera (Lu and Likos, 2004)

1.3 Koeficijent propusnosti tla

Na propusnost krupnozrnatih materijala utječe njihova raspodjela veličine zrna, koja se obično opisuje promjerima D_{10}, D_{30}, D_{60} . Ostali uobičajeni indeksi koji se koriste su indeks zakrivljenosti C_c , indeks jednolikosti C_u . Propusnost materijala povećava se s povećanjem koeficijentom pora (Onur, 2014).

1.3.1 Određivanje koeficijenta propusnosti

Razvijen je velik broj empirijskih korelacija kako bi se lakše procijenila propusnost tla uz pomoć granulometrijskog sastava. Hazenova formula (Hazen, 1892.) navedena u nastavku, najčešće se susreće u literaturi i najčešće je korišten odnos za određivanje propusnosti (Onur, 2014):

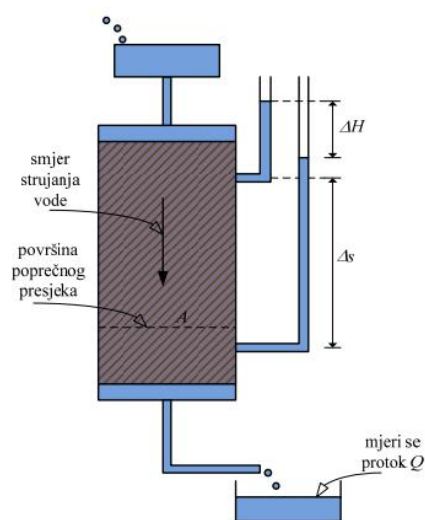
$$k(\text{m/s}) = C \cdot D_{10}^2 \quad (46)$$

gdje je,

C konstanta, čija vrijednost može varirati između 0.1 i 100

Međutim, tipične vrijednosti C kreću se između 0.4 i 1.2 i obično se uzimaju kao 1. Glavno ograničenje Hazenove formule je da pouzdanije vrijedi za čisti pijesak s D_{10} u rasponu od 0.1 do 3.0 mm (Holtz i sur., 2011.). Uz to, ova se metoda temelji samo na D_{10} , koja predstavlja postotak finog materijala u granuliranom tlu (Onur, 2014). Za krupnozrnaste materijale logično je da postoji određena korelacija između veličina čestica i koeficijenta propusnosti, k , međutim nijedna korelacija ove vrste neće biti vrlo točna, jer veličine zrna nisu savršeno mjerilo veličine, orijentacije i povezanosti pora (Johnson and Meyer, 1975).

Određivanje koeficijenta propusnosti ispitivanog materijala, u laboratoriju se može odrediti pomoću tri metode – sa stalnom razlikom hidrauličkog potencijala, s promjenjivom razlikom hidrauličkog potencijala te zadanim protokom. Uređaji koji se koriste za ispitivanje zovu se permeometri. Za potrebe ovog rada korištena je metoda sa stalnom razlikom hidrauličkog potencijala, koja se osigurava stalnim dolijevanjem vode, koja nadoknađuje vodu koja istječe iz uzorka u posudu, gdje se mjeri protok Q (Vlasta Szavits-Nossan, n.d.). Shematski prikaz pokusa s stalnom razlikom hidrauličkog potencijala prikazan je na slici 18.



Slika 18: Određivanje koeficijenta propusnosti metodom stalne razlike hidrauličkog potencijala (Vlasta Szavits-Nossan, n.d.)

Saturirani koeficijent propusnosti može se prvo izmjeriti primjenom razlike tlakova na gornjem i donjem dijelu uzorka. Očitavanja vrijednosti volumena vode koje uđe

u uzorak i volumena vode koji istječe iz uzorka i vrijednosti hidrauličkog gradijenta daju podatke za izračun prema Darcyevom zakonu, koji glasi:

$$v = k * i \quad (47)$$

gdje je,

v (m/s) specifični protok (protok po jedinici površine okomito na smjer strujanja vode, odnosno volumen vode u jedinici vremena po jedinici površine okomito na smjer strujanja vode),

k (m/s) koeficijent propusnosti materijala

i (/) hidraulički gradijent

Koeficijent propusnosti ima mjernu jedinicu brzine (m/s). Volumen vode koji istječe iz uzorka, podijeljen s vremenom mjerenja, definira protok Q (m³/s). Kada se protok, Q podijeli s površinom tla okomito na smjer strujanja, A dobije se specifični protok, q . Prema Darcyevom zakonu, specifični je protok proporcionalan hidrauličkom gradijentu, a konstantom proporcionalnosti se definira koeficijent propusnosti. On, međutim, nije konstantan za danu vrstu tla, već se u saturiranom tlu mijenja s promjenom veličine pora, primjerice, nakon opterećenja ili rasterećenja tla, posebno tijekom konsolidacije sitnozrnatog tla. Koeficijent propusnosti određuje se iz jednostavnog izraza (Vlasta Szavits-Nossan, n.d.):

$$Q = A * v = A * k * i = A * k * \frac{\Delta H}{\Delta s} \Rightarrow k = \frac{Q * \Delta s}{A * \Delta H} \quad (48)$$

Brzina toka saturiranog pijeska proporcionalna razlici hidrauličkog potencijala na krajevima uzorka, odnosno obrnuto proporcionalna visini uzorka. Izraz (49) prikazuje Darcyjevu brzinu:

$$v = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (49)$$

gdje,

v - brzinu toka (m/s),

$h_1 - h_2$ - razlika u hidrauličkom potencijalu (kPa),

L – visina uzorka (m)

k – koeficijent propusnosti (m/s)

Treba naglasiti da taj odnos vrijedi samo za laminarno strujanje. Razlika hidrauličkih potencijala $h_1 - h_2$ podijeljena s visinom uzorka, L naziva se hidraulički gradijent i .

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (50)$$

Tako i specifičan protok q možemo izraziti kao:

$$q = \frac{Q}{A} = v = k * i \quad (51)$$

Protok, Q jednak umnošku brzine toka i i površine presjeka, A :

$$Q = v * A \quad (52)$$

Protok Q je količina istjecanja (volumena V) u jedinici vremena t , a obično se izražava u kubnim metrima u sekundi [m³/s]:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (53)$$

Koeficijent propusnosti ima mjerne jedinice brzine, a najčešće se iskazuje u cm/s ili m/s. Koeficijent propusnosti nije konstantan, već zavisi o svojstvima poroznog medija. Voda se može dodavati bilo na vrhu, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča. Prije ispitivanja, uzorak mora biti potpuno saturiran vodom i ne smije sadržavati mjehuriće zraka, kako bi se minimizirali njegovi negativni učinci na rezultate mjerenja (Petrinjak et al., 2018). Uobičajene vrijednosti koeficijenta propusnosti, k prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1: Raspon vrijednosti koeficijenta propusnosti za različitu vrstu materijala
(Vlasta Szavits-Nossan, n.d.)

Vrsta tla	Koeficijent propusnosti, k (m/s)
Čisti šljunci	$6 \times 10^{-2} - 1$
Čisti pijesci i mješavine pijeska i šljunka	$9 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-2}$
Vrlo fini pijesci, prahovi	$2 \times 10^{-7} - 9 \times 10^{-5}$
Gline i prašinate gline (>20% gline)	$< 10^{-10} - 2 \times 10^{-7}$

U ovom radu mjerenja su provedena korištenjem troosnog uređaja tvrtke Wykeham Farrance. Ispitivanje propusnosti materijala u troosnoj ćeliji uključuje saturiranje i konsolidaciju uzorka do potrebnog efektivnog naprezanja na isti način kao i za CD (*eng. consolidated drained*) ili CU (*eng. consolidated undrained*) test, ali umjesto faze smicanja, omogućava se protok vode kroz uzorak uz unaprijed definiranu razliku tlakova (potencijala) i mjeri se brzina protoka vode. Iz ovog mjerenja izračunava se propusnost tla. Mjerenja su provedena na uzorcima relativne zbijenosti materijala $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$, zadane zbijenosti materijala izbedene su metodom potkompakcije. Visina uzorka iznosi 10 cm, a promjer 5 cm.

1.3.2 Jednadžbe za procjenu koeficijenta propusnosti

U slučaju nedostatka odgovarajućih ispitnih uzoraka tla, za procjenu koeficijenta propusnosti koriste se i neizravne, empirijske metode koje se temelje na karakteristikama granulometrijske krivulje. U krupnozrnatim tlima, koeficijent propusnosti primarno ovisi o koeficijentu pora, stoga su predložene pojedine jednadžbe koje ih povezuju:

- Carrier, 2003:

$$k = \frac{e^3}{1+e} \quad (54)$$

gdje je,

e- koeficijent pora (/)

k-koeficijent propusnosti (m/s)

- Chapuis (2004):

$$k(\text{cm/s})=2.4622 [D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)}]^{0.7825} \quad (55)$$

gdje je,

D_{10} – efektivni promjer zrna (mm)

- Amer i Awad (1974):

$$k(\text{cm/s})=3.5 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} D_{10}^{2.32} \quad (56)$$

gdje je,

k- koeficijent propusnosti (cm/s)

C_u - koeficijent jednoličnosti

D_{10} - efektivni promjer zrna (mm)

- Kozeny-Carman:

$$k(\text{cm/s})=\left(\frac{\rho_w \cdot g}{\mu}\right) \cdot \left(\frac{n^3}{(1-n)^2}\right) \cdot \left(\frac{D_{50}^2}{180}\right) \cdot \left(\frac{1m}{100cm}\right) \quad (57)$$

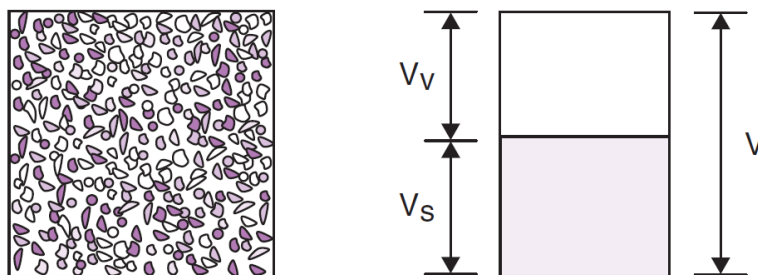
$$\mu = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ N/sm}^2$$

n- poroznost materijala (/)

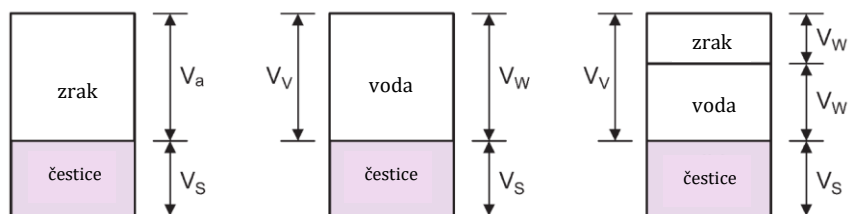
D_{50} – srednji promjer zrna (mm)

2 FAZNE RELACIJE I KOLIČINA VODE U TLU

Tla su sastavljena od čestica, plina (najčešće zraka) i tekućine (najčešće vode). Prostor između čestica čini praznine koje se nazivaju porama. Ako su praznine potpuno ispunjene zrakom, tlo je suho. Ako su praznine potpuno ispunjene vodom, tlo se naziva saturirano. Ako je tlo ispunjeno dijelom zrakom, a dijelom vodom, tlo se naziva nesaturirano ili djelomično saturirano tlo (slika 20) (Briaud, 2013). Presjek kroz zrnato tlo može imati izgled sličan onome prikazanom na slici 19a. Za proučavanje svojstava takve mase tla korisno je usvojiti idealizirani model, dijagram prikazan na slici 19b. Ukupni volumen tla, V , sastoji se od volumena čvrstih čestica, V_s , i volumena šupljina, odnosno pora, V_v . (Smith, 2014). Masu označavamo simbolom M .



Slika 19: Struktura tla i fazni dijagram (Smith, 2014)



Slika 20: (a) suho tlo, (b) saturirano tlo, (c) nesaturirano tlo (Smith, 2014)

Osnovne definicije:

Ukupan volumen tla:
$$V = V_s + V_v \quad (58)$$

Volumen pora:
$$V_v = V_w + V_a \quad (59)$$

Koeficijent pora:
$$e = \frac{\text{volumen pora}}{\text{volumen čvrstih čestica}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (60)$$

Porozitet:
$$n = \frac{\text{volumen pora}}{\text{ukupan volumen}} = \frac{V_v}{V} \quad (61)$$

Veza između koeficijenta pora i poroziteta dana je relacijom:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{e}{1 + e} \quad (62)$$

Stupanj saturacije:
$$S = \frac{\text{volumen vode}}{\text{volumen pora}} = \frac{V_w}{V_v} \quad (63)$$

Vlažnosti tla:
$$w = \frac{M - M_s}{M_s} = \frac{M_w}{M_s} \quad (64)$$

Iz gornjih jednažbu može izvući koristan izraz:

$$S \cdot e = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot w \quad (65)$$

Specifična težina materijala je odnos težine materijala prema težini jednakog volumena vode. U mehanici tla najvažnija je specifična težina stvarnih čestica tla i označava se kao $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$, čime izraz (20) postaje jedna od osnovnih najčešće korištenih relacija:

$$S \cdot e = G_s \cdot w \quad (66)$$

2.1 Određivanje količine vode u tlu

Količina vode u tlu može se definirati pomoću više varijabli. Varijable korištene za određivanje količine vode u tlu su:

- gravimetrijski sadržaj vode w ,
- volumetrijski sadržaj vode θ ,
- stupanj saturacije S i
- volumen vode V_w ¹

Gravimetrijski sadržaj vode w , najčešći je pojam koji se koristi u geotehničkom inženjerstvu, a definirana se kao:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (67)$$

gdje je,

w - gravimetrijski sadržaj vode,

M_w - masa vode,

M_s - masa čvrstih čestica

¹ upućen na izvorni volumen uzorka V_0 , odnosno $\frac{V_w}{V_0}$

Volumetrijski sadržaj vode θ , određuje količinu vode u tlu u odnosu na ukupan volumen tla.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_t} \quad (68)$$

gdje je,

θ - volumetrijski sadržaj vode u tlu,

V_v - volumen pora u tlu,

V_s - volumen čvrstih čestica,

V_t - ukupan volumen tla,

V_w - volumen vode,

Normalizirani volumetrijski sadržaj vode Θ , predstavlja količinu vode u tlu normaliziranu između rezidualnog volumetrijskog sadržaja vode i zasićenog volumetrijskog sadržaja vode:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (69)$$

gdje je,

θ_r - rezidualni volumetrijski sadržaj vode,

θ_s - saturirani volumetrijski sadržaj vode

Stupanj saturacije i volumetrijski sadržaj vode povezani su preko poroznosti materijala, n . Kada je stupanj saturacije jednak jedan, VWC jednak je poroznosti tla (Ellithy, 2017)

$$\theta = S \cdot n \quad (1)$$

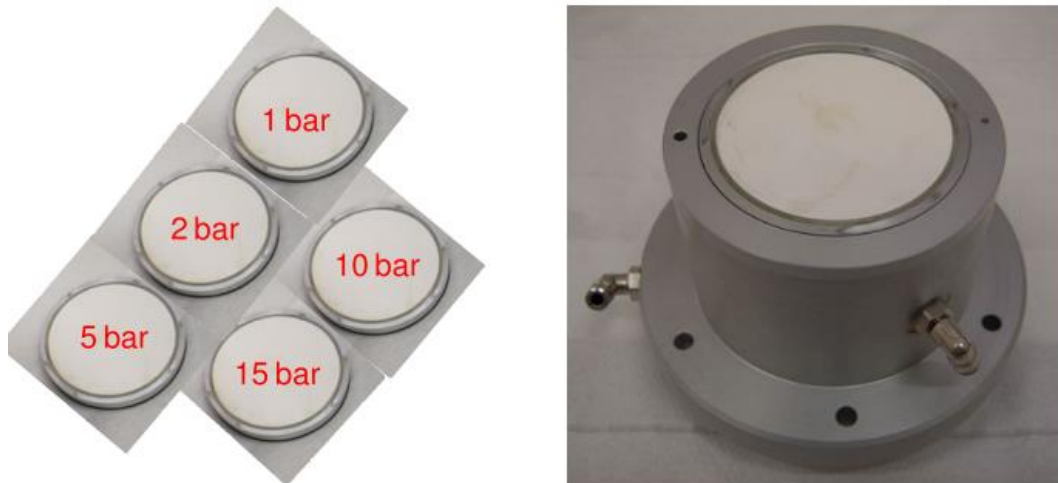
3 METODE ODREĐIVANJA KRIVULJE RETENCIJE VODE

U nastavku su opisane dvije metode izravnog mjerenja sukcije u tlu, koji su korištene u radu za određivanje krivulje retencije vode ispitivanog pijeska: metoda translahiranih osi, korištenjem troosnog uređaja s dvostrukom ćelijom i tenziometri. Eksperimentalna mjerenja matrične sukcije u nesaturiranim tlima pomoću tenziometara i metode translahiranih osi dijeli zajedničko načelo rada, odnosno mjerenje razlike tlaka na poroznoj keramici s visokom vrijednosti ulaska zraka (Tarantino et al., 2008).

3.1 Metoda translahiranih osi

Metoda translahiranih osi omogućuje mjerenje i kontrolu sukcije u vrijednosti preko jedne atmosfere (100 kPa) bez odvijanja kavitacije (Nelson et al., 2015). Pojava kavitacije vode u kontekstu nesaturirane mehanike tla važna je iz praktičnih razloga. Tenziometri se, na primjer, koriste za izravna mjerenja negativnog tlaka vode u porama u nesaturiranom tlu. Ako se kavitacija dogodi pod sve negativnijim tlakom vode, gubi se kontinuitet u tekućoj fazi između mjernog sustava i porne vode, a mjerenje postaje nepouzdan. Kavitacija se može dogoditi u slobodnoj vodi, porama, poroznom kamenu ili kapilarnim cijevima kad se tlak tekuće faze u_w približi tlaku pare u_v (*eng. vapor pressure*). U mjernim uređajima kao što su tenziometri, tlak tekuće faze bilježi se kao deficit s obzirom na lokalni atmosferski tlak, što se obično naziva negativnim mjerenjem tlaka. Do kavitacije u slobodnoj vodi dolazi pod negativnim tlakom kako se veličina tlaka približava - 1 atm. Budući da je kontrola matrične sukcije u rasponu daleko većem od 1 atm potrebna za mnoge vrste tla, poželjne su alternative mjerenju ili kontroli negativnog tlaka vode. Općeniti pojam translacije osi odnosi se na praksu povišenja tlaka zraka u porama nesaturiranog tla, uz održavanje tlaka vode u porama na mjerljivoj referentnoj vrijednosti, tipično atmosferskoj. Kao takva, varijabla matrična sukcija $u_a - u_w$, može se kontrolirati u opsegu daleko većem od granice kavitacije za vodu pod negativnim pritiskom (Lu and Likos, 2004).

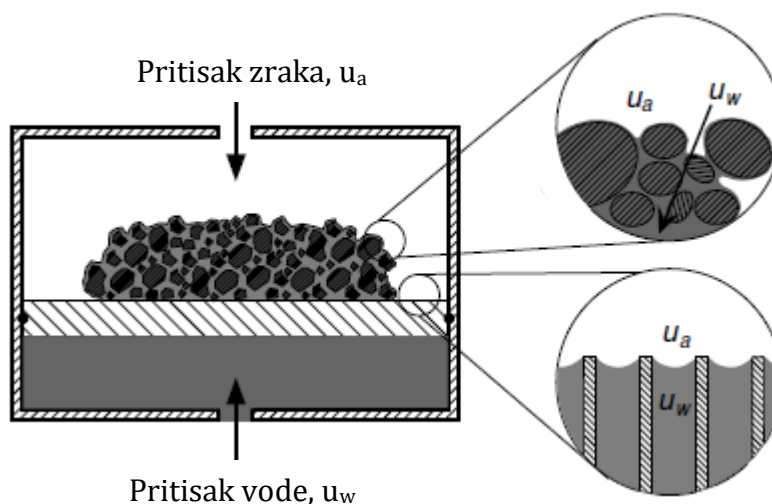
Hilf je 1956. godine predložio metodu translahiranih osi za kontrolu sukcije u nesaturiranim tlima. Osnovni princip metode translahiranih osi u nesaturiranim tlima, je povisiti tlak zraka u porama, tako da se mjere pozitivne vrijednosti tlaka vode u porama. Razlika između tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama predstavlja sukciju tla. Saturirani porozni kamen s visokom vrijednošću ulaza zraka ili tzv. HAEV porozni kamen (*eng. High Air Entry Porpus Stone*) koristi se za sprječavanje ulaska zraka u sustav za mjerenje tlaka vode u porama u trosonom uređaju s dvostrukom ćelijom (slika 21). Za HAEV keramički disk obično se koristi sinterirani kaolin. Vrijednost ulaza zraka u HAEV kamen mora biti veća od matične sukcije koji se mjeri metodom translahiranih osi. HAEPS stvara problem prilikom saturiranja uzorka, jer brzina ulaska vode u uzorak ovisi o HAEPS-u, a ne o uzorku. Što je veća vrijednost HAES, to je duže potrebno duže saturirati. Nedostatak ove tehnike je rizik od difuzije zraka kroz HAEPS u sustav za mjerenje tlaka vode u porama, što dovodi do stvaranja mjehurića zraka i grešaka u volumnim mjerenjima. Da bi se problem prevladalo potreban je sustav za ispiranje mjehurića zraka iz sustava (*eng. flushing*).



Slika 21: Kamen s visokom vrijednosti ulaska zraka, HAEPS u trosonom uređaju s dvostrukom ćelijom (Istruzioni, n.d.)

Ukoliko pretpostavimo da uzorak tla ima veliku negativnu vrijednost pornog pritiska, (*eng. Pore Water Pressure, PWP*), u trenutku kada se postavi na saturirani HAEV kamen, uzorak će odmah težiti izvlačenju vode kroz keramički disk. Ovo uzrokuje da pretvarač tlaka započne bilježiti negativnu vrijednost pritiska vode. U ravnotežnim

uvjetima, razlika između pritiska zraka i pritiska vode jednaka je vrijednosti matrične sukcije (Fredlund et al., 2012a). Prema već poznatoj jednadžbi za sukciju ($\psi_m = u_a - u_w$), pri atmosferskim uvjetima ($u_a = 0$), vrijednost sukcije biti će negativna ($-u_w$). Princip funkcioniranja metode translahiranih osi prikazan je na slici 22.

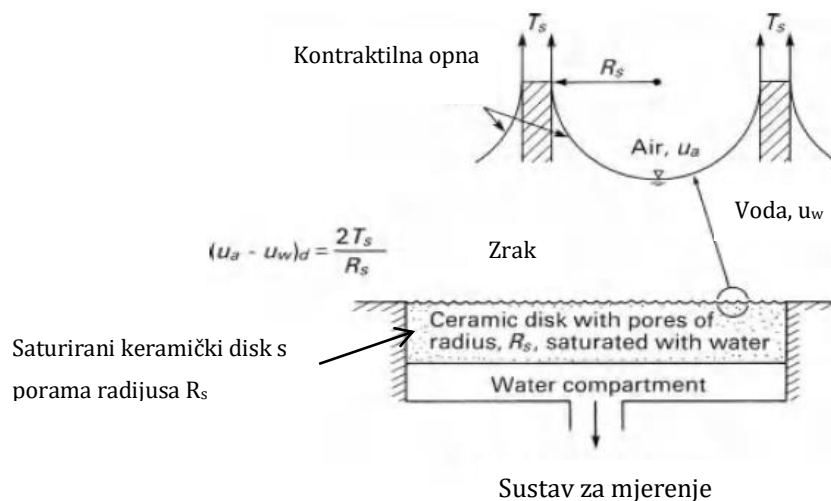


Slika 22: Metoda translahiranih osi (Lu and Likos, 2004)

Metoda je osobito korisna za laboratorijska ispitivanja nesaturiranih uzoraka u troosnim pokusima. U ravnotežnim uvjetima, razlika između primijenjenog tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama održava se translacijom osi. Metoda translahiranih osi oslanjaju se na kontrolu razlike između tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama i mjerenje odgovarajućeg sadržaja vode u tlu u ravnoteži s primijenjenom matričnom sukcijom (Lu and Likos, 2004). Kada se tlak zraka iznad uzorka tla promijenio za određenu količinu, izmjerena reakcija tlaka vode u porama uvijek je jednaka promjeni tlaka zraka, odnosno, izmjerena matrična sukcija ostaje konstantna.

Ukoliko postoji dobar hidraulički kontakt između uzorka tla i saturiranog HAEPS-a, može se primijeniti pozitivan tlak zraka na pore s jedne strane, dok se omogućuje da se voda iz pora slobodno drenira kroz materijal pod atmosferskim tlakom koji se održava s druge strane. Razdvajanje tlaka zraka i vode održava se sve dok primijenjeni tlak ne prelazi HAE vrijednost keramike, koja je prikazana na slici 21, a koji može biti i do 1500 kPa za sinteriranu keramiku ili 10 000 kPa za posebne celulozne membrane (Fredlund et al., 2012b).

Keramički HAEV diskovi imaju važnu ulogu u ispitivanju nesaturiranih tala više od 50 godina i još uvijek ostaju osnovno sredstvo za razdvajanje tlaka zraka u porama i tlaka vode u porama (kod metode transliranih osi). HAEV diskovi imaju dva osnovna ograničenja: izuzetno nizak koeficijent propusnosti i postupna difuzija zraka kroz vodenu fazu. Nizak koeficijent propusnosti postavlja ograničenje na brzinu odziva pornog pritiska, kao i na otežano ispuštanje vode iz tla. HAEV disk ima ograničenje na najveći koeficijent propusnosti koji se može izmjeriti u laboratoriju (Fredlund et al., 2012a). Keramički diskovi s visokom vrijednosti ulaska zraka, HAEPS imaju male pore relativno jednolike veličine i djeluje kao membrana ili separator između zraka i vode. Kada je kamen potpuno saturiran, zrak ne može proći kroz njega jer se kontraktilna opna opire protoku slobodnog zraka. Ovaj mehanizam može se jednostavno objasniti prethodno objašnjenim mehanizmom površinske napetosti T_s . Kontraktilna opna djeluje kao tanka membrana koja spaja male pore polumjera R_s na površini keramičkog diska, slika 23. Razlika između tlaka zraka iznad kontraktilne opne i tlaka vode ispod kontraktilne opne jednaka je matricnoj sukuciji (Fredlund et al., 2012a).



Slika 23: princip rada HAEV poroznog kamena opisan kapilarnim modelom (Fredlund et al., 2012b)

3.1.1 Troosna ćelija s dvostrukom stijenkom za ispitivanje nesaturiranih uzoraka

Tradicionalna metoda za mjerenje promjene volumena uzorka u troosnom ispitivanju saturiranih tala uključuje mjerenje količine porne tekućine koja napušta ili ulazi u uzorak. U nesaturiranom tlu to nije moguće jer volumen vode i volumen uzorka nisu povezani. Za promjenu volumena nesaturiranih uzoraka najjednostavnije je pratiti volumen tekućine (tj. vode) koja napušta ili ulazi u troosnu ćeliju. Za prevladavanje poteškoća pri korištenju tradicionalne troosne ćelije, poželjno je korištenje dvostruke ćelije, kao primjerice one razvijene od strane Wykeham Farrance Divison tvrtke (Controls Test Equipment Ltd.) prikazane na slici 25. Dimenzije dvostruke ćelije prikazane su u tabeli 1.

Ćelijski volumen koji proizlazi iz promjena ćelijskog pritiska uvelike je smanjen postojanjem dvostruke ćelije, budući da je unutarnja ćelija podvrgnuta jednakom pritisku s obje strane stijenki ćelije (Mendes et al., 2012).

WF oprema sastavljena je od dvostrukih ćelija, ne koristi se naziv dvostruki „zidovi“ iz razloga što je gornja kapa unutarnje ćelije također podvrgnuta jednakom pritisku sa svih strana. U unutarnju ćeliju mogu se ugraditi uzorci različitih promjera: 38, 50 i 100 milimetara. Jedan važan nedostatak tijekom ispitivanja s dvostrukom ćelijom, je dizajn gornjih poklopaca i u unutarnjoj i u vanjskoj ćeliji. Naime, utvrđeno je da je znatan volumen zraka ostaje zarobljen na vrhu prilikom punjenja obje ćelije. Primjena malog vakuuma na vrhu unutarnje ćelije tijekom punjenja može pomoći u uklanjanju mjehurića zraka, ali ih ne uklanja u potpunosti. Međutim, ako je ćelija pod pritiskom, mjehurići zraka su komprimirani i naposljetku otopljeni u vodi. Kako bi se prevladao problem zarobljavanja zraka, rješenje je držati ćeliju pod pritiskom uz održavanje net pritiska uzorka približno nuli ($\sigma - u_a = 0$) kako se nebi pojavile deformacije na uzorku odnosno konsolidacija uzorka.

U početku je bila namijenjena upotreba samo jedne hidrauličke pumpe za tlačenje obje ćelije. Međutim, primijećen je određeni porast tlaka u vanjskoj ćeliji prilikom spuštanja klipa u unutarnju ćeliju. Ovo povećanje pritiska u vanjskoj ćeliji, održavajući pritom konstantni tlak u unutarnjoj ćeliji, ugrožavalo je staklenu stijenku unutarnje ćelije. Da bi se izbjegao lom staklene stijenke, obje su ćelije odvojene ventilom i instalirana je druga pumpa.

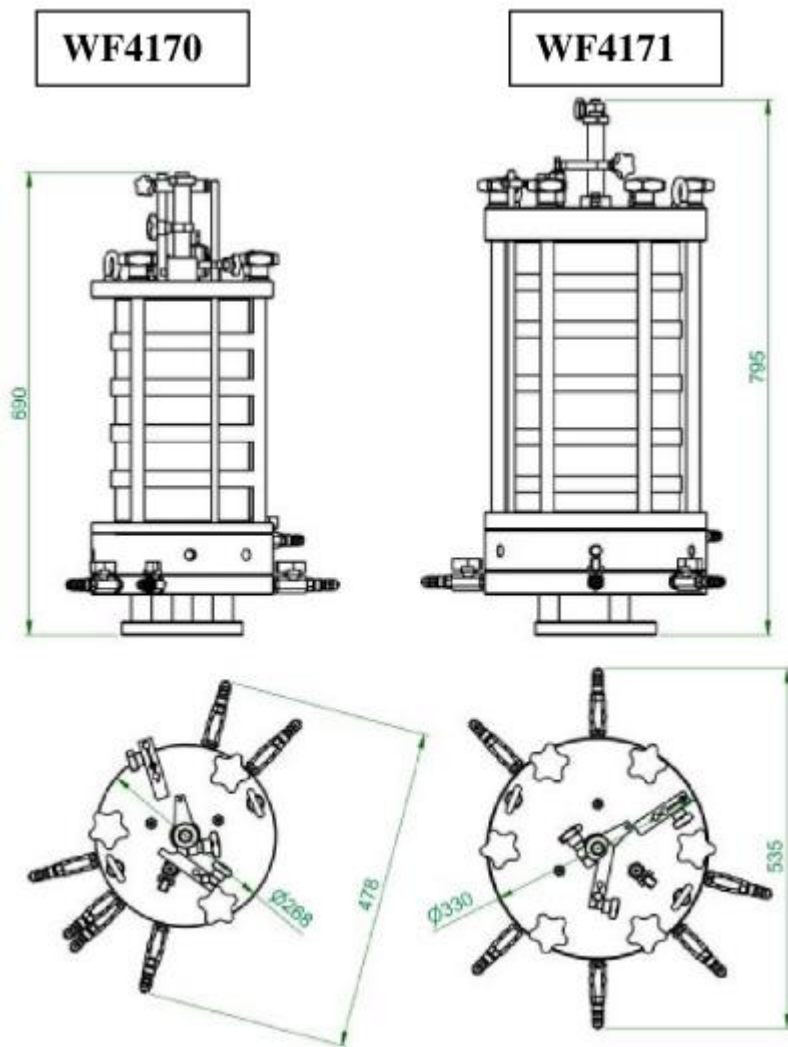
Dvije značajke čine ovaj sustav priklanim za provođenje troosnih ispitivanja nesaturiranih uzoraka: (i) zid unutarnje ćelije izrađen je od stakla kako bi se eliminirao problem upijanja vode i (ii) mogućnost postavljanja mjerača sukcije visokog kapaciteta u postolju za mjerenje tlaka vode u porama, izravno u uzorku koji bi se mogao zamijeniti tijekom ispitivanja u slučaju kavitacije uređaja.

Set postolja za nesaturirane ćelije, sastoji se od postolja, HAEVs-a zapečaćenog u aluminijski prsten i prstena za kompenzaciju visine, Korištenjem specifičnih prilagodljivih postolja. Moguće je testirati uzorke različitih promjera u istoj troosnoj ćeliji. Tabela 2 prikazuje dva tipa dvostruke ćelije troosnog uređaja i promjere uzoraka koji se u njih mogu ugraditi. Za potrebe ovog rada korištena je ćelija WF4170. Tehničke specifikacije prikazane su u tabeli 3.

Tabela 2: Promjeri uzoraka koji se mogu ugraditi u dvostruke ćelije troosnog uređaja ("Double wall triaxial cells for unsaturated tests, Soil mechanics testing equipment, Controls," n.d.)

Promjer uzorka	Tip dvostruke troosne ćelije	
		28-WF4170
50	28-WF4170/50	28-WF4171/50
70	28-WF4170/70	28-WF4171/50
100	/	28-WF4171/100

Kada se ugradi uzorak, unutarnja i vanjska ćelija paralelno se pune deaeriranom vodom i na obje se primjenjuje isti pritisak vode. Na taj se način staklena stijenka ne deformira i zaštićena je od pucanja uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka. Uzorak se postavlja na prethodno saturirani HAEV disk. Ispod HAEV diska vrlo mali odjeljak ispunjen je deaeriranom vodom i povezan s regulatorom tlaka koji se koristi za kontrolu i mjerenje porznog pritiska vode u uzorku. Porozni kamen pričvršćen je na vrh uzorka, te gornja kapa kroz koju se primjenjuje pritisak zraka na uzorak.



Slika 24: Shematski prikaz WF4170 i WF4171 dvostrukih ćelija troosnog uređaja



Slika 25: Troosni uređaj s dvostrukom ćelijom
(Mechanical et al., 2012)

Tabela 3: Tehničke specifikacije dvostruke ćelije trosonog uređaja ("Double wall triaxial cells for unsaturated tests, Soil mechanics testing equipment, Controls," n.d.)

Tip modela:	WF4170
Maksimalni promjer uzorka	70 mm
Maksimalni pritisak	2000 kpa
Maksimalna visina ćelije	690 mm
Maksimalni promjer s ventilima	478 mm
Masa	30 kg
Broj ulaznih otvora	6

3.2 Tenziometar

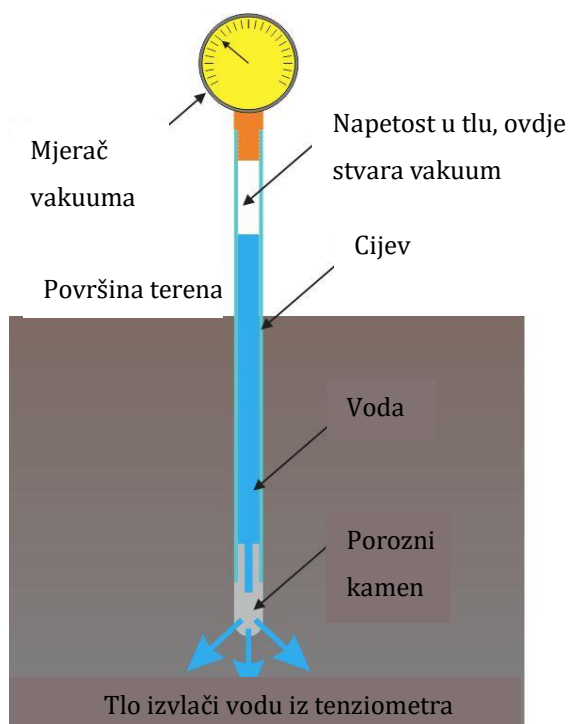
Vodeni potencijal je po definiciji mjera razlike u potencijalnoj energiji između vode u uzorku i vode u referentnom bazenu čiste, slobodne vode. Tenziometar je uređaj koji predstavlja aktualizaciju ove definicije. Tenziometarska cijev sadrži bazen (teoretski) čiste, slobodne vode. Rezervoar je povezan (kroz propusnu membranu) s uzorkom tla. Voda se kreće iz bazena u tlo dok joj energija ne bude jednaka s obje strane membrane, čime se stvara vakuum u cijevi. Tenziometar koristi manometar za mjerenje veličine tog vakuuma i opisuje potencijal vode u smislu pritiska (METER, n.d.).

Tenziometri se sastoje od poroznog kamena s visokom vrijednosti ulaska zraka (HAE keramički vrh) koji je preko uske staklene cijevi spojen na uređaj za mjerenje tlaka kao što je manometar ili elektronički pretvarač (Nelson et al., 2015). Pojednostavljeni prikaz tenziometra nalazi se na slici 26. Manometar mjeri nisku napetost, odnosno potencijal vode u tlu u rasponu od nule do negativnih 600 ili 1000 hektopaskala, ovisno o modelu i rezoluciji mjerača. Raspon boja često služi za jednostavniju interpretaciju očitavanja. Zelena boja u rasponu najčešće pokazuje optimalnu vlažnost tla za većinu biljaka, što se može primijeniti za sve uobičajene vrste tla. Preko vrha tenziometra cijev se puni deaeriranom vodom. Primjena ovog uređaja najbolje se pokazala u agronomiji, gdje je mjerenje vlažnosti tla pokazalo nužnost navodnjavanja za ostvarenje optimalnih uvjeta u tlu koji će najbolje pogodovati razvoju biljaka. Tenziometar mjeri usisnu napetost vode u tlu, odnosno mjeri čvrstoću kojom je voda zadržava u tlu i na taj način demonstrira snagu kojom korjenje biljaka povlači vodu iz tla. Voda u tenziometru povezana je s vodom iz okolnog tla vodenim mostovima kroz pore na keramičkom vrhu. Ukoliko se tlo osuši doći će do povlačenja vode iz tenziometra i kavitacije, što rezultira očitavanju niskog pritiska.

Tenziometri se koriste za izravno mjerenje negativnog tlaka vode u porama, a mogu se koristiti u laboratoriju ili na terenu (Lu and Likos, 2004). U oba slučaja, najčešće se ugrađuju u tlo u prethodno izbušene rupe. Tenziometri se koriste za mjerenje matrične sukcije ili negativnog tlaka vode u porama gdje tlak zraka u porama nije povišen kao u metodi translahiranih osi. Budući da se tenziometri oslanjaju na izmjenu vode između instrumenta i tla kako bi se izjednačio tlak vode u instrumentu s

tlakom vode u porama u tlu, vrlo je važno ostvarivanje dobrog kontakta između vrha instrumenta i tla.

Kada se tenziometar ugradi u tlo, dolazi do izvlačenja vode iz tenziometra preko keramičkog vrha sve dok naprezanje koje zadržava vodu u tenziometru nije jednako sukuciji u tlu. Vrijeme odziva ovisi o propusnosti poroznog kamena, osjetljivosti mjernog uređaja, količini vode u sustavu i količini otopljenog zraka u sustavu, ali instrumenti obično pokazuju relativno brz odgovor na promjene tlaka vode u porama. Ravnotežni uvjeti obično se uspostave unutar perioda od sat vremena. Praksa primjene vlačnog naprezanja na vodu može uzrokovati stvaranje mjehurića zraka unutar tenziometra (Murray and Sivakumar, 2010). Tipične veličine pora korištene u tenziometrima kreću se od $6 \mu\text{m}$ do $0,16 \mu\text{m}$, što odgovara nominalnim vrijednostima ulaza zraka od 50 kPa do 1500 kPa (Tarantino et al., 2008).



Slika 26: Pojednostavljeni dizajn tenziometra
("soilmoisture – Soilmoisture's Blog," n.d.)

Za potrebe ovog rada korištena su dva tipa tenziometara: analogni, standardni T1 tenziometar od proizvođača MMM Tech Support i digitalni tenziometar TEROS 32 proizvođača Meter Environment. Njihov kratki opis naveden je u nastavku.

- **Standardni T1 tenziometar**

Standardni T1 tenziometar (slika 27) sadrži manometar sa skalom u boji za brzu i jednostavnu interpretaciju vrijednosti mjerenja. Silikonska brtva jamči nepropusnu vezu i omogućuje jednostavno punjenje. U radu su korištena dva takva tenziometra duljine šipke 20cm. Tabela 4 prikazuje osnovne značajke T1 tenziometra.



Slika 27: Standardni T1 tip tenziometra

(“Mechanics › Soil testing systems,” n.d.)

Tabela 4: Osnovne značajke T1 tenziometra

Mjerne jedinice:	mbar=(hPa)
Raspon mjerenja:	0-600 mbar/hPa
Točnost mjerenja:	± 16%
Brtva	hermetička silikonska brtva
Keramički vrh, visina:	5 cm
Dimenzije držala (unutarnji promjer, vanjski promjer, debljina stijenke):	16 mm, 12 mm, 2 mm
Duljina držala	20cm, 30 cm, 50 cm, 60 cm, 90 cm

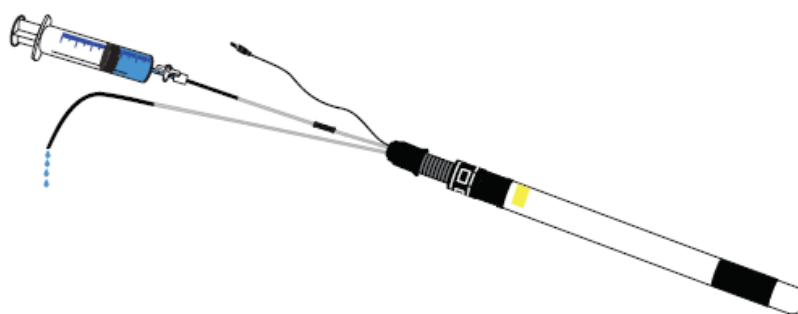
- **TEROS 32 tenziometar**

Senzori TEROS 32 mjere potencijal vode i temperaturu tla. Senzor je dizajniran za dugotrajna kontinuirana mjerenja i prvenstveno je predviđen robustan uređaj za zahtjevna terenska mjerenja. Potencijal vode mjeri se pomoću porozne keramičke čašice napunjene vodom na kraju senzora, koja je spojena na pretvarač apsolutnog tlaka. Radi kvalitetnijeg mjerenja i jednostavnijeg održavanja, TEROS 32 se ugrađuje pod kutom (α) od 10 ° do 80 ° u odnosu na horizontalnu. Ugradbeni položaj pod kutom ne remeti tipični protok vode i izbjegava stvaranje preferencijalnog protoka vode duž cijevi. Ovaj položaj također omogućuje pravilno punjenje keramičke čašice. Okomiti ili vodoravni položaj može zadržati mjehuriće zraka u keramičkoj čašici, što može utjecati na pouzdanost mjerenja. Ušteda na vremenu prilikom korištenja TEROS 32 tenziometra je mogućnost naknadnog punjenja cijevi bez potrebe izvlačenja uređaja iz tla (slika 28). Također, uređaj ima mogućnost mjerenja i pozitivnog i negativnog pritiska (METER, 2020). Osnovne značajke uređaja prikazane su u tabeli 5.



Slika 28: TEROS 32 tenziometar

(METER, n.d.)



Slika 29: Vanjsko punjenje cijevi TEROS 32 tenziometra

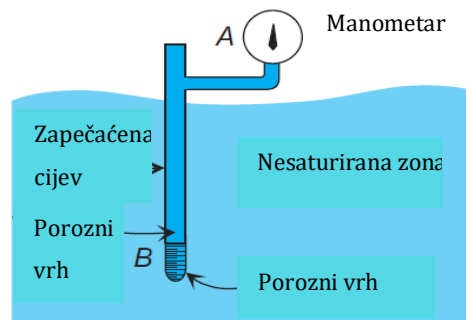
(METER, 2020)

Tabela 5: Osnovne značajke TEROS 32 tenziometra

Mjerne jedinice:	kPa
Raspon mjerenja:	-85 to +50 kPa
Točnost mjerenja:	± 0.15 kPa
Duljine:	40 cm, 80 cm, 120 cm
Promjer	2.5 cm
Mjerenje temperature:	-30 to +60 °C

3.3 Postupak ispitivanja

Prije ugradnje i korištenja standardnih T1 tenziometara, provedena je saturacija HAEV keramike na način da je tenziometar ostavljen preko noći potopljen u vodi, bez priključenog manometra i s praznom cijevi tenziometra. Prije ugradnje tenziometra u uzorak, cijev je ispunjena deaeriranom vodom 1 do 2 centimetra od gornjeg ruba cijevi, te je pričvršćen manometar. Shema za proračun pritiska vode u području keramičkog vrha tenziometra prikazana je na slici 30 : Manometar spojen na zabrtvljenu cijev mjeri tlak vode pri vrhu zapečaćene cijevi. Tlak u tlu uz keramički vrh izračunava se pretpostavljajući hidrostatske uvjete od manometra (točka A na slici 30) do keramičkog vrha (točka B na slici 30) (Fitts, 2013). Prije svake ugradnje izvršeno je nulto očitavanje od približno 4 kPa (slika 31), koje je kasnije korišteno za korekciju rezultata mjerenja. Mogući razlog tome, uz visinu stupca vode u cijevi tenziometra je i položaj samog analognog mjerača pritiska.



Slika 30: Shematski prikaz za proračun pritiska u točki B (Fitts, 2013)

$$h_B = h_A \quad (2)$$

$$= \frac{P_A}{\rho_w * g} + z_A$$



Slika 31: Korekcija rezultata mjerenja za 4kPa

Prvi set pokusa proveden je na način da su uzorci ugrađeni u posude određenog volumena i u njih su ugrađeni standardni T1 tenziometri. Pokusi su provedeni na uzorcima ugrađenima na istom stupnju zbijenosti materijala ($D_r = 50\%$), za dva različita početna stupnja saturacije ($S = 50\%$ i $S = 70\%$). Nakon toga, uzorci su prekriveni folijom radi sprječavanja evaporacije vode, te su rađena očitavanja s manometra do postizanja ravnotežnih uvjeta. Nakon dostizanja ravnotežnih uvjeta, uzorak je otvoren prema atmosferi kroz sljedeća 24h. Količina isparene vode određena je preko gubitka mase uzorka, te se na taj način inkrementalno odredila desorpcijska grana krivulje retencije vode. Nakon što je utvrđeno dostizanje rezidualnih uvjeta, započeta su inkrementalna mjerenja uz dodavanje određene količine vode preko vrha uzorka, s ciljem određivanja adsorpcijske grane retencijske krivulje. Na vrhu uzorka dodavana je određena količina vode da bi se postigao točno određeni stupanj saturacije, pri kojem se mjerila vrijednost matrične sukcije. Detalj ovih preliminarnih mjerenja prikazan je na slici 32.



Slika 32: Preliminarni pokusi za određivanje adsorpcijske i desorpcijske grane krivulje retencije standardnim T1 tenziometrima

Zatim je proveden drugi set pokusa. Mjerenja su provedena standardnim analognim T1 tenziometrima, na uzorcima zamiješanima na stupnjeve saturacije S 5%, 10%, 20%, 40%, 60% i 80%. Pokusi provedeni na ovako pripremljenim uzorcima, u idućem potpoglavlju na grafovima su označeni oznakom „mixed“. Pri ugradnji uzoraka u posudu uzet je u obzir volumen kojeg zauzima T1 tenziometar. Tenziometri su ugrađivani na točno određenu dubinu koja je odgovarala polovici visine uzorka. Nakon što je dosegnuta visina na kojoj je postavljen keramički vrh tenziometra, tenziometri su postavljeni u posudu s uzorkom te je preostali dio materijala do konačne visine uzorka zbijan oko tenziometarske cijevi. U svim slučajevima, ugradnja je vršena u slojevima metodom potkompakcije (*eng. undercompaction method*). Nakon ugradnje uzorak je prekriven folijom zbog sprječavanja evaporacije. Na uzorcima manjeg stupnja zbijenosti $D_r = 30\%$ i $D_r = 50\%$ uočena je pojava slobodne vode na površini uzorka za stupanj saturacije $S = 80\%$, te nije bilo moguće očitati vrijednosti sukcije. Detalj uzorka prikazan je na slici 33. Ugrađeni uzorci ostavljeni su 24h za postizanje ravnotežnih uvjeta.



Slika 33: Pojava slobodne vode na uzorku pijeska s ugrađenim standardnim T1 tenziometrom

Posljednji set pokusa proveden je korištenjem TEROS 32 tenziometara. Provedeno je ukupno devet pokusa na uzorcima relativne zbijenosti materijala $D_r = 50\%$, stupnja saturacije, S 5%, 10%, 20%, 35%, 50%, 65% i 80%. Način ugradnje isti je kao i kod standardnih T1 tenziometara. Uzorci su također nakon ugradnje prekriveni folijom zbog sprječavanja procesa evaporacije (slika 34). Od provedenih devet pokusa, dva pokusa provedena su na način da su ugrađeni na stupnjeve saturacije $S = 20\%$ i $S = 50\%$, te im je nakon postizanja ravnotežnih uvjeta, preko vrha dodana količina voda za ostvarivanje stupnja saturacije $S = 35\%$ i $S = 65\%$. S obzirom na mogućnost kontinuiranog mjerenja pritiska, cilj pokusa provedenih TEROS 32 tenziometrima bio je odrediti razliku očitavanja između uzoraka koji su unaprijed zamiješani na određeni stupanj saturacije i uzoraka kojima je preko vrha dodavana određena količina vode da bi se postigao neki stupanj saturacije. Digitalni zapis provođenja pokusa prikazan je na slici 36, na apsici se prikazuje vrijeme, a na ordinati vrijednosti matrične sukcije. Na slici se, također može vidjeti da uređaj vrši kontinuirano mjerenjenje. Na slici su 36 nalaze se dvije linije (crvena i plava) koje označavaju paralelno mjerenje dva ugrađena TEROS 32 tenziometra. Na temelju digitalnog zapisa podataka može se vidjeti da je

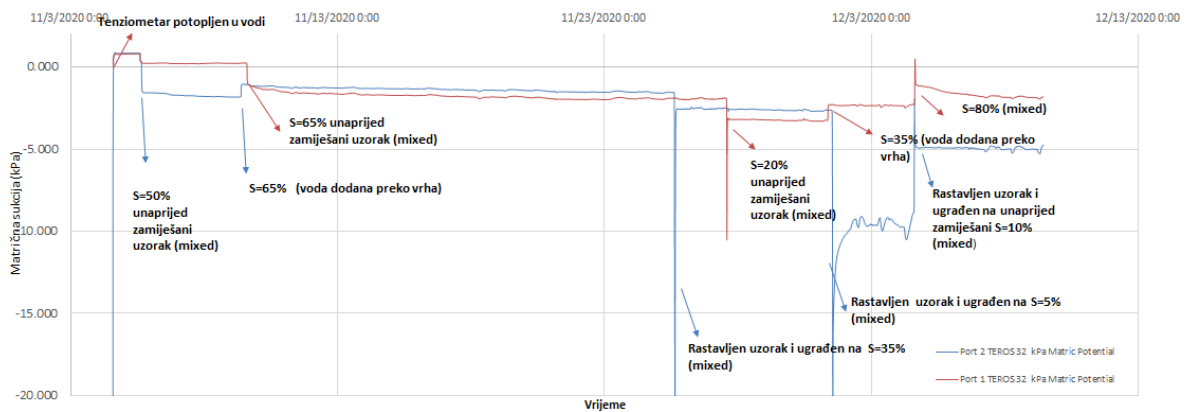
vrijeme potrebno za postizanje ravnotežnih uvjeta TEROS 32 tenziometrom otprilike sat vremena.



Slika 34: Ugrađeni TEROS 32 tenziometar u uzorak



Slika 35: Uzorak s ugrađenim stabdardnim T1 tenziometrom (lijevo) i uzorak s ugrađenim TEROS 32 tenziometrom (desno)

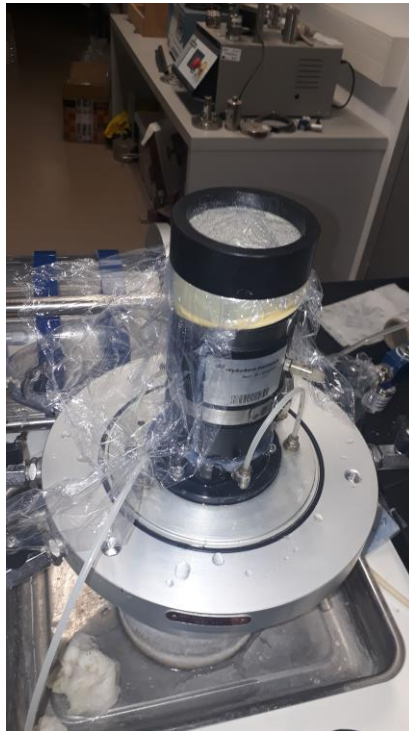


Slika 36: Digitalni zapis TEROS 32 tenziometra pokazuje kontinuirano mjerenje

U troosni uređaj s dvostrukom ćelijom za ispitivanje nesaturiranih uzoraka tla, ugrađen je uzorak početne vlažnosti, $w=5.20\%$, što odgovara stupnju saturacije $S=20\%$. Visina uzorka iznosi 13.15 cm, promjer 7 cm. Relativna zbijenosti uzorka iznosi $D_r = 80\%$. Postupak ugradnje je sljedeći: linija za pozadinski pritisak (*eng. back pressure line*) i postolje (*eng. base pedestal*) ispiru se odzračenom vodom i provjerava se da nema curenja, zatim se očisti baza ćelije (*eng. cell base*). Idući korak je postavljanje gumene membrane preko baze. Membrana se pričvršćuje uz pomoć alata za postavljanje dva "O"

prstena (*eng. „O“ rings*). Prvi "O" prsten postavlja se preko gumene membrane da bi ju se pričvrstilo na bazu postolja. Zatim se membrana presavija preko prvog postavljenog prstena, a drugi prsten koristi se da pričvrsti membranu preko prvog postavljenog prstena. Idući korak je postavljenje okvira za ugradnju uzorka, okvir se sastoji od dva dijela koja se pričvrste metalnim okruglim kopčama, ali prije nego se okvir zakopči, na spojeve okvira postavlja se tanki sloj silikonske masti. Nakon postavljenog okvira, preko njega se presavija membrana, za bolje prijanjanje, okvir se spaja na vakuumsku pumpu. Nakon što je ugrađen uzorak metodom potkompakcije prema Ladeu (Lade, 2016), na vrh uzorka postavlja se filter papir i porozni kamen. „O“ ring se postavlja na gornju kapu (*eng. top cap*), koja se postavlja na porozni kamen. Višak membrane sada se povlači preko gornje kape i s drugim „O“ prstenom se pričvršćuje. Posljednji korak je oprezno uklanjanje okvira. Potrebno je pripaziti da nema viška materijala na bazi ćelije, za to je poslužila prozirna folija. Detalj ugradnje uzorka prikazan je na slici 37, dok slika 38 prikazuje ćeliju za vrijeme mjerenja krivulje retencije vode.

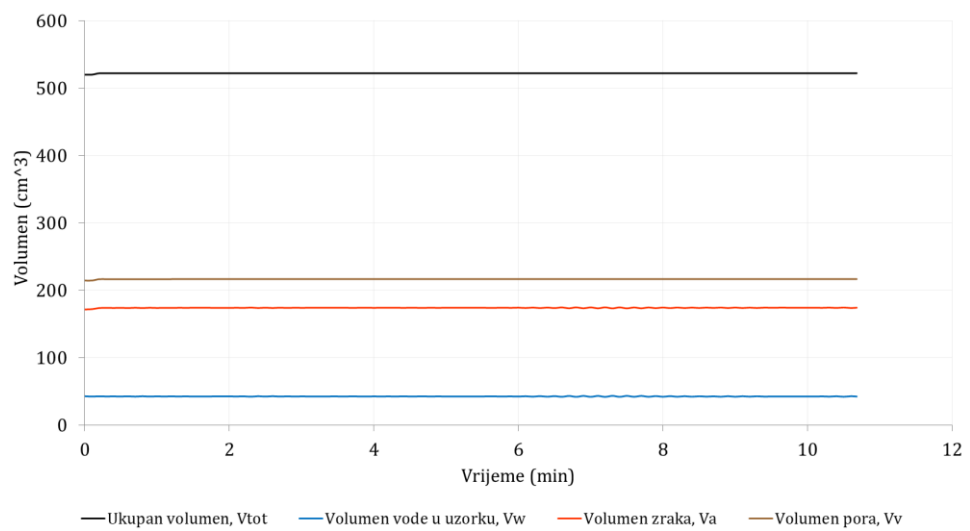
Pokus je proveden koristeći metodu translahiranih osi. U trenutku pokretanja pokusa, svi ventili na uređaju su zatvoreni, što pokazuje slika 39, gdje se vidi da nema nikakve promjene volumena.



Slika 37: Detalj ugrađenog uzorka u troosni uređaj s dvostrukom ćelijom

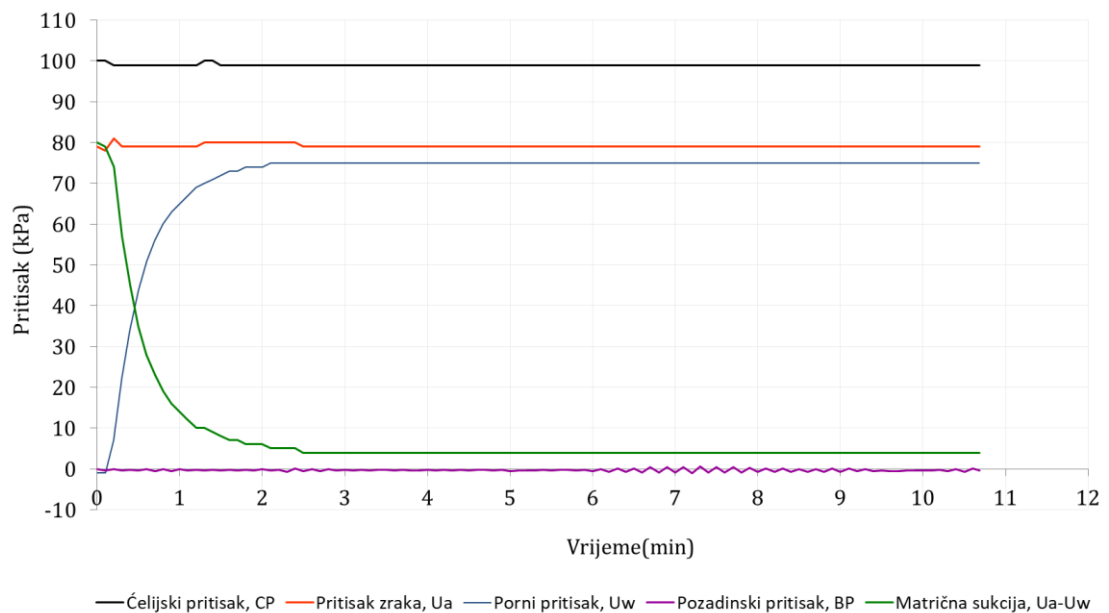


Slika 38: Prikaz ćelije za vrijeme mjerenja krivulje retencije

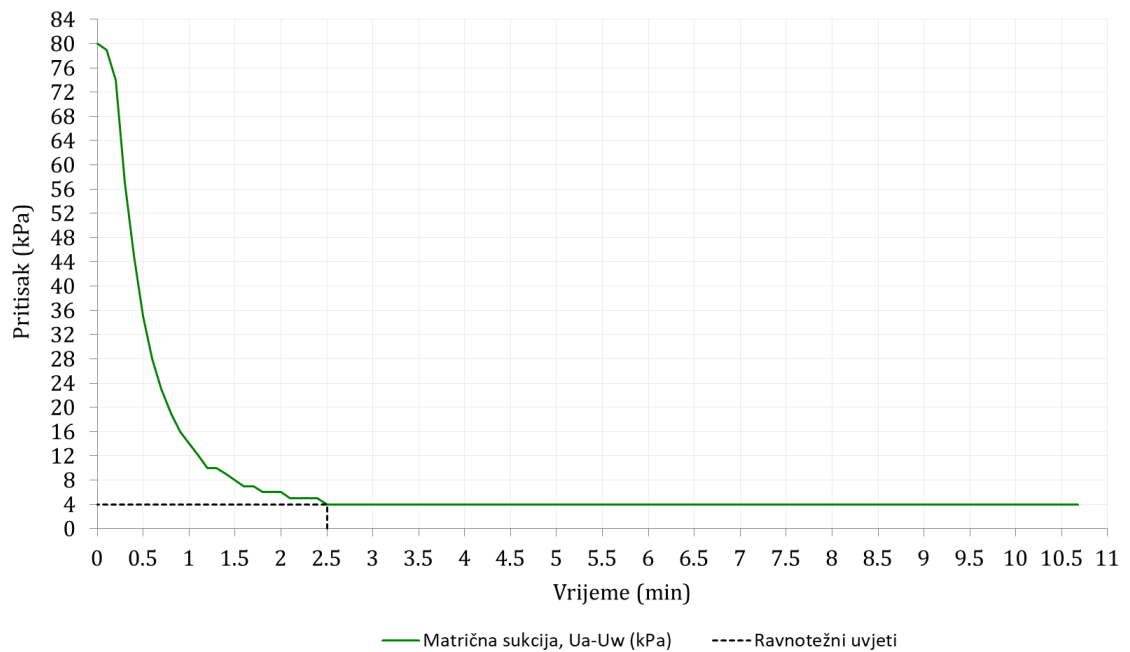


Slika 39: Podaci o mjerenim volumenima u fazi mjerenja početne sukcije u uzorku za vlažnost jednaku vlažnosti pri ugradnji $w = 5.2\%$

U sljedećoj fazi povećan je pritisak zraka, u_a . Na slici 40 prikazan je dijagram odvijanja pokusa, ćelijski pritisak, CP je na konstantnih 100 kPa, pritisak zraka, u_a postavljen je na vrijednost od 80 kPa, porni pritisak uzorka, u_w raste do vrijednosti od 76 kPa. Razlika između pritiska zraka i pritiska vode predstavlja vrijednost matrične sukcije koja za stupanj saturacije, $S = 20\%$ iznosi 4 kPa. Vrijeme potrebno za postizanje ravnotežnih uvjeta na ispitivanom materijalu pijeska iznosi 2.5 min (slika 41). Međutim, u narednim fazama mjerenja pokazalo se da je izmjerena vrijednost matrične sukcije za početnu vlažnost uzorka i jedini podatak kojeg se može dobiti na ispitivanom uzorku pomoću korištene opreme. Razlog tome je oblik krivulje retencije ispitivanog pijeska te nemogućnost kontroliranja vrlo malih diferencijalnih pritiska zraka i vode korištenjem trosonog uređaja s dvostrukom ćelijom, DCTX (*eng. double cell triaxial*).



Slika 40: Podaci o mjerenim pritiscima u fazi mjerenja matrične sukcije u uzorku za vlažnost jednaku početnoj vlažnosti pri ugradnji $w = 5.2\%$



Slika 41: Vrijeme potrebno za ostvarivanje ravnotežnih uvjeta i konstantne vrijednosti matrične sukciije u troosnom uređaju s dvostrukom ćelijom

Postupak procjeđivanja u troosnom uređaju obično se sastoji od sljedećih faza: ugradnja uzorka, primjena ćelijskog i pozadinskog tlaka, saturacija pozadinskim pritiskom, konsolidacija, te ispitivanje hidrauličke vodljivosti. Postupak ugradnje isti je kao kod dvostruke ćelije. Sve komponente triaksijalnog sustava kalibrirane su prije ispitivanja. Korištena je metoda s konstantnom razlikom hidrauličkog potencijala na vrhu i dnu uzorka, odnosno razlika između pozadinskog (*eng. Back Pressure*) i baznog pritiska (*eng. Base Pressure*). Uzorci su saturiranim inkrementalnim povećanjem ćelijskog i pozadinskog pritiska. Na taj se način postupno smanjuje volumen zraka koji se nalazi u porama. Uspješnost saturacije provjerava se preko vrijednosti B , ($B = \Delta U / \Delta \sigma_3$). Nakon saturacije uzorak se izotropno konsolidira. Tijekom pokusa mjeri se protok vode. Saturirani koeficijent procjeđivanja, k_s određen je na intervalima gdje je promjena volumena uzrokovana pozadinskim i baznim pritiskom linearna, odnosno kada su volumen vode koji ulazi u uzorak i volumen vode koji izlazi jednaki.

4 REZULTATI ODREĐIVANJA KRIVULJE RETENCIJE VODE

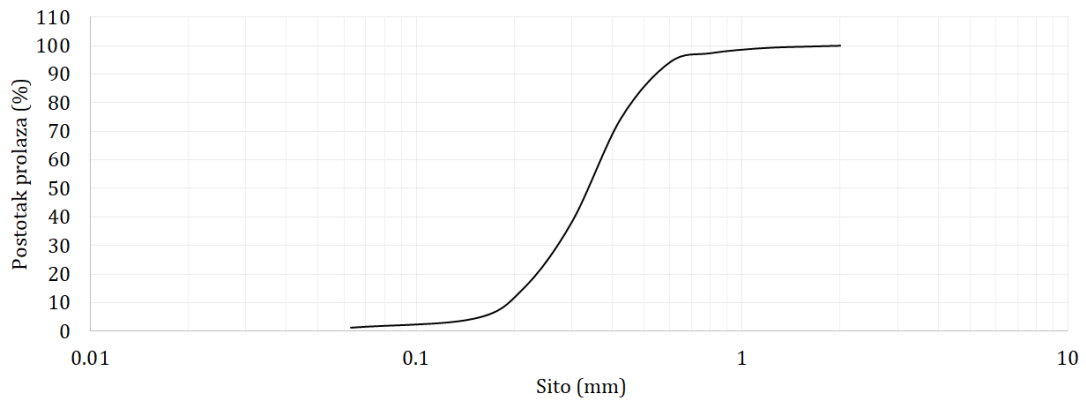
U nastavku su prikazani rezultati direktnih metoda mjerenja matrične sukcije i metoda procjene, koje su korištene za određivanje krivulje retencije ispitivanog pijeska.

4.1 Osnovne značajke ispitivanog pijeska

Eksperimentalna ispitivanja provedena su na materijalu pijeska, koji se koristi u sklopu HRZZ projekta, „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja, ModLandRemSS“. Osnovne značajke materijala prikazane su u tabeli 6, na slici 42 prikazana je granulometrijska krivulja.

Tabela 6: Osnovne značajke ispitivanog materijala:

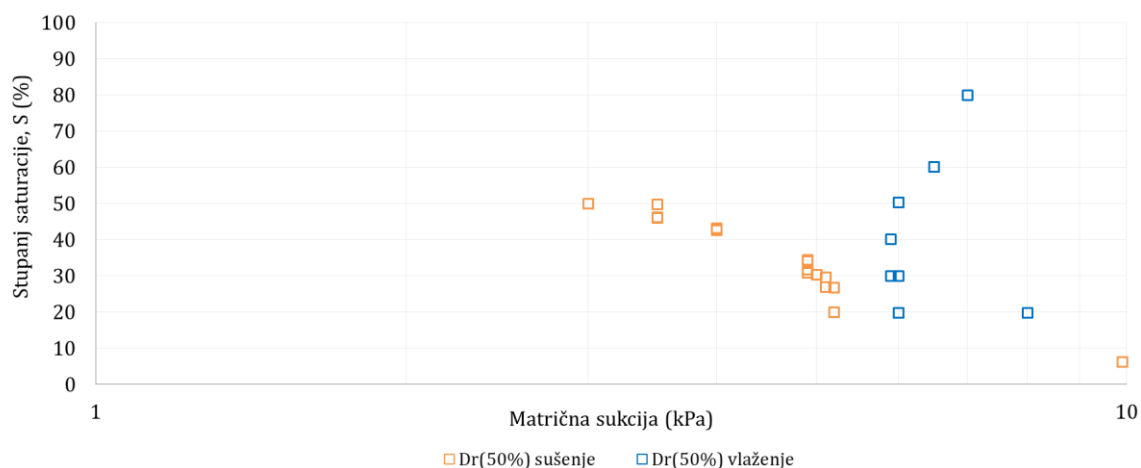
Materijal:	pijesak
e_{max}	0.919
e_{min}	0.641
G_s	2.7
D_{10} (mm)	0.195
D_{30} (mm)	0.27
D_{60} (mm)	0.368
P_{200} (%)	1.24294
C_u	1.8947
C_c	1.0657



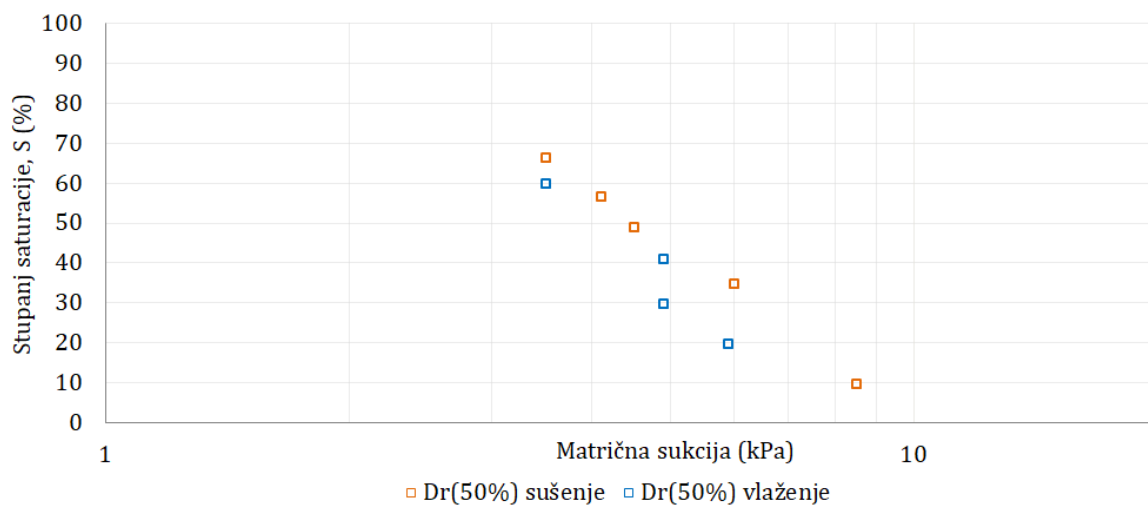
Slika 42: Granulometrijska krivulja pijeska

4.2 Rezultati određivanja krivulje retencije

Rezultati mjerenja standardnim T1 tenziometrom, na uzorku relativne zbijenosti, $D_r = 50\%$, upućivali su na moguće probleme s pojavom kavitacije uslijed dugotrajne izloženosti atmosferskim uvjetima pri maloj vlažnosti uzorka, te na moguću nehomogenu raspodjelu vlažnosti po visini uzorka uslijed dodavanja vode s vrha uzorka. Mjerenja za određivanje adsorpcijske grane retencijske krivulje na ovom uzorku značajno su odstupala od očekivanih vrijednosti (slika 43). Rezultati dobiveni preliminarnim mjerenjima na uzorku s početnim stupnjem saturacije, $S = 70\%$, prikazani su na slici 44.



Slika 43: Rezultati preliminarnih mjerenja standardnim T1 tenziometrom, $D_r = 50\%$, $S = 50\%$



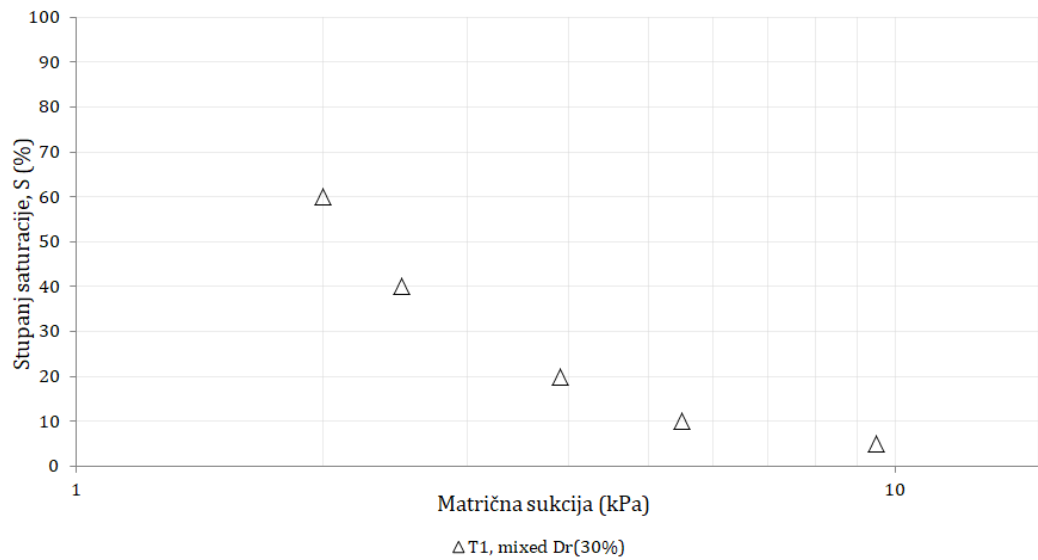
Slika 44: Rezultati preliminarnih mjerenja standardnim T1 tenziometrom, $D_r = 50\%$, $S = 70\%$

S obzirom na uočene probleme prilikom mjerenja adsorpcijske i desorpcijske grane krivulje retencije vode standardnim T1 tenziometrom, sljedeći pokusi provedeni su na unaprijed pripremljenim uzorcima pijeska, zamiješanim na određenom stupnju saturacije. Svi mjereni rezultati prikazani su u tabeli 7. Plavo su označeni podaci dobiveni mjerenjem matrične sukucije u uzorku nakon dodane vode preko vrha uzorka. Grafovi su grupirani po vrijednostima relativne zbijenosti, D_r .

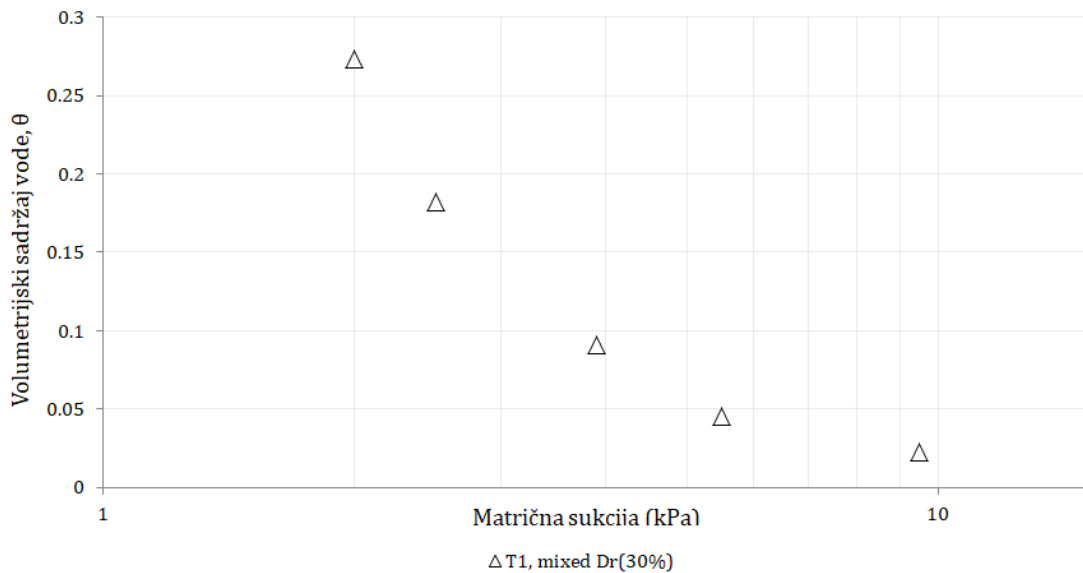
Tabela 7: Izmjereni podaci standardnom T1 tenziometru, TEROS 32 tenziometru i DCTx-u:

Tip uređaja	D_r (%)	ψ_m (kPa)	S (%)	w (%)	θ ($\frac{cm^3}{cm^3}$)
T1	30	9,5	5	1,5474	0,0228
T1	30	5,5	10	3,0948	0,0455
T1	30	3,9	20	6,1896	0,0910
T1	30	2,5	40	12,3793	0,1821
T1	30	2	60	18,5689	0,2731
T1	50	10	5	1,4444	0,02191
T1	50	5,5	10	2,8889	0,04382
T1	50	3,9	20	5,7778	0,08764
T1	50	2,9	40	11,5556	0,1753
T1	50	2	60	17,3333	0,2629
T1	80	12	5	1,29	0,0205
T1	80	6	10	2,58	0,0411
T1	80	4	20	5,16	0,0821
T1	80	2,9	40	10,32	0,1642
T1	80	2	60	15,48	0,2464
T1	80	1,9	80	20,64	0,3285
TEROS 32	50	9,64	5	1,51	0,0219
TEROS 32	50	5,03	10	3,28	0,0438
TEROS 32	50	3,22	20	5,77	0,0876
TEROS 32	50	2,5	35	10,57	0,1533
TEROS 32	50	2,39	35	10,1	0,1533
TEROS 32	50	1,85	50	15,11	0,2191
TEROS 32	50	1,73	65	18,75	0,2848
TEROS 32	50	1,55	65	19,7	0,2848
TEROS 32	50	1,8	80	23,68	0,3506
DCTX	80	4	20	5,2	0,0825

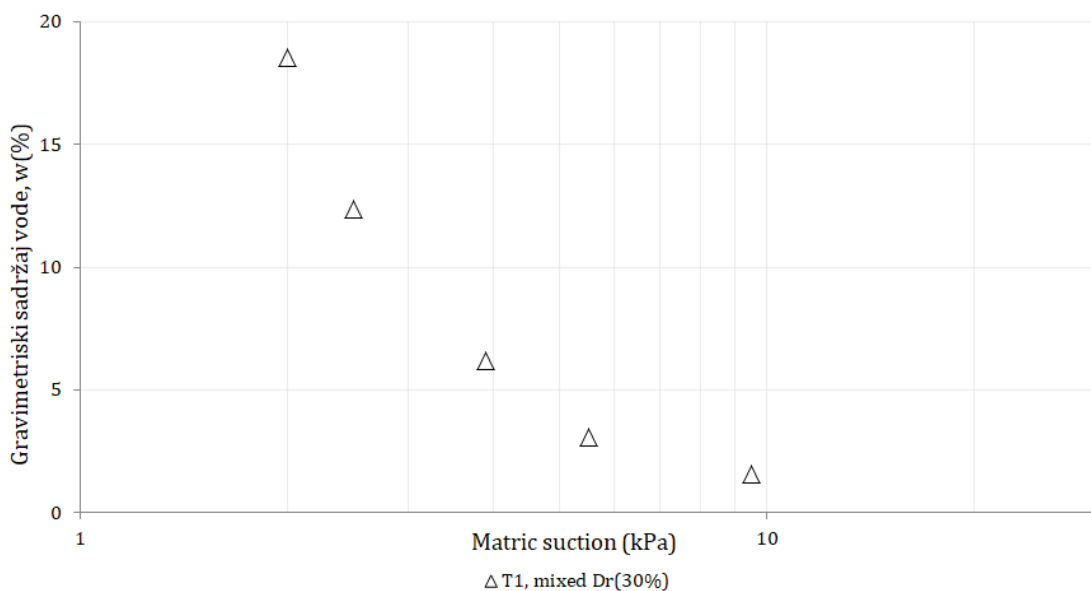
Na sljedećim slikama prikazani su rezultati dobiveni eksperimentalnim mjerenjima. Na slikama 45, 46 i 47 nalazi se grafički prikaz mjerenja krivulje retencije vode za stupanj zbijenosti $D_r = 30\%$. Rezultati su prikazani u obliku ovisnosti stupnja saturacije, S , volumetrijskog sadržaja vode, θ i gravimetrijskog sadržaja vode, w o matričnoj sukuciji u tlu



Slika 45: Ovisnost stupnja saturacije, S o matričnoj sukuciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 30\%$



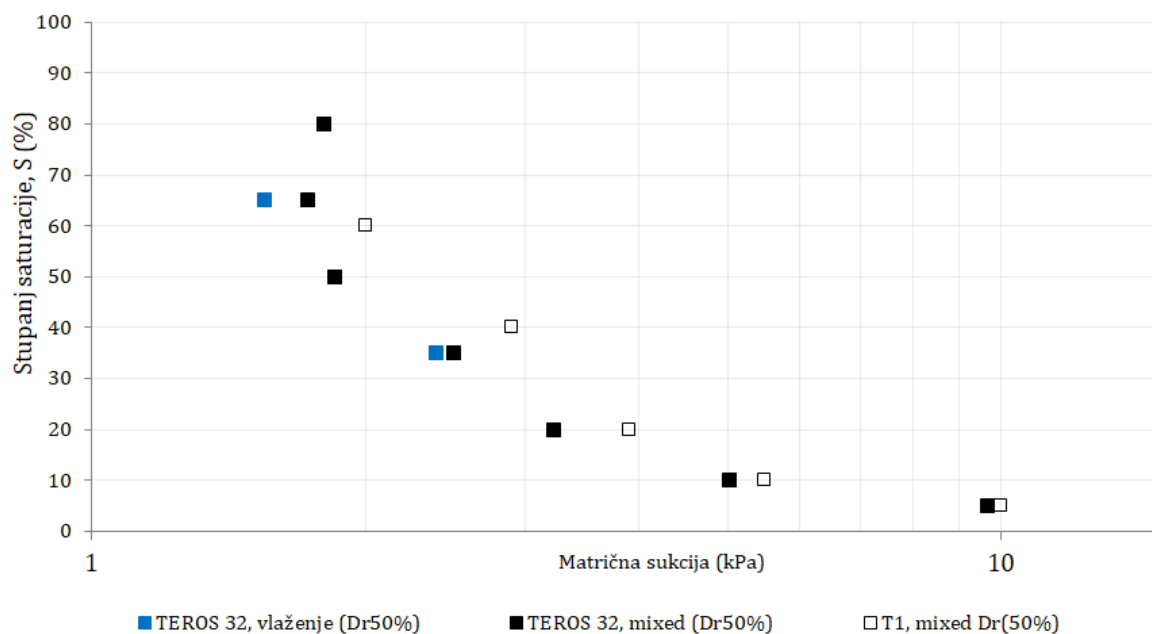
Slika 46: Ovisnost volumetrijskog sadržaja vode, θ o matričnoj sukciiji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 30\%$



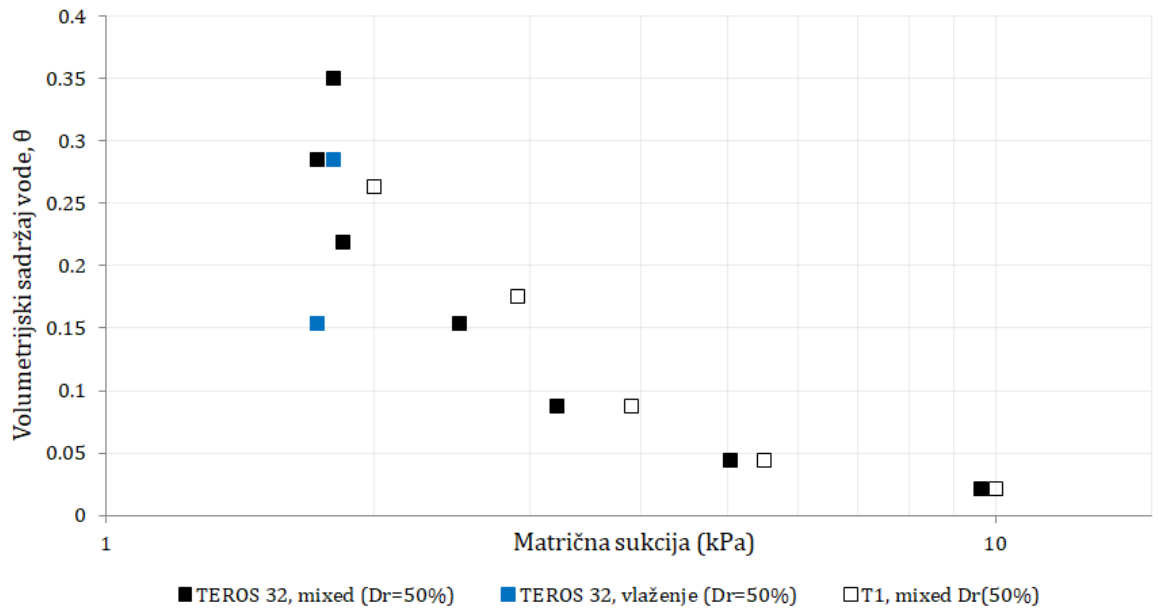
Slika 47: Ovisnost gravimetrijskog sadržaja vode, w o matričnoj sukciiji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 30\%$

Na slikama 48, 49 i 50 prikazani su rezultati za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 50\%$, također u obliku zavisnosti stupnja saturacije, S , volumetrijskog sadržaja, θ i

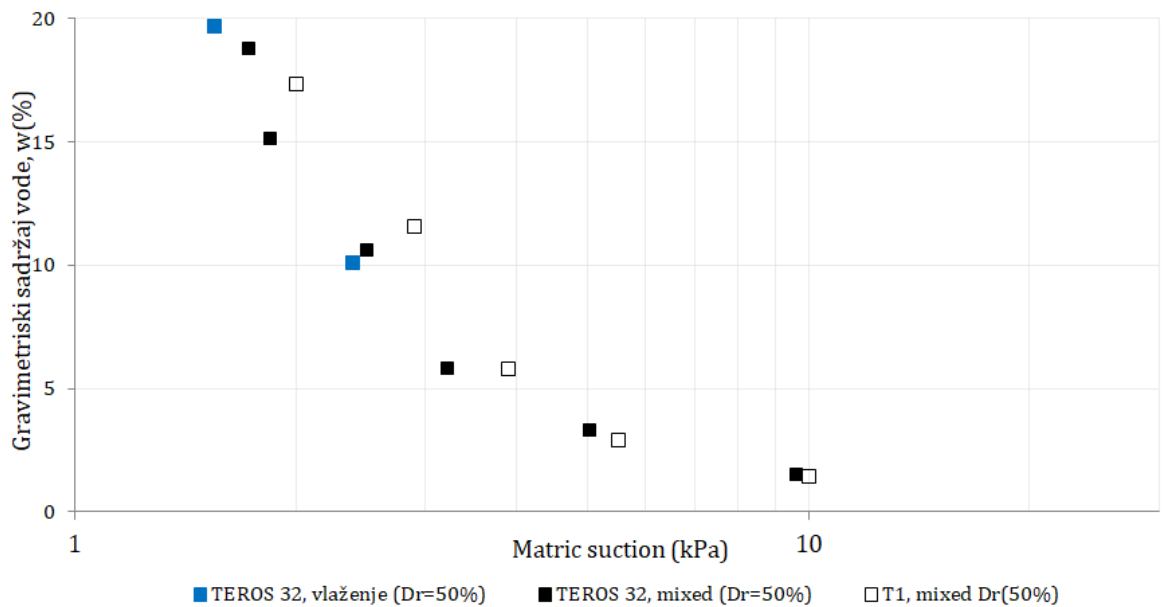
gravimetrijskog sadržaja, w s matičnom sukcijom. Na slikama su prikazani rezultati standardnih T1 tenziometara i digitalnih TEROS 32 tenziometara. Oznakom „mixed“ označeni su uzorci koji su unaprijed zamiješani na početni određeni stupanj saturacije, S .



Slika 48: Ovisnost stupnja saturacije, S o matičnoj sukciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 50\%$.



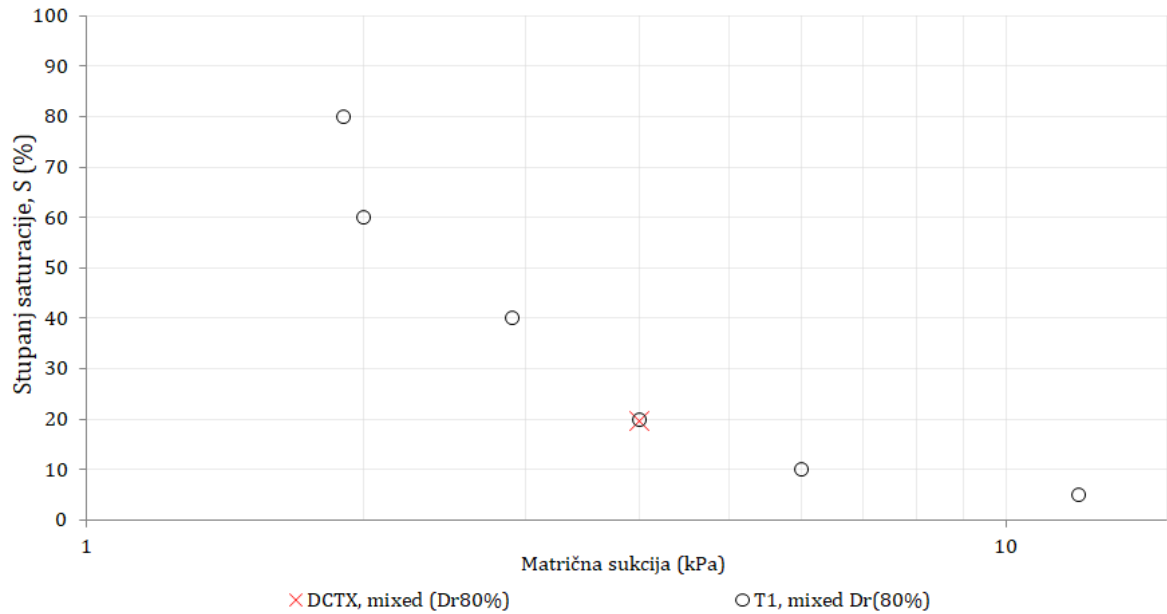
Slika 49: Ovisnost volumetrijskog sadržaja vode, θ o matičnoj sukuciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 50\%$



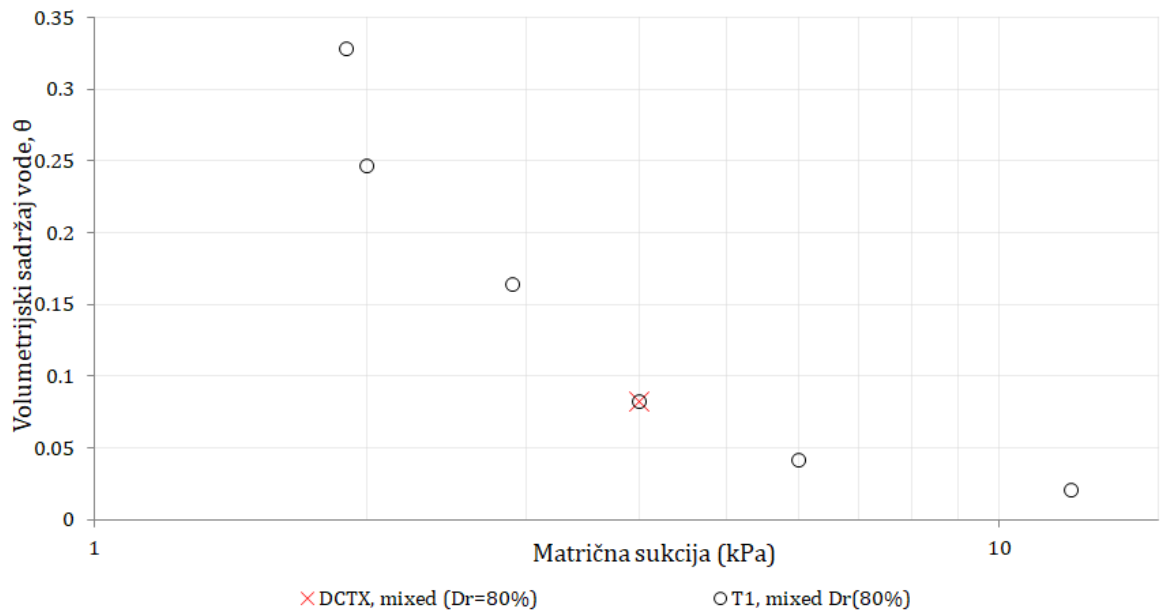
Slika 50: Ovisnost gravimetrijskog sadržaja vode, w o matičnoj sukuciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 50\%$

Eksperimentalni podaci dobiveni na provedenim pokusima za stupanj zbijenosti materijala, $D_r = 80\%$ prikazani su na slikama 51, 52 i 53. Na slikama su prikazani rezultati dobiveni mjerenjem standardnim T1 tenziometrom i troosnim uređajem s

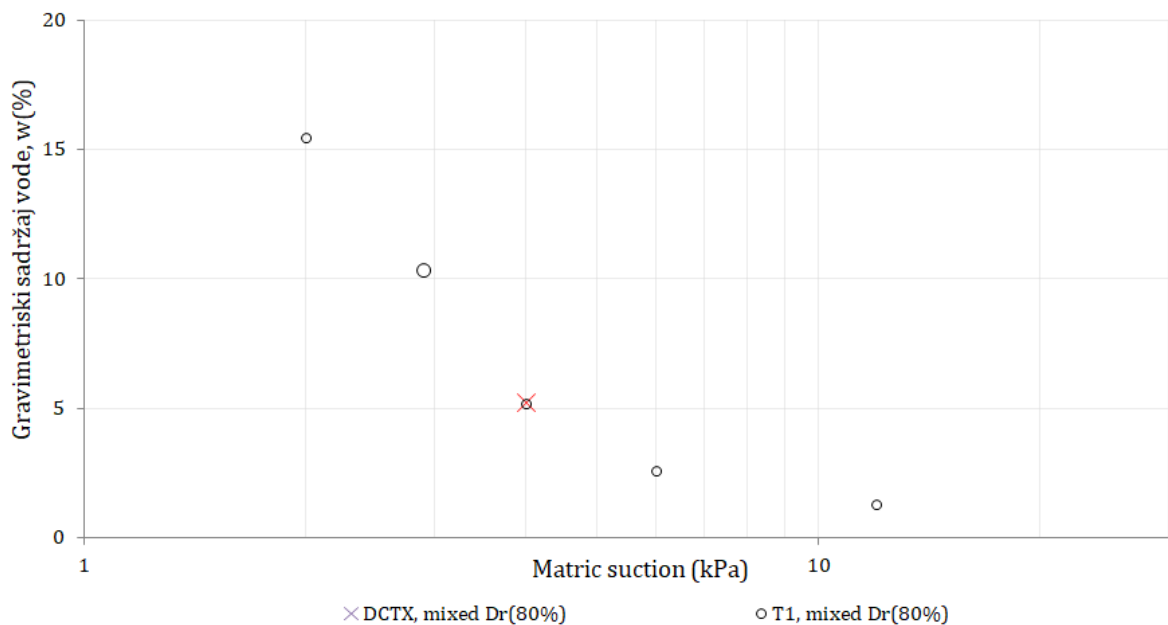
dvostrukom ćelijom. Rezultati su prikazani u ovisnosti stupnja saturacije, S , volumetrijskog sadržaja vode, θ i gravimetrijskog sadržaja vode, w o matričnoj sukcionju. Oznaka „mixed“ označava da su uzorci prije provođenja pokusa zamiješani na početni stupanj saturacije.



Slika 51: Ovisnost stupnja saturacije, S o matričnoj sukcionju za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 80\%$.



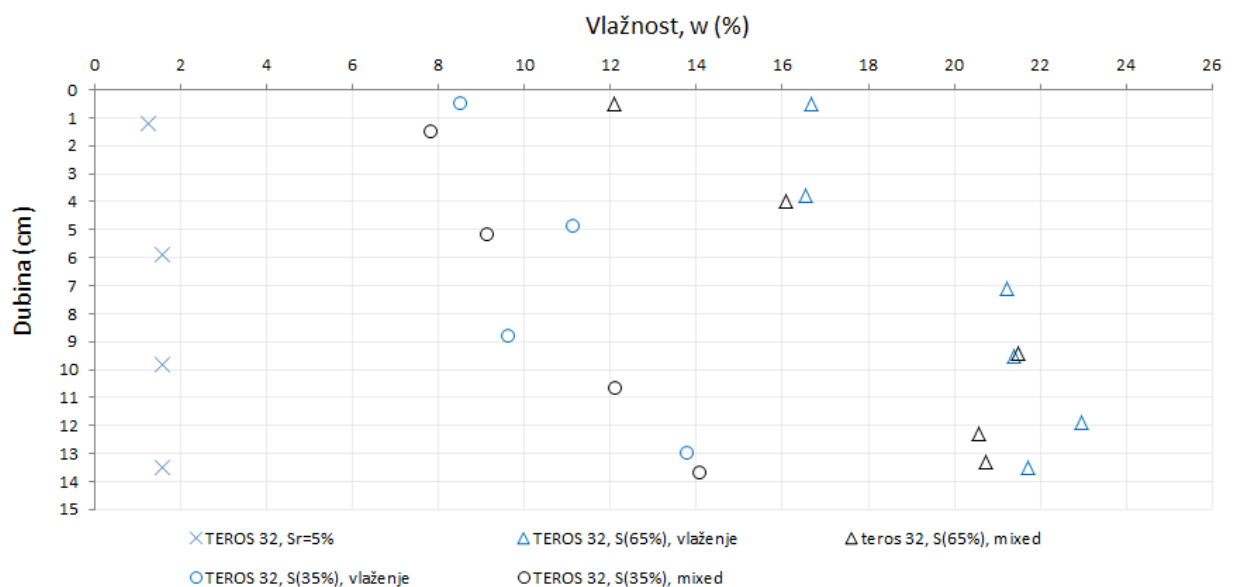
Slika 52: Ovisnost volumetrijskog sadržaja vode, θ o matričnoj sukuciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 80\%$.



Slika 53: Ovisnost gravimetrijskog sadržaja vode, w o matričnoj sukuciji za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 80\%$.

S obzirom na uočene probleme kod preliminarne serije pokusa, nakon što je svaki pokus s analognim T1 i digitalnim TEROS 32 tenziometrima dovršen, uzorci materijala korištenih za mjerenje TEROS 32 tenziometrima, uzeti su s različitih dubina

posude s ciljem procijene homogenosti raspodjele vlažnosti po visini uzoraka. Rezultati označeni oznakom „mixed“ odnose se uzorke zamiješene na određeni stupanj saturacije prije ugradnje tenziometra. Rezultati prikazani na slici 54 pokazuju kako se vlažnost po visini uzorka povećava s porastom dubine, osim za slučaj uzorka s najnižim stupnjem saturacije, $S=5\%$ gdje je vlažnost otprilike konstantna po čitavoj visini uzorka. Plavim markerima ozačeni su uzorci kojima je dodavana voda preko vrha, iz tog razloga imaju veću vlažnost na manjim dubinama. Razlika između rezultata može biti iz nekoliko razloga, jedan od razloga je neravnomjerno dodavanje vode, drugi razlog je granulometrijska krivulja ovog materijala, najveća vlažnost pri dnu posude dokazuje da materijal ne zadržava vodu, već da se voda kroz pore materijala procijedila do dna posude. U poglavlju 5.5 prikazane su vrijednosti dobivenih koeficijenata procjeđivanja.

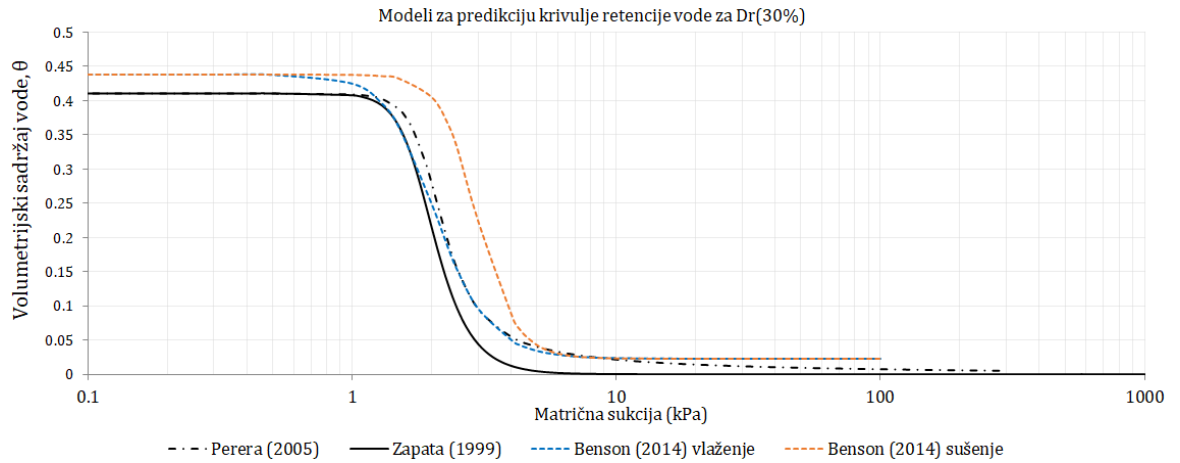


Slika 54: Prikaz promjene vlažnosti po dubini uzoraka

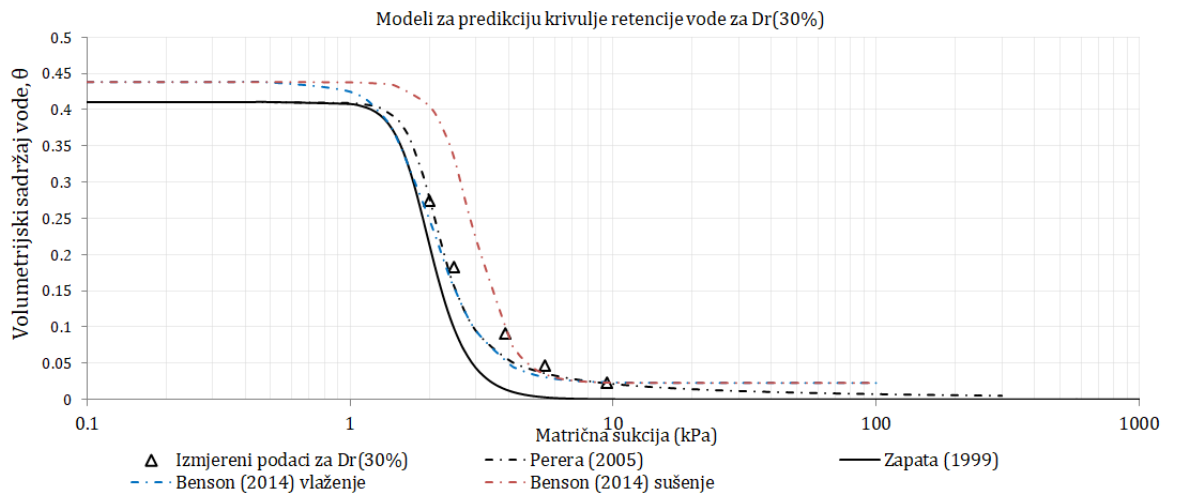
4.3 Rezultati modela za procjenu krivulje retencije vode

Na slikama 55, 57 i 59 su grafički prikazani predikcijski modeli za procjenu krivulje retencije vode, posebno za $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$. Ideja je bila metodom vizualizacije odrediti koji modeli najbolje predviđaju krivulju retencije ispitivanog pijeska. Korišteni modeli pojašnjenji su u potpoglavlju 2.1.2. Na slici 56 nalaze se svi

eksperimentalni podaci dobiveni korištenjem standardnih T1 tenziometara uklopljeni s odgovarajućim predikcijskim modelima. Na temelju prikazanih rezultata vidi se da model Perera (2005) najbolje predviđa ponašanje ispitivanog pijeska. Svi prikazani rezultati su u ovisnosti volumetrijskog sadržaja vode (θ), i matrične sukcije, $u_a - u_w$.

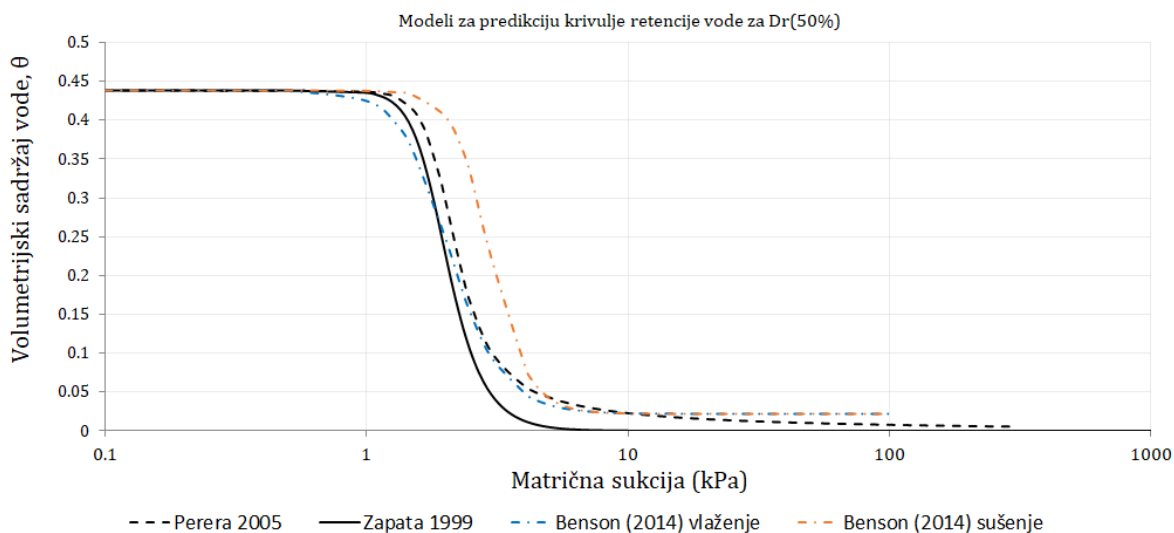


Slika 55: Modeli za predikciju krivulje retencije vode za stupanj zbijenosti materijala $Dr(30\%)$

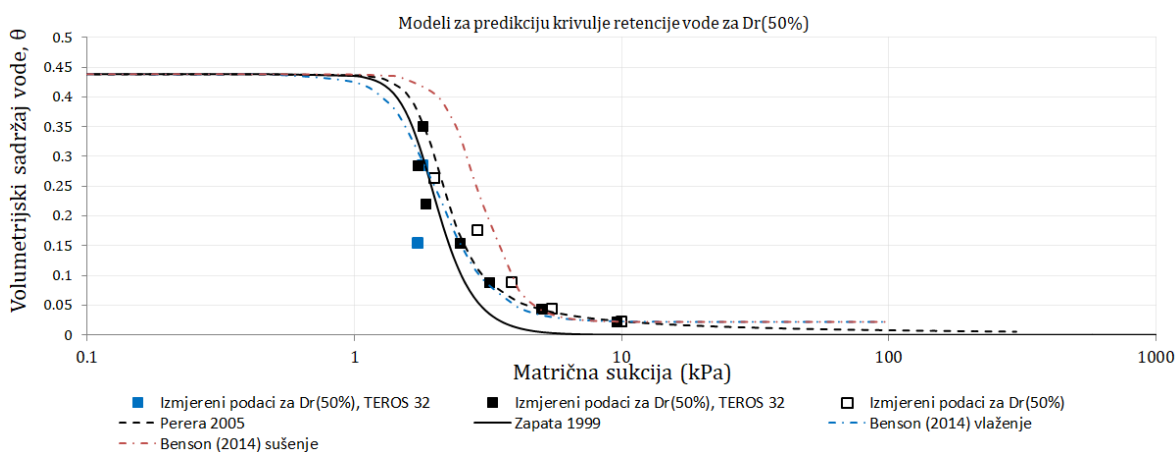


Slika 56: Mjereni podaci za $Dr(30\%)$ u usporedbi s modelima za predikciju krivulje retencije vode

Na slici 57 prikazani su modeli za predikciju krivulje retencije za zbijenost materijala $D_r=50\%$. Slika 58 prikazuje eksperimentalne podatke dobivene korištenjem standardnih T1 i TEROS 32 tenziometara. Rezultatima, također, najbolje odgovara opisani model Perera (2005).

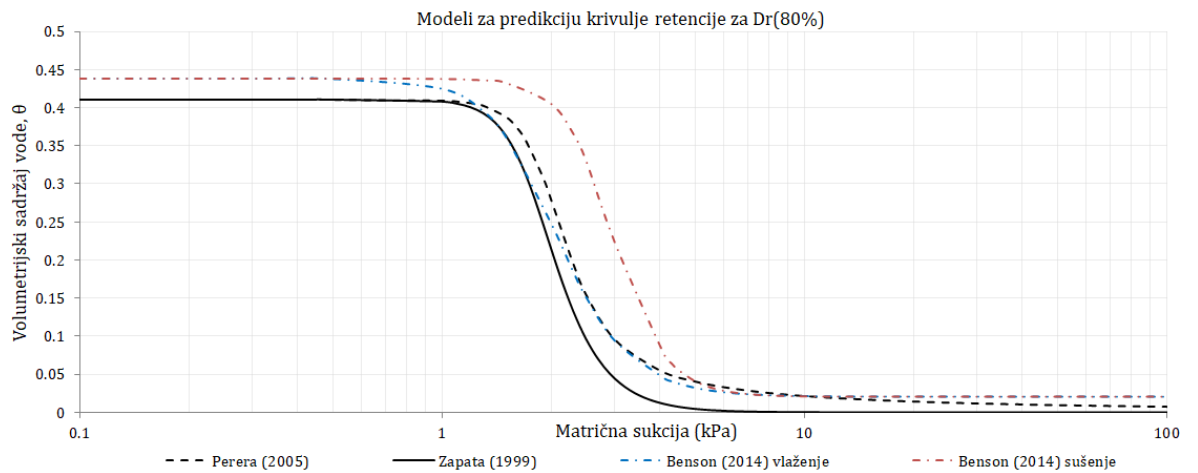


Slika 57: Modeli za predikciju krivulje retencije vode za stupanj zbijenosti materijala $D_r(50\%)$

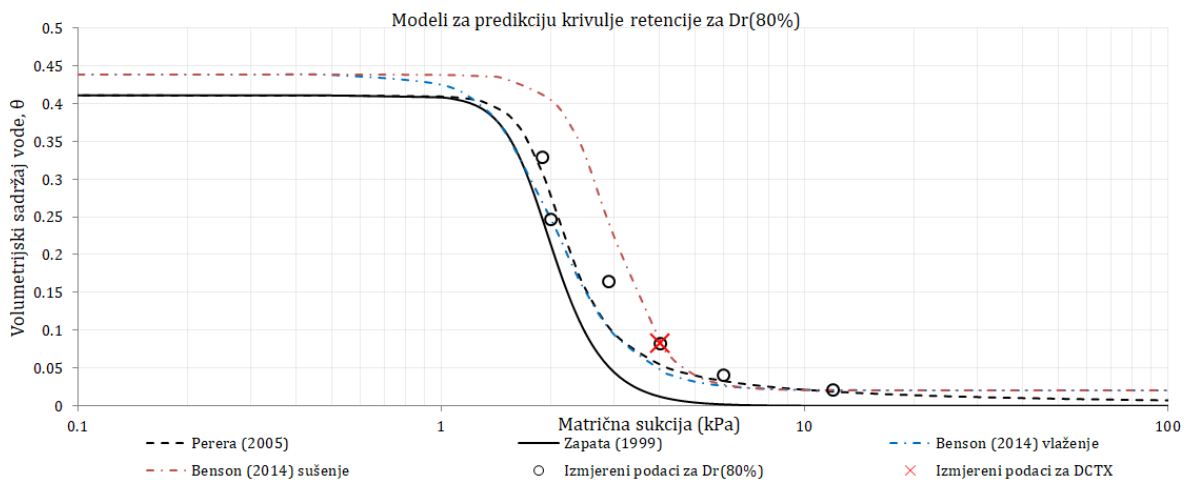


Slika 58: Mjereni podaci za $D_r(50\%)$ u usporedbi s modelima za predikciju krivulje retencije vode

Na slici 59 prikazani su modeli za predikciju krivulje retencije vode za stupanj zbijenosti materijala $D_r = 80\%$. Slika 60 prikazuje eksperimentalne podatke dobivene korištenjem standardnih T1 tenziometara i troosnog uređaja s dvostrukom ćelijom.



Slika 59: Modeli za predikciju krivulje retencije vode za stupanj zbijenosti materijala $Dr(80\%)$



Slika 60: Mjereni podaci za $Dr(80\%)$ u usporedbi s modelima za predikciju krivulje retencije vode

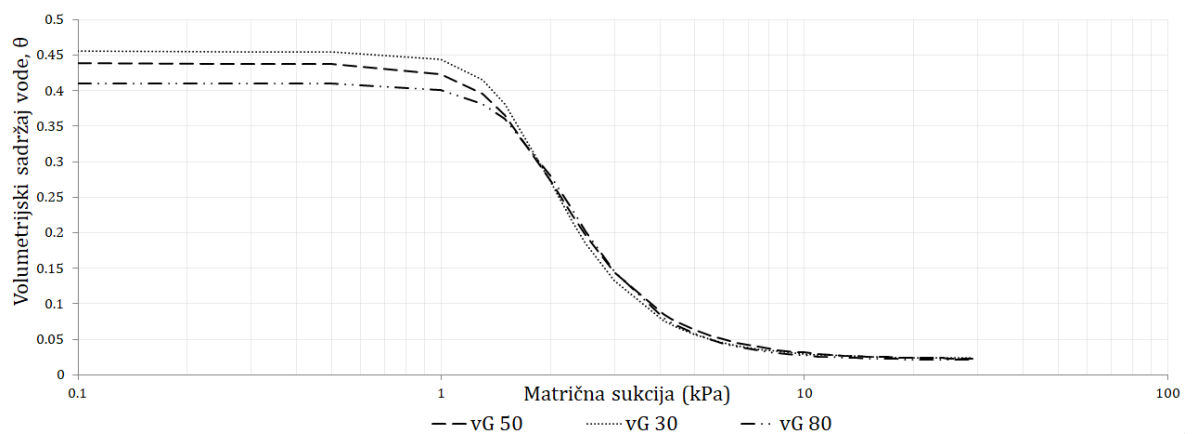
Na temelju prikazanih modela za predikciju krivulje retencije vode, može se vidjeti da svi korišteni modeli dobro opisuju ponašanje ispitivanog pijeska, međutim model Perera et al. (2005), prikazan isprekidanom, crnom linijom najbolje opisuje krivulju retencije vode ispitivanog pijeska.

4.4 Određivanje parametara van Genuchtenove jednadžbe krivulje retencije

Za određivanje van Genuchtenovih parametara krivulje retencije vode ispitivanog pijeska korištena je nelinearna regresija rezultata dobivenih eksperimentalnim mjerenjem pomoću programskog dodatka, Alat za rješavanje, (*eng. Solver*) programa Microsoft Excel. Dobiveni van Genuchtenovi parametri jednadžbe krivulje retencije, za zbijenosti materijala $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$, prikazani su u tabeli 8. Na slikama 61, 62 i 63 prikazana je krivulja retencije dobivenih van Genuchtenovih parametara pijeska.

Tabela 8: van Genuchtenovi parametri dobiveni nelinearnom regresijom

Koeficijent pora e (/)	θ_s	θ_r	α	n	m
0,836	0,455	0,023	1,677	5,414	0,430
0,78	0,438	0,022	1,746	4,6	0,476
0,697	0,411	0,021	1,959	4,603	0,544



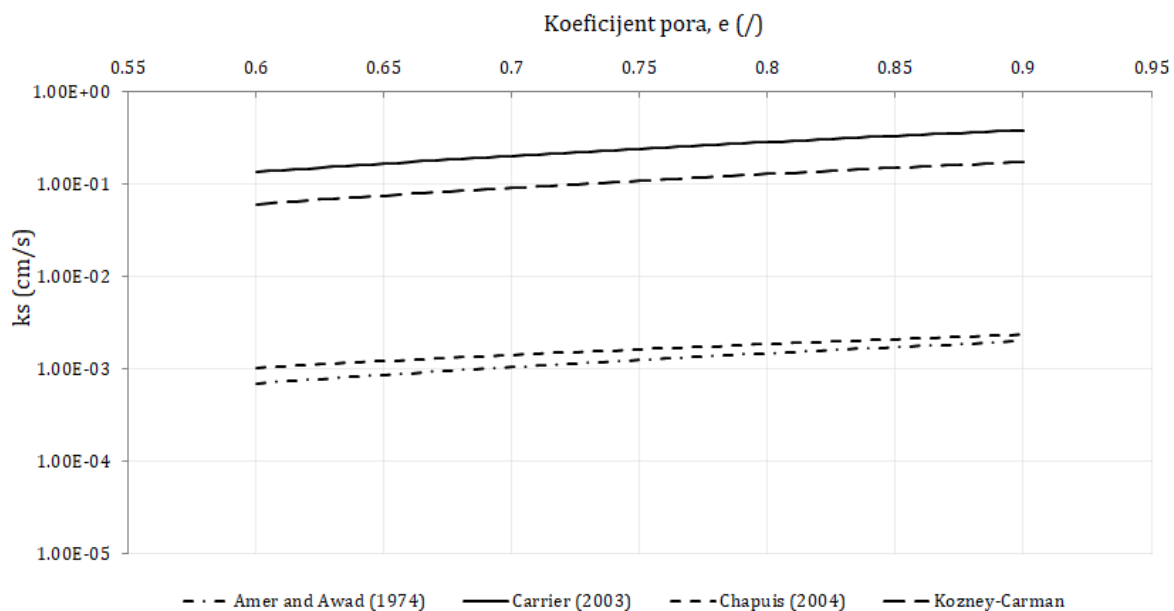
Slika 61: Krivulja retencije vode za stupenje zbijenosti materijala $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$, $D_r = 80\%$

4.5 Rezultati mjerenja koeficijenta propusnosti

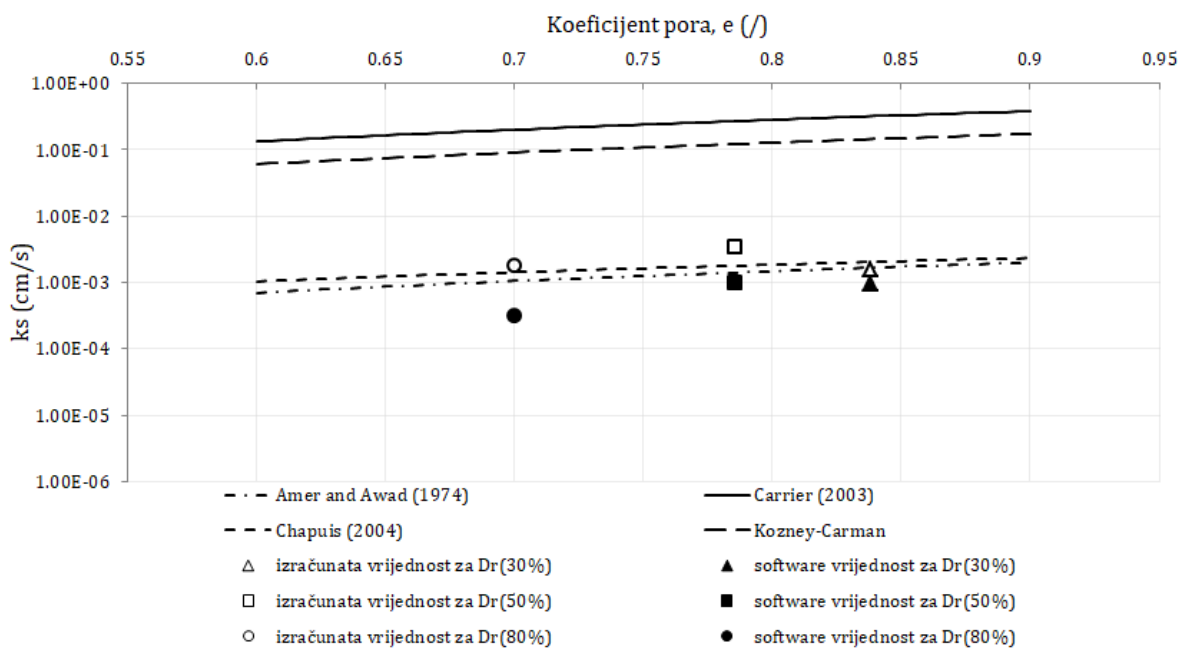
Ukupno je provedeno tri pokusa. Koeficijent procjeđivanja određen je za relativnu zbijenost materijala $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$. Visina i promjer ugrađenih uzoraka je 10cm i 5cm. Na slici 62 prikazane su modeli opisani jednadžbama za predikciju koeficijenta propusnosti. Jednadžbe su navedene u poglavlju 2.3.2. Vrijednosti koeficijenta procjeđivanja, k_s prikazane su u ovisnosti o koeficijentu pora, e . U tabeli 9 nalaze se izračunati koeficijenti procjeđivanja. Paralelno su prikazane vrijednosti izračunatih koeficijenta i koeficijenta koji se dobiju na kraju pokusa. Na slici 63 rezultati su uklopljeni s modelima. Razlog odstupanja izračunatih i software rezultata otkriven je u zapisu podataka. Naime, prije provođenje pokusa definiraju se vrijednosti ćelijskog, pozadinskog i baznog pritiska. Razlika pozadinskog i baznog pritiska predstavlja konstantnu razliku hidrauličkog potencijala, odnosno hidraulički gradijent. Software pretpostavlja da je zadana razlika potencijala konstanta i na temelju toga računa vrijednosti koeficijenta propusnosti, k_s . Međutim, u stvarnosti to nije slučaj. U zapisu podataka vidi se da postoji oscilacija u radu sustava, te da često nisu ostvarene zadane vrijednosti.

Tabela 9: Vrijednosti dobivenih koeficijenta procjeđivanja, k_s (cm/s)

D_r (%)	Izračunata vrijednost k_s	Software vrijednost k_s	Koeficijent pora e
30	1.53E-03	9.43E-04	0.838
50	3.39E-03	1.01E-03	0.785
80	1.83E-03	3.19E-04	0.7



Slika 62: Modeli opisani jednačbama za predikciju koeficijenta propusnosti materijala



Slika 63: Izmjereni koeficijeti propusnosti za relativne zbijenosti materijala

$$D_r = 30\%, D_r = 50\% \text{ i } D_r = 80\%$$

5 ZAKLJUČAK

Postoji velik broj tehnika za mjerenje i kontrolu sukcije u nesaturiranim tlima. Svaka tehnika ima različite prednosti i nedostatke, kao i ograničenja u primjeni, raspon mjerljivih sukcija i osjetljivosti. Za potrebe ovog rada koštana je metoda translacijom osi, troosnim uređajem s dvostrukom ćelijom paralelno s direktnim mjerenjima na tenziometrima. Određivanje krivulja retencije vode, WRC, eksperimentalnim postupcima zahtijeva specijaliziranu opremu za nesaturirano ispitivanje tla, iskustvo ispitivanja i najčešće podrazumijeva dugotrajne programe ispitivanja. Izravna mjerenja krivulja retencije vode pokazala su se često kao relativno zahtjevna i dugotrajna, broj dobivenih mjerenja za ispitivanje određene zbijenosti materijala često je premalen da bi se adekvatno prikazala cjelovita krivulja retencije vode određenog materijala, odnosno mjerenja kao takva obuhvaćaju samo mali dio krivulje. Upravo iz tog razloga poželjne su alternative izravnim mjerenjima – metode procjene retencijskih krivulja. Predikcijski modeli u svojim predstavljanim formulacijama za predikciju retencijske krivulje zaobilaze tu prepreku koristeći se jeftinim indentifikacijskim pokusima, kao što je određivanje granulometrijskog sastava. Dokaz prednosti korištenja modela za predikciju prikazan je na rezultatima u poglavlju 4.3, gdje se usporedbom predikcijskih modela retencijskih krivulja vidi njihovo približno precizno opisivanje izmjerenih vrijednosti sukcije u odnosu na sadržaj vode u tlu. Najprije su provedena preliminarna mjerenja standardnim T1 tenziometrima, ideja je bila odrediti krivulje desorpcije i adsorpcije retencijske krivulje na materijalu pijeska, međutim rezultati su bili neuspješni. Razlog za to je moguća pojava kavitacije uslijed dugotrajne izloženosti uređaja niskom sadržaju vlage u tlu, zatim način dodavanja vode uzorku u koji je ugrađen tenziometar, te sama struktura materijala. Također, prije svakog mjerenja T1 tenziometrom zabilježena je vrijednost od 4 kPa prije nego je tenziometar ugrađen u tlo, rezultati su korigirani za taj iznos. Mogući razlog uz visinu stupca vode u cijevi tenziometra je i početni položaj samog analognog mjerča pritiska. Sljedeći pokusi provedeni su na način da su uzorci materijala unaprijed zamiješani na određeni stupanj saturacije, S . Mjerenja analognim tenziometrima ukazala su na mogućnost greške u očitanjima zbog neprecizne skale analognog mjerča pritiska, stoga se korištenje standardnih T1 tenziometara nije pokazala kao najpreciznija metoda. U tu svrhu,

korišteni su digitalni TEROS 32 tenziometri. Rezultati dobivenih mjerenja na svim uređajima sažeti su u tabeli 7. Prednost TEROS 32 tenziometra je u njegovom kontinuiranom načinu mjerenja, gdje se u zapisu može točno odrediti vrijeme potrebno za postizanje ravnotežnih uvjeta u tlu. Na provedenim pokusima pokazalo se da je vrijeme potrebno za postizanje ravnotežnih uvjeta u tlu otprilike sat vremena. Pri završetku pokusa, uzeti su uzorci materijala na različitim visinama u svrhu određivanja vlažnosti materijala po dubini. Rezultati su vidljivi na slici 54. Također je prikazana razlika u raspodjeli vlažnosti materijala za isti stupanj saturacije. Uzorci koji su unaprijed bili zamiješani na određeni stupanj saturacije, konkretno $S = 35\%$ i $S = 65\%$, na grafu si prikazani oznakom „mixed“. Rezultati pokazuju nehomogenu raspodjelu vlažnosti za oba načina provođenja pokusa. Mogući razlog je jednoliko graduirana struktura materijala. Otprilike homogena raspodjela vlažnosti ostvarena je za uzorak zamiješan na niskom stupnju saturacije $S = 5\%$. Za potrebe određivanja kontinuirane krivulje retencije vode za ispitane uzorke pri relativnim zbijenostima materijala $D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$, provedena je nelinearna regresija za određene van Genuchtenovih parametra krivulje retencije. Dobiveni parametri sumirani su tabeli 8. U troosnom uređaju s dvostrukom ćelijom, metodom translahiranih osi određena je vrijednost sukcije od 4kPa za uzorak zamiješan na stupanj saturacije $S = 20\%$. Međutim, metoda translahiranih osi, pokazala se neupotrebljivom za ovu vrstu materijala. Razlozi za to su strma granulometrijska krivulja, koja pokazuje na usko područje vrijednosti sukcije koje pokriva krivulja retencije vode (svega 10kPa), te raspon vrijednosti sukcije za saturirano i rezidualno stanje koje iznosi nekoliko kPa, stoga su potrebna precizna očitavanja, međutim u radu sustava postoje oscilacije otprilike 1 do 2 kPa. Metoda kao takva pokazala se neupotrebljivom za ispitivanje ovakvog pijeska. Na kraju je određen saturirani koeficijent propusnosti, za tri ispitane relativne zbijenosti materijala ($D_r = 30\%$, $D_r = 50\%$ i $D_r = 80\%$) u uređaju s troosnom ćelijom. Na grafičkom prikazu rezultati mjerenja uspoređeni su s predikcijskim izrazima. Chapuis (2004) i Amer&Awad (1974) najbolje predviđaju vrijednosti koeficijenata propusnosti.

6 LITERATURA

- Benson, C.H., Chiang, I., Chalermyanont, T., Sawangsuriya, A., 2014a. Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data. In: From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering. American Society of Civil Engineers.
- Benson, C.H., Chiang, I., Chalermyanont, T., Sawangsuriya, A., 2014b. Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data 410–427.
- Briaud, J.-L., 2013. Geotechnical engineering: Unsaturated and Saturated Soils, Journal of Materials Processing Technology.
- Double wall triaxial cells for unsaturated tests, Soil mechanics testing equipment, Controls [WWW Document], n.d. URL <https://www.controls-group.com/eng/soil-mechanics-testing-equipment/double-wall-triaxial-cells-for-unsaturated-tests.php> (accessed 2.18.21).
- Elkady, T.Y., Dafalla, M.A., Al-Mahbashi, A.M., Al-Shamrani, M.A., 2013. Unsaturated Testing-An Introduction [WWW Document]. Int. J. GEOMATE. URL <https://www.vjtech.co.uk/blog/introduction-to-unsaturated-triaxial-testing>
- Ellithy, G.S., 2017. A Spreadsheet for Estimating Soil Water Characteristic Curves (SWCC) 1–16.
- Fitts, C.R., 2013. Principles of Flow, Groundwater Science.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D., 2012a. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D., 2012b. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- Istruzioni, M.D.I., n.d. unsaturated tests 1–14.
- Johnson, A.I., Meyer, G., 1975. Groundwater, Reviews of Geophysics.
- Lade, P. V., 2016. Triaxial Testing of Soils. Wiley.
- Lu, N., Likos, W.J., 2004. Unsaturated soil mechanics. J. Wiley, Hoboken, N.J.

- Mechanical, R.H., Hammer, R., Versione, M., Page, C., 2012. Manuale di istruzioni Instruction Manual 1–60.
- Mechanics › Soil testing systems, n.d.
- Mendes, J., Toll, D.G., Evans, F., 2012. A Double Cell Triaxial System for Unsaturated Soils Testing. In: *Unsaturated Soils: Research and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 5–10.
- METER, 2020. Teros 32.
- METER, n.d. How to measure water potential—which method is right for you? | METER [WWW Document]. M. Group, Inc. USA. URL <https://www.metergroup.com/environment/articles/how-measure-water-potential/> (accessed 2.16.21).
- Murray, E.J., Sivakumar, V., 2010. *Unsaturated Soils*.
- Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D., Nelson, E.J., 2015. *Foundation Engineering for Expansive Soils, Foundation Engineering for Expansive Soils*.
- Onur, E.M., 2014. Predicting the Permeability of Sandy Soils From 123.
- Perera, Y.Y., Zapata, C.E., Houston, W.N., Houston, S.L., 2005. Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve Based on Grain-Size-Distribution and Index Properties. In: *Advances in Pavement Engineering*. American Society of Civil Engineers.
- Petrinjak, I., Štuhec, D., Jeftić, G., Strelec, S., 2018. Comparison of different methods for determining the magnetostriction of amorphous ribbons. *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* 5, 9–17.
- Štuhec, D., Jeftić, G., Strelec, S., 1994. Comparison of different methods for determining the magnetostriction of amorphous ribbons. *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* 5, 99–108.
- Smith, I., 2014. *Smith's Elements of Soil Mechanics*.
- soilmoisture - Soilmoisture's Blog [WWW Document], n.d. URL <https://soilmoisture.wordpress.com/author/soilmoisture/> (accessed 2.18.21).
- Tarantino, A., Romero, E., CUI, Y.-J., 2008. *Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils*.

Toll, D., 2016. Fundamentals of Hydraulic Behaviour of Unsaturated Soils [WWW Document].

Vlasta Szavits-Nossan, n.d. Voda u tlu.

Vlasta Szavits-Nossan, n.d. Voda u tlu.

Wang, J.-P., Hu, N., François, B., Lambert, P., 2017. Estimating water retention curves and strength properties of unsaturated sandy soils from basic soil gradation parameters. *Water Resour. Res.* 53, 6069–6088.

Zhai, Q., Rahardjo, H., 2012a. Computers and Geotechnics Determination of soil – water characteristic curve variables. *Comput. Geotech.* 42, 37–43.

Zhai, Q., Rahardjo, H., 2012b. Determination of soil – water characteristic curve variables. *Comput. Geotech.* 42, 37–43.