

Procjena primjene različitih modela za evaluaciju retencijskih krivulja tla i hidrauličkih značajki

Štornoga, Roberta

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:348465>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture



PROCJENA PRIMJENE RAZLIČITIH MODELA ZA EVALUACIJU RETENCIJSKIH KRIVULJA TLA I HIDRAULIČKIH ZNAČAJKI

DIPLOMSKI RAD

Roberta Štornoga

Zagreb, srpanj, 2021.



Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Melioracije

PROCJENA PRIMJENE RAZLIČITIH MODELA ZA EVALUACIJU RETENCIJSKIH KRIVULJA TLA I HIDRAULIČKIH ZNAČAJKI

DIPLOMSKI RAD

Roberta Štornoga

Mentor:

doc. dr. sc. Vilim Filipović

Neposredni voditelj:

Jasmina Defterdarović, mag. ing. agr.

Zagreb, srpanj, 2021.



Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture



IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Roberta Štornoga**, JMBAG 0068217410, rođena 05. ožujka 1994. u Rijeci,
izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

PROCJENA PRIMJENE RAZLIČITIH MODELA ZA EVALUACIJU RETENCIJSKIH KRIVULJA TLA I HIDRAULIČKIH ZNAČAJKI

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studentice



Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture



IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Roberta Štornoga**, JMBAG 0068217410, naslova

**PROCJENA PRIMJENE RAZLIČITIH MODELA ZA EVALUACIJU
RETENCIJSKIH KRIVULJA TLA I HIDRAULIČKIH ZNAČAJKI**

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____, dana _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. Doc. dr. sc. Vilim Filipović mentor
2. Doc. dr. sc. Igor Bogunović član
3. Doc. dr. sc. Ivan Mustać član

Zahvala

Zahvaljujem svojim roditeljima i sestri na pruženoj moralnoj i financijskoj potpori tijekom studija.

Zahvaljujem svojim bliskim prijateljima na pomoći i podršci tijekom studija.

Veliko hvala mom mentoru doc. dr. sc. Vilimu Filipoviću na ukazanom povjerenju i strpljenju te pruženom znanju prilikom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem Jasmini Defterdarović, mag. ing. agr. na pomoći i strpljenju te brojnim savjetima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem članovima komisije na izdvojenom vremenu za pregled rada te danim sugestijama.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Cilj rada	2
2. Pregled literature	3
2.1. Karakteristike vode	3
2.1.1. Oblici vode u tlu	5
2.1.2. Kretanje vode u tlu	6
2.1.3. Preferencijalni tok	9
2.2. Utjecaj mehaničkog sastava tla i strukture na dinamiku toka vode u tlu	11
2.3. Količina vode u tlu i vodni potencijal	16
2.4. Hidrauličke značajke tla	19
2.5. Primjena modela u agroekosustavima	21
3. Materijali i metode	23
3.1. Opis lokacije	23
3.2. Opis metodologije određivanja fizikalno-kemijskih i hidropedoloških značajki tla	24
3.2.1. Metodologija određivanja fizikalno-kemijskih značajki tla	24
3.2.2. Metodologija određivanja hidropedoloških značajki tla	27
3.3. Modeli za evaluaciju retencijskih krivulja tla.....	36
3.4. Usporedba mjernih podataka i rezultata primijenjenih modela.....	37
4. Rezultati i rasprava	38
4.1. Statistička obrada fizikano-kemijskih značajki tla na padini	38
4.2. Rezultati izrađenih retencijskih krivulja tla za SFL 1 i SFL 2	43
5. Zaključak	50
6. Popis literature.....	51
7. Životopis.....	58

Sažetak

Diplomskog rada studentice **Roberta Štornoga**, naslova

PROCJENA PRIMJENE RAZLIČITIH MODELA ZA EVALUACIJU RETENCIJSKIH KRIVULJA TLA I HIDRAULIČKIH ZNAČAJKI

Hidrauličke značajke tla utječu direktno na tok vode i transport tvari u nesaturiranoj zoni tla te predstavljaju temelj za provedbu numeričkih simulacija i procjenu prognostičkih modela. Na terenu (lokacija Jazbina, Zagreb, tip tla pseudoglej obronačni) su se prikupili porušeni uzorci tla te su se odredile fizikalno kemijske karakteristike tla (tekstura, sadržaj organske tvari, pH, električna vodljivost EC). Procjena hidrauličkih parametara tla provedena je u laboratoriju na neporušenim uzorcima tla volumena 250 cm^3 pomoću HYPROP automatiziranog sutava koji se temelji na evaporacijskoj metodi. Uzorci su se prikupljali iz površinskog sloja u 3 ponavljanja na vrhu padine (SFL 1) i dnu padine (SFL 2). HYPROP i WP4C uređajima, dobiveni su podaci o sadržaju vode, vodnom potencijalu te hidrauličkoj vodljivosti tla. Na temelju prethodno dobivenih podataka pomoću HYPROP-FIT programa dobivene su krivulje hidrauličke vodljivosti i retencijske krivulje tla. Za evaluaciju retencijskih krivulja tla korištena su četiri različita modela: Brooks Coreyev (BC), Fredlund Xingov (FX), Kosugiev (K) i van Genuchtenov model (VG). Vrijednost hidrauličke vodljivosti K_s za lokaciju SFL 1 kretala se od 0,2 cm/dan (BC model) do 1,89 cm/dan (FX model). Hidraulička vodljivost za lokaciju SFL 2 kretala se od 0,00470 cm/dan (BC model) do 28,7 cm/dan (FX model) što ukazuje na velike razlike između dobivenih vrijednosti korištenih modela. Najmanja vrijednost hidrauličke vodljivosti za obje lokacije dobivena je BC modelom te najveća vrijednost dobivena je FX modelom. Najveću pogrešku modela $RMSE$ za lokaciju SFL1 pokazao je BC model čija je vrijednost pogreške za $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0164 i 0,2980 za $RMSE_K$. Najmanju vrijednost pogreške za lokaciju SFL 1 pokazao je model VG čija je vrijednost pogreške $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0103 i za $RMSE_K$ 0,2169 što ukazuje na najveću pouzdanost od sva četiri korištena modela. Za lokaciju SFL 2 vrijednosti $RMSE$ pogreške značajno su varirale između modela, a najmanju pogrešku pokazao je FX model pri čemu je $RMSE_{TH}$ iznosio 0,0077 i $RMSE_K$ je iznosio 0,3062. Najveću pogrešku $RMSE$ za lokaciju SFL 2 pokazao je BC model čija je vrijednost $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0159 te za $RMSE_K$ vrijednost 0,4671, čime je i na ovoj lokaciji BC model pokazao najmanju pouzdanost. Rezultati ukazuju na relativno ujednačene rezultate retencijskih značajki tla primjenom različitih modela i izgled samih retencijskih krivulja uz izražene razlike u procjeni pojedinih parametara što može dovesti do velikih razlika prilikom primjene numeričkog modeliranja toka vode i transporta tvari u tlu.

Ključne riječi: retencijske krivulje, evaporacijska metoda, hidrauličke značajke, hidraulički modeli

Summary

Of the master's thesis – student **Roberta Štornoga**, entitled

EFFICIENCY OF DIFFERENT MODELS APPLICATION FOR EVALUATION OF SOIL RETENTION CURVES AND HYDRAULIC PROPERTIES

Soil hydraulic properties directly affect the water flow and solute transport in the soil vadose zone and represent the basis for the implementation of numerical simulations and the application of prognostic models. Disturbed soil samples were collected in the field (Jazbina, Zagreb, soil type: pseudogley on hillslope) and the physical-chemical characteristics of the soil (texture, organic matter content, pH, electrical conductivity EC) were determined. Evaluation of hydraulic soil parameters was performed in the laboratory on undisturbed soil samples with a volume of 250 cm³ using a HYPROP automated system based on the evaporation method. Samples were collected from the surface layer in 3 replicates at the top of the slope (SFL 1) and the bottom of the slope (SFL 2). With the HYPROP and WP4C devices, water content, water potential and hydraulic conductivity of the soil were determined. Based on previously obtained data, the hydraulic conductivity curves and soil water retention curves were reproduced using the HYPROP-FIT program. Four different models were used to evaluate soil retention curves: Brooks Corey (BC), Fredlund Xing (FX), Kosugi (K) and van Genuchten model (VG). The value of hydraulic conductivity K_s for the SFL 1 location ranged from 0.2 cm/day (BC model) to 1.89 cm/day (FX model). The hydraulic conductivity for the SFL 2 site ranged from 0.00470 cm/day (BC model) to 28.7 cm/day (FX model) indicating large differences between the obtained values of the models used. The lowest value of hydraulic conductivity for both locations was obtained by the BC model and the highest value was obtained by the FX model. The largest $RMSE$ model error for the SFL1 location was shown by the BC model whose error value for $RMSE_{TH}$ was 0.0164 and 0.2980 for $RMSE_K$. The lowest error value for the SFL 1 location was shown by the VG model whose error value $RMSE_{TH}$ was 0.0103 and for $RMSE_K$ 0.2169 which indicates the highest reliability of all four models used. For the SFL 2 location, the $RMSE$ error varied significantly for each model and the lowest error value was shown by the FX model where $RMSE_{TH}$ was 0.0077 and $RMSE_K$ was 0.3062. The largest $RMSE$ error for the SFL 2 location was shown by the BC model whose value $RMSE_{TH}$ was 0.0159 and for the $RMSE_K$ value 0.4671, which showed the lowest reliability at this location as well. The results indicate relatively uniform results of soil hydraulic parameters using different models and the shape of the retention curves themselves with pronounced differences in the assessment of individual parameters, which can lead to large differences in the application of numerical modeling for water flow and solute transport.

Keywords: soil water retention curves, evaporation method, hydraulic characteristics, hydraulic models

1. Uvod

Dinamika toka vode opisuje kretanje vode u poroznom sustavu – tlu. To je kompleksan proces koji obuhvaća tok vode u nesaturiranoj zoni i vezanje vode za čestice tla pod utjecajem matričnih i ostalih sila. Dinamika toka vode ponajprije ovisi o fizikalnim značajkama tla od kojih su najznačajnije tekstura i struktura tla.

Mehanički sastav tla (MST) ili tekstura tla je najvažnija parametar fizikalna značajka tla koja utječe na sva fizikalna i neka kemijska svojstva tla. Tekstura ima najvažniju ulogu u regulaciji vodozračnih odnosa u tlu jer određuje distribuciju mikropora te infiltraciju i kretanje vode kroz tlo (Hajnos i sur., 2006.). Struktura je uz teksturu još jedan važan čimbenik koji utječe na fizikalne procese u tlu, a uključuju kretanje i zadržavanje vode kroz mezo i makropore tla.

Kako bi mogli odrediti dinamiku toka vode u nesaturiranoj zoni tla potrebno je poznavati dva parametra: količinu vode i vodni potencijal. Količina vode u tlu uvelike ovisi o koncentraciji organske tvari te o kapacitetu tla za vodu. Vodni potencijal tla definira snagu vezanja vode za čestice tla (prvenstveno za glinu i organsku tvar) što neposredno utječe na konačni sadržaj vode u porama tla. Navedeni parametri potrebni su za prikaz retencijskih krivulja tla i za određivanje hidrauličkih značajki tla. Hidraulička provodljivost definira sposobnost tla za transport vode i na taj je način inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Vrlo je važno napomenuti da se prelaskom tla iz saturirane u nesaturiranu fazu hidraulička provodljivost drastično smanjuje. Hidraulička provodljivost je od velike važnosti u agronomskoj praksi te ima direktan utjecaj fiziološke funkcije i rast biljke (Filipović, 2015.).

Različita područja znanosti razvila su širok niz matematičkih modela. U agronomskom području važnu ulogu preuzeli su modeli toka vode i pronosa tvari kojima je moguće opisati i predvidjeti specifične procese u nesaturiranoj i saturiranoj zoni tla. Također, sve je veća upotreba modela za procjenu hidrauličkih značajki tla čime se uvelike može pozitivno utjecati na uzgoj kultura i željenih prinosa. Primjenom numeričkih modela moguće je predvidjeti količinu gnojidbe i sredstava za zaštitu bilja primjenom simulacija u cilju optimalnog i kontroliranog gospodarenja vodnim resursima i zaštite okoliša. Odabir odgovarajućeg modela za evaluaciju retencijskih krivulja tla je izrazito bitan kako bi se pravilno procijenio tok vode u nesaturiranoj zoni tla. Kako je odnos navedenih parametara nelinearan te je često pod utjecajem heterogenosti prisutnih u tlu, odabir najprikladnijeg modela će utjecati na finalne hidrauličke značajke tla. Također, modeli se međusobno razlikuju po svojim računalnim karakteristikama kao što je raspon parametara. Nadalje, primjena pojedinog modela za određenu klasifikaciju tla često ukazuje na značajne razlike u hidrauličkoj provodljivosti. To dovodi do zaključka kako postoji opravdanost postojanja većeg broja modela (Filipović, 2015.). U četvrtom poglavlju bit će detaljno prikazani brojčani rezultati i deskriptivna objašnjenja prethodno navedenih činjenica.

1.1. Cilj rada

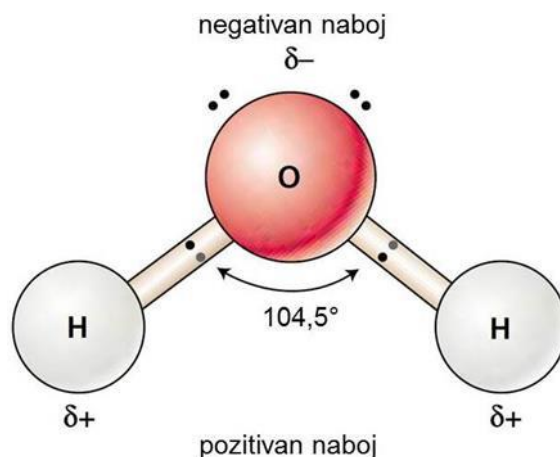
Cilj rada je primijeniti različite modele za evaluaciju retencijskih krivulja tla i procijeniti hidrauličke parametre odabirom statistički najprikladnijeg modela.

2. Pregled literature

2.1. Karakteristike vode

Voda je najrasprostranjenija tvar na Zemlji i esencijalni medij za jedinice biosfere te je njena fiziološka funkcija u živim organizmima temeljena na njenoj jedinstvenoj strukturi i fizikalnim svojstvima (Ondrašek i sur., 2015.).

Voda je molekula građena od jednog atoma kisika i dva atoma vodika međusobno povezanih kovalentnim vezama čiji kut razmaka između dvaju atoma vodika iznosi $104,5^\circ$ (Slika 2.1.1.). S jedne strane se nalaze dva atoma vodika koji imaju pozitivan naboj, a s druge strane molekule atom kisika s negativnim nabojem (Kirkham, 2004.). Protonska strana je pozitivna strana molekule vode. Negativno nabijen samostalni par elektrona jedne molekule vode privlači pozitivan proton druge molekule vode (Kirkham i Powers, 1972.). Takav izgled molekule proizlazi iz činjenice da je kisik elektronegativniji od vodika te privlači elektrone iz kovalentne veze. Pozitivan naboj sa strane vodika i negativan naboj uz atom kisika se poništavaju što znači da molekula vode nije nabijena, odnosno ne nosi naboj. Vodikove veze čine različiti naboji molekula vode koji se međusobno privlače. Dakle, nejednolika raspoređenost pozitivnog i negativnog naboja u molekuli vode te specifična građa kovalentnih veza između atoma kisika i vodika čini svojstvo polarnosti. Takvo svojstvo čini vodu najvažnijim i najrasprostranjenijim otapalom u prirodi. Polarnost omogućuje otapanje organskih tvari i iona (Petek i Lazarević, 2015.).



Slika 2.1.1. Molekula vode. Kovalentne veze između atoma kisika i dva atoma vodika zatvaraju kut od $104,5^\circ$. Negativni i pozitivni naboji (δ^- i δ^+) na suprotnim stranama molekule vode omogućuju stvaranje vodikovih veza između molekula vode.

Izvor: Taiz i Zeiger, 2012.

Između molekula vode stvaraju se vodikove veze koje smanjuju elektrostatske interakcije između tvari te omogućavaju njihovo otapanje. Oko nabijenih dijelova makromolekula vodikove veze može se formirati vodeni film (omotač) koji proizlazi iz polarnih dijelova

molekule. Na takav se način mogu smanjivati interakcije između molekula i njihova povezanost te povećati topljivost (Petek i Lazarević, 2015.).

Prisutnost vodikovih veza uzrokuje pojavu specifičnog toplinskog svojstva vode, a to su specifični toplinski kapacitet i latentna temperatura isparavanja. Voda može apsorbirati veliku količinu topline zbog velikog broja vodikovih veza čime se voda definira kao idealan medij za termoregulaciju (Petek i Lazarević, 2015.). Visoka specifična toplota vode ima sposobnost stabilizacije temperature što ima veliki značaj u odnosu vode i tla (Kramer, 1983.). Za kidanje vodikovih veza potrebno je utrošiti energiju. Energija potrebna za kidanje vodikovih veza te prelazak tekuće vode u plinovitu fazu zove se latentna temperatura isparavanja. Za isparavanje vode potrebno je uložiti 44 kJ/mol pri temperaturi od 25 °C. Brzina gibanja molekula vode povećava se porastom temperature (Petek i Lazarević, 2015.). Vodikove veze određuju ponašanje vode te karakteriziraju strukturu i dinamiku tekućina (Luzar i Chandler, 1996.). Prema Krameru (1983.) vodikove veze imaju snagu vezanja vode oko 1,3 – 4,5 kcal/mol. Nobel (1974.) navodi snagu vezanja vodikovih veza u vrijednosti od 4,8 kcal/mol. Struktura vode nalikuje tetraedru (grč. tetraedros što znači četverostrano), a takvu specifičnu strukturu može narušiti promjena tlaka, temperature i prisutnost soli (Kirkham i Powers, 1972.).

Voda ima sposobnost provođenja topline te je u odnosu na druge tekućine dobar vodič, a u odnosu na metale ona ima nisku provodljivost. Još jedno važno svojstvo vode je prozirnost koje omogućuje prodiranje svjetla kroz tekućinu i na takav način omogućuje algama stvaranje fotosinteze (Kramer, 1983.).

Molekule vode se jače vežu na granici između vode i zraka nego za plinove u zraku. Uzrok takve pojave je maksimalno smanjenje dodirne površine vode sa zrakom, a naziva se površinska napetost. Kidanjem vodikovih veza između molekula vode povećava se površinska napetost. Takav proces odvija se pod utjecajem energije koju je potrebno uložiti. Ulaganjem energije razvija se podtlak-tenzija (Petek i Lazarević, 2015.). Zbog visokih unutarnjih kohezivnih sila, koje proizlaze iz specifične strukturne građe molekule vode, voda spada pod tekućine s najvišim stupnjem površinske napetosti (Kramer, 1983.). Takva karakteristika vode glavni je preduvjet koji osigurava dobru vlačnu čvrstoću i odgovara teoriji kohezije (Kirkham, 2004.).

Važan aspekt u kretanju vode imaju sile adhezije i kohezije. Adheziju definiramo kao silu koja povezuje molekule vode s nekom drugom tvari u čvrstom stanju kao npr. vezanje molekula vode s česticama tla ili vezanje vode za staničnu stijenku. Kohezija je sila koja pod utjecajem vodikovih veza međusobno spaja molekule vode. Pojavu kapilarnosti uzrokuju sile adhezije, kohezije i tenzije. Kapilarnost se definira dizanjem stupca vode kroz tanku cijev. U ovakvom sustavu visina vode u kapilari je viša od razine vode u izvoru. Stupac vode ovisi o širini kapilare i masi vode. Dizanje vode u stupcu se odvija do izjednačenja mase stupca vode s djelovanjem sile adhezije i tenzije. Zbog takvih karakteristika ove sile imaju važnu ulogu u fizikalnim procesima u tlu (Petek i Lazarević, 2015.).

Voda ima visoku gustoću, a smrzavanjem joj se povećava volumen pri čemu je volumen smrznute vode (leda) za 9 % veći od volumena vode u tekućem stanju (Kramer, 1983; Kirkham,

2004.). Ova teorija potvrđuje činjenice o plutanju leda te pucanju cijevi prilikom smrzavanja vode u njima te se isto događa i s vodom u tlu pri niskim temperaturama čime dolazi do stvaranja pukotina u tlu (Kirkham, 2004.).

2.1.1. Oblici vode u tlu

Voda se u tlu nalazi u nekoliko različitih oblika. Prema snazi držanja vode ona se dijeli na: kemijsku, higroskopnu, opnenu, kapilarnu i gravitacijsku vodu.

Kemijska voda u tlu je vezana za različite kemijske spojeve (najčešće soli) te se kao takva nalazi u kristalnoj mreži minerala i spojeva u tlu. Kemijska voda može biti kristalna i konstitucijska. Kristalna voda se nalazi u obliku molekula, a konstitucijska voda se nalazi u obliku OH^- iona. Kemijska se voda drži silom tlaka od 5000 bara (500 MPa). Zbog takvih karakteristika ona je za biljku u potpunosti nepristupačna (Tomić, 1988.; Šimunić, 2012.).

Higroskopna voda se u tlu nalazi u obliku vlage. To je najtanji sloj nepokretnih molekula vode. Molekule vode adsorbiraju se na površini koloidnih čestica tla te se tako formira molekularna opna. Molekularna opna veže se za čestice tla snagom koja odgovara tlaku od 30 – 1000 bara. Higroskopna voda nepokretna je i nepristupačna biljkama (Šimunić, 2012.).

Opnena voda se u tlu nalazi u tekućem obliku te u obliku opne ili filma obavija koloidne čestice tla. U uvjetima povišene vlage u tlu počinje se stvarati tanki film vode oko čestice tla. Kako sadržaj vlage u tlu raste tako se stvara sve deblja opna, te što je veći sadržaj vlage snaga držanja vode za čestice tla je manja. Opnena voda nastaje pri vrijednosti vlage gdje se voda drži snagom koja je manja od 30 bara, a završava pri vrijednosti od 15 bara te označava vrijednost točke venuća (Šimunić, 2012.). Takva voda je djelomično dostupna biljkama. Njeno kretanje kroz profil tla je usporeno te se giba smjerom iz područja čestica s debljom opnom prema česticama s tanjom opnom pod utjecajem adsorpcijskih sila. Fizikalna svojstva tla imaju značajan utjecaj na opnenu vodu pa tako kod pjeskovitih tala volumni udio može iznositi oko 4 %, u ilovastim do 10 % a u glinastim i do 20 % (Tomić, 1988.).

Kapilarna voda se u tlu kreće u svim smjerovima u kapilarnim porama te se silama površinske napetosti drži za čestice tla. Nalazi se u tekućem obliku te se kreće iz vlažnijeg prema manje vlažnom tlu. Veću daljinu doseže u sitnijim porama, a veću brzinu u krupnijim porama. Adhezivne sile djeluju jače od gravitacijskih pa se zadržava u kapilarnim porama. U tlu se drži silama koje odgovaraju tlaku od 15 do 0,33 bara te je kao takva dostupna za biljke. Kapilarna voda može biti lako pokretna, teže pokretna i nepokretna. Pokretna kapilarna voda drži se silama koje odgovaraju tlaku od 0,33 do 15 bara te ju biljka može lako adsorbirati. Lako pristupačna kapilarna voda često se naziva i „viseća“ kapilarna voda. Kada se kapilarna voda nalazi iznad razine podzemne vode tada se koristi naziv „poduprta“ kapilarna voda. Teško pokretna kapilarna voda se za čestice tla veže tlačnim silama od 6,25 do 15 bara dok se nepokretna kapilarna voda drži silama od 15 bara te je biljkama nedostupna. Brzinu i visinu dizanja kapilarne vode određuje nekoliko čimbenika: temperatura, veličina kapilarnih pora i

tekstura tla. Tla finije teksture uvjetuju veću visinu dizanja kapilarne vode. Tla grublje teksture omogućavaju brzu pokretljivost kapilarne vode odnosno veću brzinu gibanja. U pjeskovitim tlima kapilarno dizanje može dosegnuti visinu od 20 do 50 cm, u ilovastim tlima od 50 do 80 cm, a u glinovitim tlima od 80 cm do nekoliko metara (Šimunić, 2012.).

Gravitacijska voda se često naziva i procjedna voda. To je slobodna voda koja nastaje prilikom potpune saturacije, odnosno kada su pore u potpunosti ispunjene vodom. Takvo zasićeno stanje tla nastaje nakon obilnih kiša, otapanjem leda i snijega te kada nastupaju velike poplave. U uvjetima potpune saturacije voda se ne drži za čestice tla, dakle voda tada nema energiju već se kreće pod utjecajem gravitacije. Takvo veliko procjeđivanje može prouzročiti nastajanje suvišne stagnirajuće potpovršinske vode. Uzrok toga uglavnom su viseći tereni te tla grublje teksture pa tako kod pjeskovitih tala procjeđivanje traje nekoliko sati dok kod glinovitih tala uglavnom traje nekoliko dana (Tomić, 1988; Šimunić, 2012.).

2.1.2. Kretanje vode u tlu

Kretanje vode u tlu može se odvijati u različitim smjerovima i to: lateralno, descedentno i ascedentno. Descedentno kretanje vode odvija se spontano slobodnom gravitacijom u smjeru prema dolje te se takvo gibanje vode događa prilikom navodnjavanja ili oborina. Ascedentno kretanje opisuje kretanje vode prema površini (gore), a takvo kretanje može biti uzrok evaporacije, odnosno isparavanja vode iz tla te je kretanje vode uzrokovano kapilarnim vlaženjem iz nižih slojeva. Sila gravitacije ima negativan utjecaj na ascedentno kretanje. Lateralno ili bočno gibanje je naziv za gibanje vode u svim smjerovima. Smjer kretanja vode u tlu je određen kapilarnim, gravitacijskim i hidrostatskim silama (Tomić, 1988.).

Gibanje vode u tlu može biti različito, a ovisi uglavnom o agregatnom obliku vode, količini vode koja se kreće tlom te silama koje djeluju na vodu u pokretu. Najvažniji oblici kretanja vode u tlu su: kapilarno kretanje, infiltracija i filtracija.

Kapilarno gibanje je kretanje vode koje je nastalo kao posljedica razlike energetskeg potencijala u nesaturiranim uvjetima. Na kapilarno gibanje veliki utjecaj imaju sila adhezije i kohezije dok sila gravitacije negativno utječe na njeno kretanje, odnosno suprotstavlja se takvom obliku gibanja. Kod kapilarnog gibanja voda se kreće iz vlažnijeg područja prema manje vlažnom području. Takvo kretanje uzrokuje razlika u slobodnoj energiji između čestica tla. Fizikalna svojstva poput teksture i strukture imaju utjecaj na kapilarno kretanje (Šimunić, 2012.).

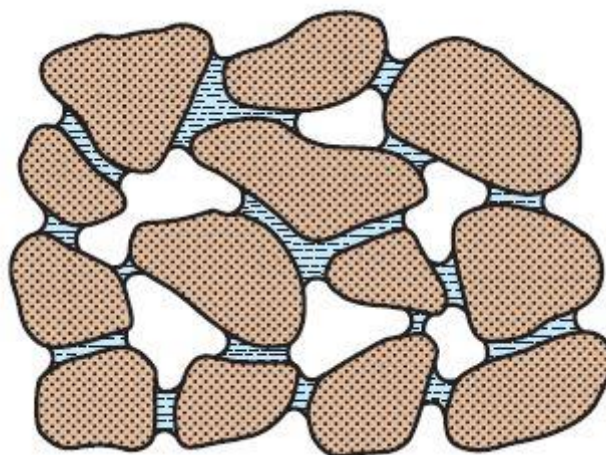
Infiltracija je proces neujednačenog upijanja vode u nesaturiranom tlu, a pokreću ju kapilarna i gravitacijska sila, stoga se smjer kretanja infiltracije može odvijati lateralno i descedentno. Kada je tlo u potpunosti suho intenzitet infiltracije je najveći zbog velike razlike u kapilarnom potencijalu i energetskeg potencijalu vode. Dakle gibanje vode se odvija iz područja većeg potencijala u smjeru područja nižeg potencijala (Šimunić, 2012.). Zbog djelovanja kapilarnih sila intenzitet infiltracije u početku je najveći. Najveći utjecaj na intenzitet, odnosno brzinu infiltracije imaju temperatura, porozitet, tekstura, struktura, stanje vlažnosti tla, količina

organske tvari i salinitet (Tomić, 2004.). Infiltracija može biti trenutačna i sumarna. Trenutna infiltracija definirana je kao metar vode po jedinici vremena neovisno o klasifikaciji tla, vrijednosti sile i gradijentu. Hidraulička vodljivost definira se kao metar vode po danu (m/dan) koji prođe kroz određeni volumen tla. Sumarna infiltracija mjeri se kroz dulji period (Kirkham, 2004.). Za određivanje infiltracije koristi se metoda infiltrometara u različitim izvedbama, a najčešće je to valjkasti infiltrometar. Infiltracija se izražava koeficijentom infiltracije (K_i), brzinom infiltracije (mm/min, mm/sat, prema SI-m/s) te ukupnom količinom upijene vode (mm, cm ili m) (Šimunić, 2012.). Osim vode, infiltracijom se u tlu kreću i ostale otopljene tvari poput hranjiva, štetnih tvari i dr. (Kirkham, 2004.). Stvaranje pokorice kod ilovastih i pjeskovitih tala ima negativan utjecaj na ravnotežu vode u tlu što direktno utječe na proces infiltracije (Casenave i Valentin, 1992.; Valentin i Bresson, 1992.). Samo nekoliko milimetara pokorice može značajno smanjiti stopu infiltracije (Šimunek i sur., 1998.).

Prema Baver i sur. (1972.) postoje četiri modela za jednodimenzionalnu infiltraciju te su sva četiri modela utemeljena na jednodimenzionalnoj vertikalnoj infiltraciji. Lewisova jednadžba temelji se na kumulativnoj infiltraciji koju definira ukupan volumen infiltrirane vode po jedinici površine kroz određeno vrijeme (Soil Science Society of America, 2008.). Hortonova jednadžba opisuje smanjenje infiltracije kroz vrijeme uzrokovan površinskim svojstvima tla kao npr. bubrenje tla i narušavanje strukture tla kišnim kapima što može rezultirati stvaranjem pokorice. Green-Amptanova jednadžba temelji se na fizikalnim parametrima tla (Kirkham, 2004.).

Ujednačeno gibanje u tlu započinje prestankom djelovanja kapilarnih sila i početkom djelovanja gravitacijskih sila u makroporama. Takvo se gibanje naziva filtracija (Šimunić, 2012.). Filtracija ili perkolacija je proces kretanja suvišne vode u saturiranom tlu kao posljedica djelovanja sile gravitacije ili hidrostatskog tlaka. Filtracija se odvija nakon procesa infiltracije, kada je tlo saturirano vodom, odnosno prestankom djelovanja kapilarnih sila na kretanje vode. Filtracija vode se uglavnom odvija unutar makropora u tlu, a ona također ovisi o mehaničkom sastavu i strukturi tla te obliku i rasporedu makropora čime je određena i brzina kretanja vode (Tomić, 1988.). Koeficijent filtracije (k) dobiva se iz podataka o količini procijeđene oborine kroz valjak (Q), presjeka valjka (F), vremenskoj duljini mjerenja (t) i hidrauličkom gradijentu ($i=h/l$) (Šimunić, 2012.).

Nesaturirana zona (Slika 2.1.2.1.) predstavlja tlo koje je ispunjeno vodom i zrakom te je tok vode u takvom tlu uglavnom vertikalna dok je saturirano tlo ono tlo koje je u potpunosti ispunjeno vodom bez prisutnosti zraka i tok vode je horizontalan (Gjetvaj, 2006.). Granica koja dijeli saturiranu od nesaturirane zone zove se vodno lice. Hidrostatičko stanje je ravnotežno stanje vode u tlu na koju djeluje atmosferski tlak. Saturirano područje koje se nalazi ispod razine atmosferskog tlaka naziva se područjem vode temeljnice ili gravitacijske vode jer se takav tok odvija pod djelovanjem sile gravitacije. U nezasićenom području gibanje vode uzrokuju kapilarne, gravitacijske i termodinamičke sile (Mustać, 2015.).



Slika 2.1.2.1. Prikaz nesaturirane zone tla i ispunjenosti pora vodom i zrakom
Izvor: Hillel, 1998.

U nesaturiranom tlu voda se može kretati duž stjenke velikih pora ili slobodnim kretanjem u prekinutom filmu malih pora (Hillel, 1998.). U mikroporama voda se giba u ascendentnom, descendentnom i lateralnom smjeru, a u makroporama se voda kreće dominantno descendentno (Hillel, 2004.) Količinu vode u tlu određuje veličina pora i ukupni porozitet tla (Tomić, 1988.). U području adhezijske vode voda se u obliku opne veže za čestice tla gdje su pore ispunjene zrakom i vodenom parom, a nalazi se iznad kapilarnog područja. Zona adhezijske vode obuhvaća područje membranske vode i higroskopne vlage. Termodinamičke, kapilarne i elektrostatičke sile djeluju na područje adhezijske membrane. Na gibanje vode u zoni higroskopne vlage utječu termodinamičke sile (Jović, 2006.).

Tok vode u nesaturiranom tlu jedan je od kompleksnijih procesa, a uključuje transport vode i kemijski otopljenih tvari, kemijske reakcije i mikrobiološke aktivnosti. Za određivanje toka vode u tlu većina modela koji se koriste u praksi baziraju se na Richardsovoj jednadžbi (1):

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K(h) \partial h}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \right) - S(h) \quad (1)$$

gdje su: θ – relativna količina vode u tlu, $[L^3 L^{-3}]$, h – vodni potencijal tla, $[L]$, K – hidraulička provodljivost nesaturiranog tla, $[LT^{-1}]$, z – vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore), $[L]$, t – vrijeme, $[T]$ i S – voda koju biljka usvaja korijenom, $[T^{-1}]$.

Richardsova jednadžba uključuje jednadžbu kontinuiteta (2) i Darcyjev zakon (3). Jednadžba kontinuiteta definira promjenu relativne količine vode u zadanom volumenu s obzirom na prostornu promjenu toka vode u tlu:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2)$$

$$q_z = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (3)$$

gdje su: H – suma vodnog potencijala tla (h) i gravitacijskog potencijala tla (od referentne razine, npr. razine podzemne vode), (z)

q_z – specifični protok (eng. *flux density*), [LT^{-1}].

Darcyjev zakon opisuje hidrauličku vodljivost u funkciji relativne količine vode, a primjenjuje se na djelomično saturiranom tlu. Relativno malo smanjenje količine vode u tlu može dovesti do značajnog smanjenja hidrauličke vodljivosti što znači da u različitim tipovima tala razlika u hidrauličkoj provodljivosti ispod i iznad razine podzemne vode može biti značajna. Za rješavanje Richardsove jednadžbe moraju biti poznata dva hidraulička parametra: parametri retencijske krivulje i hidraulička provodljivost nesaturiranog tla (Filipović, 2015.).

2.1.3. Preferencijalni tok

Preferencijalni tok predstavlja hidrauličnu neravnotežu, odnosno nejednoliki protok tekućih, plinovitih i/ili otopljenih tvari u poroznom mediju, a odvijaju se izvan matriksa tla u prazninama ispunjenim zrakom (Fluhler i sur., 1996.; Gerke, 2006.; Lin, 2010.). Preferencijalni protok odvija se različitim putevima u tlu (Hillel, 1998.). To je nekontinuirani gravitacijski proces protoka vode koji je ograničen vremenskom varijablom (Nimmo, 2020.). Preferencijalni tok može se javljati u različitim uvjetima u tlu (Lin, 2010.). Pojavu preferencijalnog toka uzrokuje veliki volumen vode i velika brzina vode (Nimmo, 2012.). Heterogenost tla, topografija, oborine i stanje tla su čimbenici koji utječu na regulaciju preferencijalnog toka u tlu (Jarvis, 2007.; Koestel i Jorda, 2014.; Liu i Lin, 2015.). Stupanj preferencijalnog toka u tlu uglavnom je predvidljiv, ali teško ga je precizno kvantificirati (Jarvis i sur., 2009.).

Preferencijalni tok ima utjecaj na hidrološki ciklus, eroziju tla, produktivnost i kvalitetu okoliša (Uhlenbrook, 2006.; Hencher, 2010; Morales i sur., 2010.; Guo i Lin, 2016.). Ima presudnu ulogu u transportu otopljenih tvari te povećava kemijsku pokretljivost čime se povećava opasnost od onečišćenja (Kirkham, 2004.) te može ubrzati proces procjeđivanja štetnih tvari u niže slojeve čime se narušava kvaliteta podzemnih voda (Clothier i sur., 2008.; Gerke i sur., 2010.). S druge strane preferencijalni tok može imati i pozitivan utjecaj na ekosustav kao što je regulacija poplava i kontrola erozije na nagnutim terenima (Clothier i sur., 2008.).

Postoji nekoliko oblika preferencijalnog toka koji definiraju proces kretanja vode u različitim uvjetima u tlu. Režim preferencijalnog toka često može biti kombinacija nekoliko oblika protoka kao što su „finger“ ili „funnel flow“ (Guo i Lin, 2018.). Brzina i protok također su ograničeni nagibom (Nimmo, 2020.). Javlja se u uvjetima različitih hidrauličkih svojstava

između kontaktnih materijala (Scaini i sur., 2018.). Takav protok karakterističan je za kretanje vode između različitih horizonata u tlu (Hardie i sur., 2012.). Primjer takvog bočnog kretanja dokazao je Beasley eksperimentom u kojem se voda kretala bočno u slabo provodljivom sloju gline čime se 90 % oborina procijedilo u podzemne slojeve (Beasley, 1976.). „Finger flow“ opisuje neujednačeni protok vode koji je nastao zbog hidrauličke nestabilnosti i heterogenosti (Guo i Lin, 2018.). Protok tvari kroz makropore odnosi se na protok kroz pukotine u tlu, pore nastale erozijom te protok tvari kroz biopore (Guo i Lin, 2018.). One mogu nastati kao posljedica djelovanja flore i faune, npr. gliste i korijenje koji se probijaju kroz tlo, pukotine nastale vlaženjem, sušenjem, smrzavanjem tla te obradom (Conquet i Bruand, 2018.). Makropore ubrzavaju proces kretanja vode u tlu što pozitivno djeluje na preferencijalni tok (Jarvis, 2007.). Takav primjer preferencijalnog toka kroz makropore prikazan je na slici 2.1.3.1. Teksturni sastav tla utječe na stabilnost preferencijalnog toka (Guo i Lin, 2018.), te je kod ilovastih i glinovitih tala preferencijalni tok veći (Koestel i sur., 2012.).



Slika 2.1.3.1. Prikaz preferencijalnog toka u makroporama tla označen plavom bojom

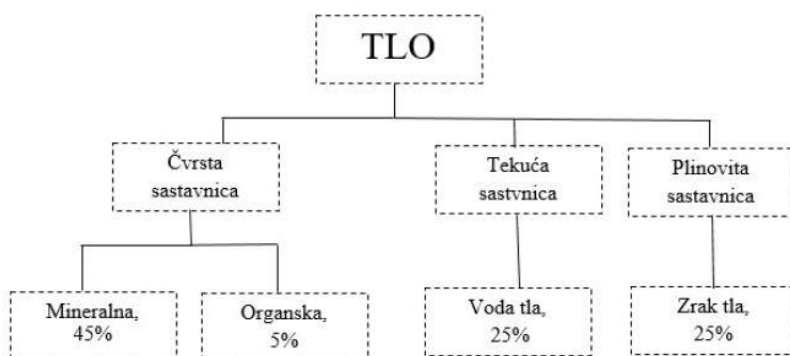
Izvor: <http://soilandwater.bee.cornell.edu/research/pfweb/educators/intro/macrowflow.htm>

Dinamika preferencijalnog toka može se razlikovati ovisno o početnom stanju vlažnosti. Visoka relativna vlažnost ima pozitivan utjecaj na preferencijalni tok. Povećanjem relativne vlažnosti tla povećava se i preferencijalni tok (Guo i Lin, 2018). Izmjena mokrih i suhih ciklusa povećavaju pukotine u tlu čime se stvaraju povoljni uvjeti za formiranje makropora i njihove međusobne povezanosti (Koestel, 2020.).

2.2. Utjecaj mehaničkog sastava tla i strukture na dinamiku toka vode u tlu

Tlo je prirodna tvorevina odnosno rastresit sloj Zemljine površine smješten između atmosfere i litosfere (Kisić, 2012.). To je modificirani materijal koji je nastao je fizikalnim, kemijskim i biološkim procesima razgradnje, raspadanjem matične stijene i rekompozicijom primarnih i sekundarnih minerala te je posljedica aktivnosti mikro- i makroorganizama, tj. flore i faune (Hillel, 2004.). Transformacija i mineralizacija matričnog materijala pod utjecajem su biološke aktivnosti te se ona smatra najvažnijim čimbenikom u oblikovanju tla (Jenny, 1941.).

Tlo je porozni sustav koji se sastoji od krute, tekuće i plinovite faze (Slika 2.2.1.). Čvrsta faza tla predstavlja trajnu komponentu trofaznog sustava (Hillel, 2004.). Porozni dio sustava ispunjen je zrakom (25 %) što čini plinovitu sastavnicu te vodom koja čini tekuću (25 %) sastavnicu tla. Neporozni dio tla čini kruta sastavnica koja se sastoji od mineralnog djela različitih oblika i veličina amorfnih spojeva koje sačinjavaju organska tvar i željezni oksidi (Hillel, 2004.; Kisić, 2012.). Mineralna komponenta potiče od matične stijene i zauzima 45 % udjela, dok organska komponenta predstavlja humificiranu organsku tvar (organizmi tla, mrtva organska tvar) i zauzima 5 % udjela (Kisić, 2012.). Mineralni sastav i veličina frakcije određuju osobine i karakter tla pa će ovisno o tome biti različita poroznost, interakcija tla s tekućinama (vodom) i drugim otopljenim tvarima, stišljivost, čvrstoća te toplinski režim tla (Hillel, 2004.).



Slika 2.2.1. Optimalni volumni sastav tla

Izvor: Kisić, 2012.

Mehanički sastav tla (MST) ili tekstura tla je najvažniji parametar fizikalnih značajki tla koji utječe na sva fizikalna i neka kemijska svojstva tla. MST definiran je kao postotni udio mehaničkih čestica u tlu. MST ima najvažniju ulogu u regulaciji vodozračnih odnosa u tlu jer određuje distribuciju pora te upijanje i kretanje vode kroz tlo (Hajnos i sur., 2006.). MST ima također veliki značaj i presudnu ulogu u ishrani bilja (Vukadinović i Lončarić, 1997.). Stabilnost agregata i struktura tla uvelike ovisi o sadržaju organske tvari u tlu, a povećani sadržaj organske tvari ima pozitivan utjecaj na agregate (Amezket, 1999.).

Mehanički elementi u tlu uglavnom su povezani u krupnije čestice (rijetko se pojavljuju zasebno) te ih često nazivamo strukturnim agregatima. Postupkom mehaničke analize klasificiraju se prema veličini te se prilikom uzorkovanja u uzorcima tla (sitno tlo ili sitnica)

određuje postotna zastupljenost pojedinih frakcija: gline, praha i pijeska u zadanom volumenu (Kettler i sur., 2001.; Kisić, 2012.)

Tekstura tla predstavlja najbolje svojstvo za ocjenu fizikalnog stanja tla, a može imati kvalitativnu i kvantitativnu konotaciju. Prema kvaliteti tekstura se dijeli na grubu i finu, a to se može odrediti dodirnom odnosno valjanjem vlažnog tla. Kvantitativnost strukture odnosi se na veličinu pojedinih frakcija tla (Hillel, 2004.).

Svako tlo ima teksturnu oznaku koja je određena na temelju masenih omjera triju frakcija (pijeska, praha i gline), a naziva se teksturna klasa. Pretpostavka je da tlo čini 50 % pijeska, 20 % praha, te 30 % gline (Hillel, 2004.). Prema veličini čestica konvencionalne vrijednosti za klasifikaciju mehaničkih frakcija u svijetu najprihvaćenija je Međunarodna klasifikacija granulometrijskog sastava i Atterbergova klasifikacija. U agronomskoj se praksi za određivanje veličine mehaničkih elemenata najčešće koristi klasifikacija tala prema FAO (2006.) koja je prikazana u Tablici 2.2.1.

Tablica 2.2.1. Veličina mehaničkih elemenata prema FAO (2006.).

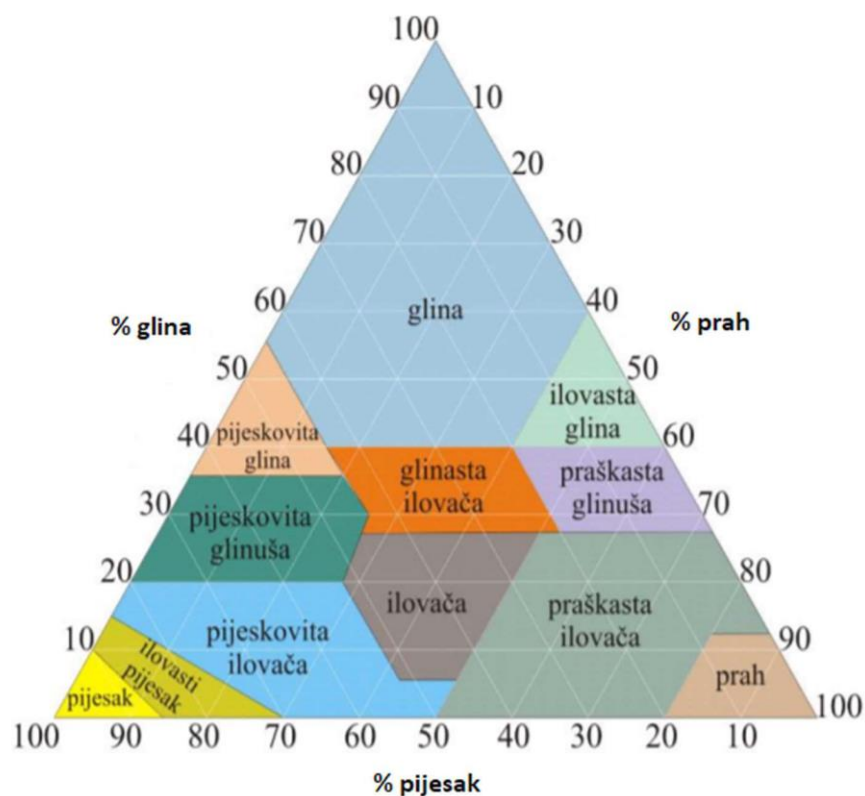
Mehanički elementi	Promjer čestica (mm)
Krupni pijesak	2,0 – 0,2
Sitni pijesak	0,2 – 0,063
Krupni prah	0,063 – 0,02
Sitni prah	0,02 – 0,002
Glina	< 0,002

Izvor: FAO (2006.).

Osim toga, za određivanje teksturnih klasa koristi se i Atterbergov trokut (Slika 2.2.2.), a klase se mogu podijeliti u tri osnovna razreda: pjeskovita, ilovasta i glinovita tla (Kisić, 2012.).

Što su frakcije tla sitnijih dimenzija to se njihov značaj za osobine i dinamiku tla povećava. Snaga držanja vode povećava se pri većoj usitnjenosti odnosno disperznosti, a samim time je i veći sorpcijski kapacitet, veća količina vezanih hraniva, bubrenje, ljepljivost i plastičnost. Kod velike disperznosti smanjuje se filtracijska sposobnost vode (Kisić, 2012.).

Prema veličini čestica frakcije su podijeljene u dvije temeljne skupine. Frakcije tla veće od dva milimetra spadaju u skeletnu skupinu, a čestice sitnih dimenzija spadaju u skupinu sitnog tla ili sitnica (Kisić, 2012.). Metaforički gledano, frakcije pijeska i praha predstavljaju „kostur“ tla, a glina „meso“ tla. Sve tri komponente krute faze u raznim kombinacijama predstavljaju matriks tla (Hillel, 2004.).



Slika 2.2.2. Atterbergov trokut za određivanje mehaničkog sastava tla
Izvor: Kucelj, 2016.

Skelet je gruba frakcija tla dimenzija od 2 do 20 mm promjera koja nastaje mehaničkim trošenjem matične stijene, a to su uglavnom kamen i šljunak. Skeletne čestice karakterizira neaktivnost u tlu. Skeletna tla imaju loš kapacitet za vodu, vrlo su propusna i suha te sadrže vrlo nizak postotak hranjiva (Kisić, 2012.).

Frakcija pijeska je čestica dimenzija od 2,0 do 0,2 mm koja također nastaje fizikalnim trošenjem stijene. Pijesak isto kao i šljunak nema kapacitet zadržavanja vode i kao takav veoma je propustan za vodu te je kapilarno dizanje odsutno ili je vrlo slabo. Pijesak može popraviti negativne fizikalne osobine glinovitih tala (Kisić, 2012.). Prema dimenzijama se dijeli na sitni i krupni pijesak. Zrnca pijeska nerijetko mogu u svom sastavu imati kvarc i fragmente feldšpata pa tako i teške minerale kao što su cirkon, turmalin i rog. Zbog neujednačenih dimenzija i visoke tvrdoće pijesak ima abrazivno svojstvo (Hillel, 2004.).

Frakciju praha karakteriziraju dimenzije frakcije od 0,2 do 0,02 mm te također nastaje fizikalnim trošenjem supstrata. U odnosu na pijesak, manje je rastresit te ima veću kompaktnost, ima dobar kapacitet za vodu, ali manju propusnost. Kapilarno dizanje vode može biti jako visoko. Čestice praha imaju veću površinu po jedinici mase te su često presvučene prijanjajućim slojem gline (Hillel, 2004.; Kisić, 2012.). Zbog nestabilne strukture takva su tla podložna stvaranju pokorice (Kisić, 2012.).

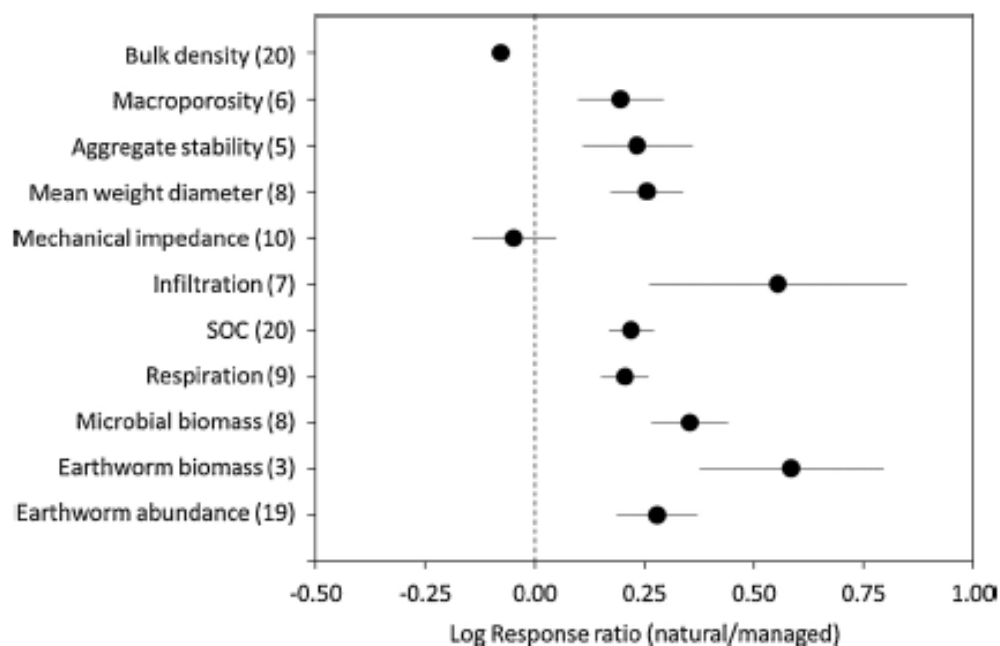
Glina ili grubo koloidna frakcija ima dimenzije manje od 0,002 mm promjera te predstavlja najvažniju frakciju krute faze tla. To je finožrnata čestica koja u kombinaciji s vodom postaje vrlo plastična dok se sušenjem formiraju tvrdi fragmenti (Hillel, 2004.; Kisić, 2012.). Međutim postoje razlike među znanostima koje različito definiraju pojam gline pa se tako u geologiji glinom smatraju čestice manje od 4 μm promjera, koloidni kemičari glinom smatraju čestice od 1 μm dok se u tloznanstvu glinom smatraju čestice promjera manjeg od 0,002 mm (Kisić, 2012.). Sastoji se od primarnih i sekundarnih minerala koji potiču iz matične stijene te nosi negativan naboj (Hillel, 2004.).

Glina ima veliki utjecaj na fizikalne, kemijske i biološke karakteristike i dinamiku tla. Za razliku od pijeska i praha glina je u potpunosti nepropusna za vodu te na sebe veže velike količine molekula vode. Glinu karakterizira ljepljivost, bubrenje u vodi čime povećava svoj volumen, a u suhom stanju kontrahira te postaje jako tvrda. Jedna od najvažnijih karakteristika glina je koloidnost. Koloidno svojstvo definira veliku aktivnu površinu gline (Kisić, 2012.).

Uz mehanički sastav struktura je još jedan u nizu važnih faktora plodnosti tla te je indikator povoljnih fizikalnih, kemijskih i bioloških svojstava tla (Tomić, 1988.; Kisić, 2012.). Strukturu tla čine mehanički elementi međusobno povezani u veće skupine čineći tako strukturne agregate. Podrijetlo strukturnih agregata može biti prirodno i antropogeno (Kisić, 2012.). Važno je razlikovati prirodnu strukturu koja nastaje prirodnom agregacijom i bioturbacijom i antropogenu strukturu koja nastaje obradom tla (Or i sur., 2021.).

Prirodno formiranje strukture nastaje kao posljedica biološke aktivnosti (probijanje korijena, glista, nakupljanje biopolimera i dr.) čime se formiraju biopore u tlu (Tisdall i Oades, 1982.). Struktura se može razlikovati ovisno o mehaničkom razbijanju i rahljenju kod postupaka obrade tla. Prilikom uporabe poljoprivrednih strojeva, odnosno mehanizacije može doći do narušavanja (zbijanja) prhke strukture tla. To može znatno promijeniti prirodnu strukturu tla koja se stvarala desetljećima (Dexter, 1988.). Dunne i sur. (1991.) navode kako kumulativni efekt vegetacije te veći udio biopora koje su nastale raspadanjem korijena imaju pozitivan utjecaj na hidrauličku vodljivost i infiltracijsku sposobnost (Slika 2.2.3.).

Struktura tla definirana je veličinom, oblikom, te rasporedom strukturnih agregata. Na osnovi tih kriterija agregati se mogu podijeliti na mikroagregate – do 0,25 mm promjera, mezoagregate – od 0,25 do 2,00 mm promjera, makroagregate – od 2,00 do 50,0 mm promjera i megaagregate – više od 50 mm promjera (Kisić, 2012.). Formiranje agregata može se odvijati desetljećima (Kay, 1990.; Jastrov i sur., 1998.). Agregati veličine od 0,25 do 10 mm povoljno utječu na vodozračne odnose u tlu (Vučić, 1976.). Nakon vlaženja tla strukturni agregati međusobno se spajaju (Or i Ghezzehei, 2002.).



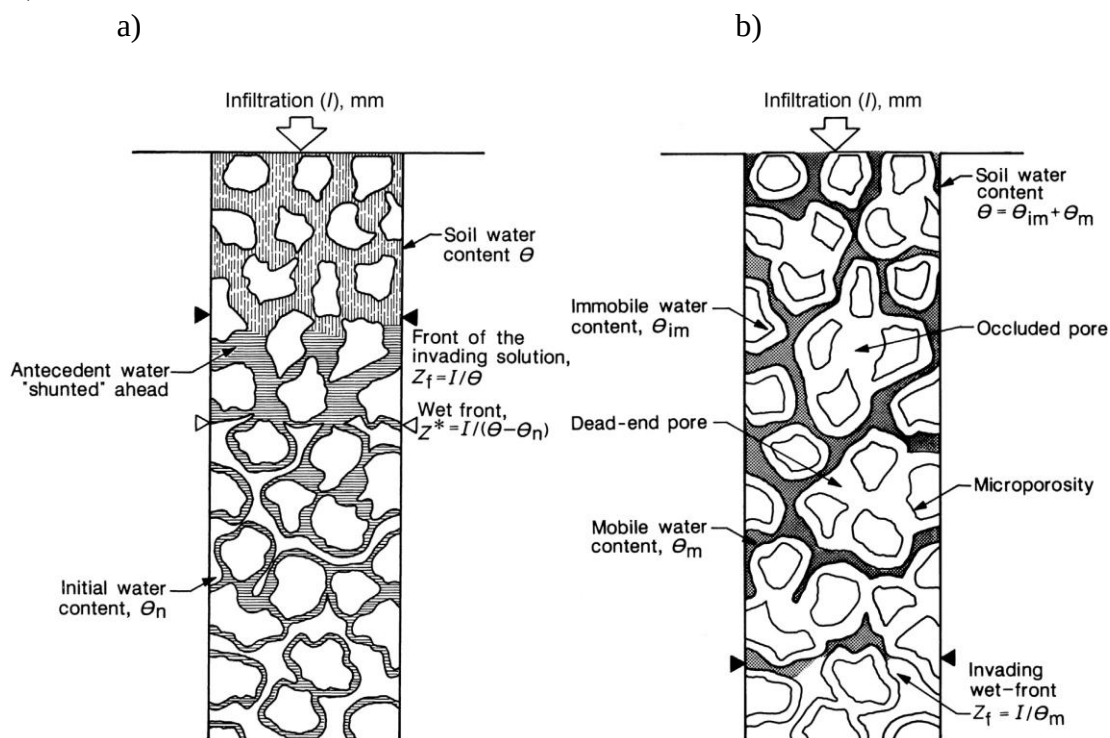
Slika 2.2.3. Struktura prirodnog i obradivog (korištenog) tla s podacima o usporedbi iste lokacije (isti tip tla, klimatski parametri i metode kvantifikacije pojedinih parametara)

Izvor: Or i sur., 2021.

Nestabilnost strukturnih agregata može smanjiti sposobnost tla za primanje vode (Tomić, 1988.). Povoljna struktura je rahla, rastesita i prozračna. Strukturno tlo je porozno što znači da ima dobar kapacitet za vodu te stabilna struktura uvjetuje dobar vodni režim tla i stvara rezerve. Tla stabilne strukture manje su podložna eroziji vodom i vjetrom (Kisić, 2012.).

2.3. Količina vode u tlu i vodni potencijal

Sadržaj vode u tlu θ je količina vode koja je određena težinom i volumenom, a definira se kao postotak izgubljene mase iz tla sušenjem na 105 °C do konstantne mase (Soil Science Society of America, 2008). Izražava se u jedinici mase vode po jedinici mase suhog tla (kg/kg) ili u jedinici volumena vode po jedinici volumena tla (m^3/m^3). Sastoji se od pokretne (Slika 2.3.1. a) i nepokretne vode (Slika 2.3.1.b). Nepokretna voda u tlu može nastati kao posljedica začepljenja pora, nepokretljivosti vode, mikroporoznosti te vezane vode u tlu (Kirkham, 2004.).



Slika 2.3.1. a) Tlo s prikazom toka vode u tlu (eng. *mobile water*), b) Tlo s prikazom toka vode u tlu i vode koja je nepokretna (eng. *soil mobile-immobile water*).

Izvor: Kirkham, 2004.

Sadržaj vode jedan je od najvažnijih fizikalnih parametara te je pri određivanju hidrauličkog karaktera tla potrebno znati sadržaj vode u tlu. Osim sadržaja vode važno je znati i količinu zraka, temperaturu i mehaničku impendanciju ili otpor (Kirkham, 1973.).

Sadržaj vode u tlu regulira sadržaj zraka i izmjenu plinova u tlu što direktivno utječe na korijensku i mikrobiološku aktivnost te kemijsko stanje tla kao što su oksidoredukcijski procesi. Nadalje, mehanička svojstva poput konzistencije, plastičnosti, čvrstoće, savitljivosti i ljepljivosti također će ovisiti o količini vode u tlu. Što je veći sadržaj vode to je veći postotak bubrenja kod glinovitih tala (Hillel, 2004.).

Potpuno zasićenje ili saturacija odgovara volumenu pora u tlu no takav slučaj se u prirodi teško pronalazi. To se događa zbog mjehurića zraka unutar pora koji mogu nastati kao posljedica mikrobiološkog djelovanja ili u trenutku porasta temperature. Stoga se često koristi izraz vlažnost tla te relativna vlažnost umjesto apsolutne vlažnosti (Hillel, 2004.).

Određivanje količine vode u tlu provodi se zbog razumijevanja kemijskih, mehaničkih, hidroloških i bioloških odnosa (Hillel, 2004.). Prilikom određivanja sadržaja vode koriste se izravne i neizravne metode (Gardner, 1996.; Topp i Fereć, 2002.). Postoji nekoliko metoda kojima se može odrediti količina vode u tlu te je vrlo važno da mjerenje bude precizno (Mohanty i sur., 1997.; Kirkham, 2004.). U indirektno metode mjerenja spada gravimetrijska metoda mjerenja relativne količine vode u tlu, a najpogodnija je za mjerenje količine vode u korijenovoj zoni aktivnog usvajanja vode. Postupak određivanja sadržaja vode gravimetrijskom metodom je dugotrajan, a metoda je destruktivna te se ne može automatizirati (Kirkham, 2004.). Prednost gravimetrijske metode su jednostavnost i visok stupanj točnosti (Song i sur., 1998.).

Za indirektno mjerenje relativne količine vode u tlu koriste se neutronske sonde, TDR (Time Domain Reflectometry) senzori, gama zrake, te metoda mjerenja električnog otpora (Hillel, 2004.). TDR senzori je metoda koju odlikuje visok stupanj točnosti te se za razliku od gravimetrijske metode može automatizirati. Nedostatak ove metode je visoka cijena instrumenta i složeno rukovanje te zahtjeva baždarenje za tla s visokim udjelom organske tvari (Topp i sur., 1980.; Kirkham, 2004.).

Tehnika neutronske sonde koristi se za mjerenje sadržaja vode na većim dubinama. Metoda je pokazala neučinkovitost pri mjerenju u zoni korijena te unatoč jednostavnom rukovanju, vrlo je dugotrajna i ne može se automatizirati (Kirkham, 2004.).

„Vodni potencijal tla reflektira energetski status tekućine (vode) u određenoj točki u poroznom sustavu (tlu)“ (Filipović, 2015.). Također se može definirati i kao kemijski potencijal vode, a opisuje slobodnu energiju po jedinici volumena u otopini u odnosu na standardno stanje vode. To je razlika potencijala između tvari i čiste vode (Petek i Lazarević, 2015.). Voda se u tlu drži silama tenzije, adhezije i kohezije za razliku od čiste vode, stoga je potencijal vode u tlu negativan. Sila koja djeluje na vodu u tlu djeluje iz područja višeg u područje nižeg potencijala (Kirkham, 2004.). Poznavanje energetskog statusa vode u pojedinoj točki u tlu omogućava nam utvrđivanje sile koja djeluje na tlo te dobivamo informaciju o tome koliko je voda snažno vezana za čestice tla. Također, pomoću energetskog statusa vode u tlu moguće je utvrditi energiju koja je biljci potrebna da usvoji dostupnu vodu (Hillel, 2004.).

Kretanje vode unutar poroznog sustava vrlo je sporo, a potencijalna energija je posljedica položaja ili stanja u tlu. Potencijalna energija vode u tlu se razlikuje se od točke do točke. Dakle, da nema razlike u potencijalu ne bi došlo ni do gibanja vode (Hillel, 2004.).

Najvažnije komponente vodnog potencijala su: matrični, gravitacijski i hidrostatski potencijal. Gravitacijski potencijal je energija vertikalnog kretanja vode prema središtu Zemlje. Definira se promjenom visine u odnosu na referentnu vrijednost (Petek i Lazarević, 2015.). Referentna vrijednost se može razlikovati ovisno o upotrebi, odnosno znanstvenom području. Najčešće se uzima razina mora kao referentna vrijednost, a osim toga može se uzeti i razina podzemne vode ili površina tla. Referentna se vrijednost prilagođava kako bi se izbjegle negativne vrijednosti (Kirkham, 2004.). Gravitacijski potencijal je najizraženiji nakon oborina ili navodnjavanja te

se vremenom postupno smanjuje (Petek i Lazarević, 2015.). Ne ovisi o kemijskim ni tlačnim uvjetima već samo o relativnoj nadmorskoj visini (Hillel, 2004.).

Matrični potencijal opisuje potencijalnu energiju između matriksa tla i vode (Kirkham, 2004.). To je potencijal negativnog tlaka vlage u tlu, a nastaje kao posljedica interaktivnih kapilarnih i adsorpcijskih sila između vode i tla. Sile koje djeluju vežu vodu za čestice tla i na takav način smanjuju njezin potencijal. Za mjerenje matričnog potencijala vode koriste se tenziometri (Hillel, 2004.).

Hidrostatski potencijal nastaje zbog djelovanja hidrostatskog tlaka. Hidrostatski tlak može imati pozitivan učinak usred čega dolazi do povećanja hidrostatskog potencijala. Negativan tlak odnosno podtlak ima negativan učinak što znači da smanjuje vodni potencijal (Petek i Lazarević, 2015.). Slobodna voda na površini ima potencijal jednak 0 MPa. Voda ispod površine ima pozitivan potencijal, a voda koja se diže kapilarnom cijevi ima negativan potencijal (Hillel, 2004.). U realnosti se to događa u trenutku navodnjavanja i oborinama kada se ulaskom vode javlja pozitivan hidrostatski tlak i isparavanjem vode iz lista kada se voda izdiže putem ksilema prema listu te tako nastaje negativan hidrostatski tlak.

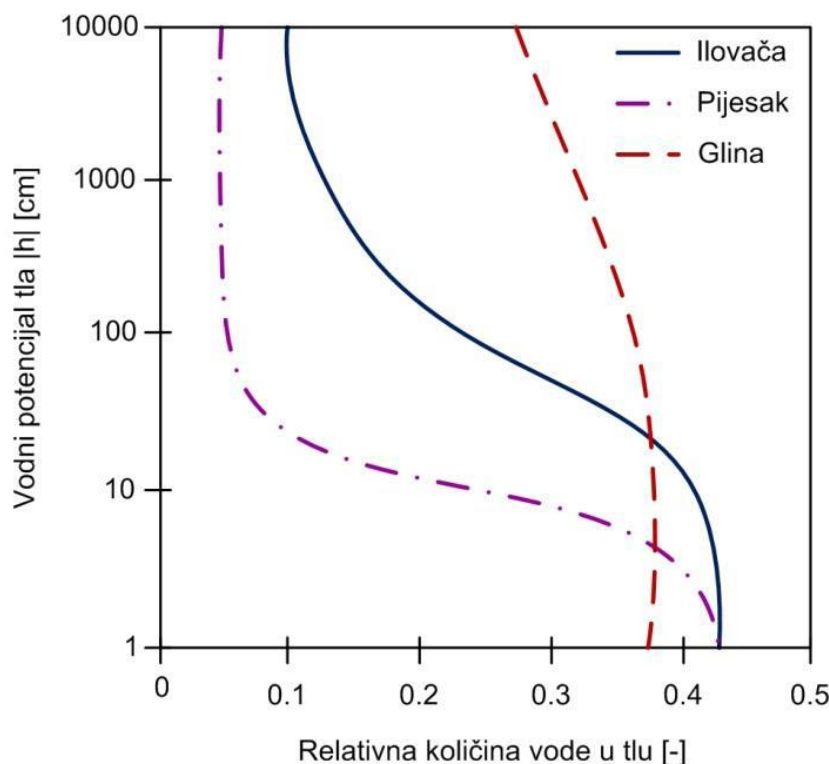
2.4. Hidrauličke značajke tla

Tlo je trofazni sustav kojeg sačinjavaju kruta, tekuća i plinovita faza (Kisić, 2012.). Zbog takvog odnosa i različitosti između pojedinih faza često je vrlo kompleksno odrediti hidrauličke karakteristike tla. Hidrauličke karakteristike definiraju međusobne odnose između energetskog statusa vode, kretanja vode i plinova u tlu. Hidrauličke karakteristike razlikuju se ovisno o temperaturi tla, rasporedu pora te obliku agregata, površinskom stanju tla te o karakternim razlikama tekućine u porama tla (Durner i Flühler 2005.). Sadržaj vode u tlu ovisan je o hidrauličkim značajkama (Šimunek i sur., 1998.). Poznavanje hidrauličkog karaktera tla odnosno karakteristike zadržavanja vode i hidrauličku vodljivost nesaturiranog tla od velike je važnosti kako bi se razumjela problematika kretanja vode u tlu. Hidraulička svojstva određuju protok vode u nezasićenoj zoni i usko su povezana s uvjetima vlage u tlu, emisijom ugljika, stakleničkim plinovima, dinamikom hranjivih sastojaka te razvojem vegetacije (Holden, 2005.; Waddington i sur., 2015, Tiemeyer i sur., 2016.; Frank i sur., 2017.;). Hidraulička svojstva organskih tala razlikuju se od hidrauličkih svojstva mineralnih tala u nekoliko segmenata pa tako kod organskih tala uglavnom ovise o stupnju razgradnje i sastavu treseta što nije slučaj kod mineralnih tala (von Post i Granlund, 1926.). Ovisno o stanju vlažnosti, organska tla bubre ili se skupljaju čime je određen geometrijski raspored pora u tlu što ima direktan utjecaj na hidraulička svojstva (Schwarzel i sur., 2002.; Golubev i Whittington, 2018.).

U posljednjih nekoliko desetaka godina razvile su se razne metode za određivanje hidrauličkih svojstava u različitim mjerilima (Dane i Hopmans, 2002.; Durner i Lipsius.; 2005.). Za određivanje hidrauličkih svojstava tla koriste se različite metode poput izravnih i inverznih metoda od kojih je izravna metoda najčešće u upotrebi. Izravna ili pojednostavljena metoda je metoda isparavanja koja koristi analitički postupak za određivanje hidrauličkih svojstava tla. U istraživanjima se prilikom korištenja svih metoda koriste van Genuchten Maulem i Peters-Durner-Iden modeli (Dettman, 2019.). U laboratorijskim ispitivanjima se uglavnom koristi metoda isparavanja ili metoda procjeđivanja (van Dam i sur.; Hopmans i sur., 2002.; Dettman i sur., 2014.; 1994.). U posljednje se vrijeme sve češće koristi metoda isparavanja zbog kratkog trajanja u odnosu na metodu procjeđivanja gdje je potrebno vrijeme da se uspostavi hidraulička ravnoteža u stupcu tla za zadani tlak (Dettman, 2019.). Jedan od načina kojim se također mogu mjeriti hidraulička svojstva je tlačni infiltrometar koji ima mogućnost kontrole infiltracije i retenciju vode (Kirkham, 2004.).

Odnos između relativne količine vode u tlu θ i vodnog potencijala određuje se retencijskim krivuljama (Slika 2.4.1.). Upravo su vodni potencijal i relativna količina vode dva glavna parametra koja određuju izgled krivulje. Kada je tlo u potpunosti ispunjeno vodom tada je vrijednost vodnog potencijala blizu 0 te je voda za čestice tla vezana kapilarnim silama. Kako se sadržaj vode smanjuje tako se vodni potencijal povećava, odnosno sile vezanja postaju sve jače. Stoga kako bi došlo do ekstrakcije vode iz tla potrebna je sve jača sila. Pri vrlo niskom potencijalu voda se u tlu nalazi u najsitnijim porama. Za definiranje oblika retencijskih krivulja tla koriste se različiti modeli, a najčešće se primjenjuje van Genuchten – Maulemov model (Filipović, 2015.).

Kod poroznijeg tla doći će do bržeg procjeđivanja vode kroz profil tla nego kod tla teže teksture kao što su glina, ilovača i praškasta ilovača. Tako će se kod lakšeg tla voda procijediti pri maloj vrijednosti negativnog vodnog potencijala, a kod teksturno težeg tla voda će se procijediti pri vrlo velikim vrijednostima negativnog vodnog potencijala.



Slika 2.4.1. Primjer retencijske krivulje tla za pijesak, ilovaču i glinu (prikazano prema hidrauličkim parametrima preuzetima od Carsel i Parish, 1988).

Izvor: Ondrašek i sur. 2015.

Hidraulička provodljivost je sposobnost tla za transport vode te ilustrira inverznu povezanost s otporom toka vode u tlu (Filipović, 2015.). Pojam hidrauličke provodljivosti (K) bitno se razlikuje od propusnosti tla (Kirkham, 2004.) te se definira kao kubni metar vode koji prođe kroz kubni metar tla dnevno pod utjecajem hidrauličkog gradijenta (Kirkham i Powers, 1972.). Za praškasto glinastu ilovaču hidraulička provodljivost se uglavnom kreće oko 30 m/dan dok se kod glinastih tala vrijednosti hidrauličke vodljivosti kreću oko 0,05 m/dan (Kirkham, 1961.). Hidraulički karakter određuju pukotine u tlu, pore nastale korijenskom i biološkom aktivnošću te stabilnost strukturnih agregata. Postupci obrade tla povećavaju hidrauličku provodljivost dok zbijenost tla uzrokovana gaženjem smanjuje hidrauličku provodljivost (Kirkham, 2004.). Hidraulički parametri tla opisani su pomoću van Genuchten- Maulemova modela (van Genuchten, 1980). Tijekom faze sušenja tla stupanj hidrauličke provodljivosti se smanjuje. Nadalje, smanjenjem volumena pora smanjuje se i hidraulička provodljivost stoga će kod teksturno lakših tala hidraulička provodljivost biti veća u odnosu na tla teže teksture. Također, poznato je kako je hidraulička provodljivost u nesaturiranom tlu znatno slabija od hidrauličke provodljivosti u saturiranom tlu (Filipović, 2015.).

2.5. Primjena modela u agroekosustavima

Modeli su alati pomoću kojih se prikazuju predmeti, procesi i pojave iz realnih uvjeta (Žugaj, 2006.). Prema Kumaru (2001.) modeli su konceptualni opisi ili aproksimacije pomoću kojih je moguće opisati neki fizički sustav koristeći pritom matematičke jednadžbe. Pomoću modela moguće je približno ilustrirati sustave i procese no važno je napomenuti kako modeli nemaju mogućnost da prikažu identičnu kopiju stanja na terenu već ih se shvaća kao aproksimaciju. Matematički modeli koriste matematičke jednadžbe koje pojednostavljaju prikaz nekog hidrogeološkog sustava. Kod modeliranja općenito su važni stručnost i razumijevanje problematike kako bi točnost modela bila opravdana. Točnost modela će također ovisiti o tome koliko matematičke jednadžbe mogu aproksimirati neki fizički sustav (Mustać, 2015.). Veliki problem današnjice je onečišćenje okoliša, stoga je važna kontrola potencijalno štetnih tvari koje se ispuštaju u ekosustav. To je moguće postići primjenom različitih matematičkih modela kojima se simuliraju uvjeti iz okoliša. Postoji široka primjena matematičkih modela konkretno u agronomskom aspektu pa tako i za testiranje i provedbu pokusa kod različitih tipova tala i uzgajanih kultura, gnojidbe i sredstva za zaštitu bilja u cilju zaštite sustava tla i vode od onečišćenja. Modeli su također u primjeni kod projektiranja i sanacije odlagališta otpada te za zbrinjavanje različitog otpada. Nadalje, postoji široki niz modela za simulaciju različitih procesa koji imaju mogućnost opisivanja jednostavnijih i složenijih procesa u različitim područjima primjene (Filipović, 2015.).

Primjena agro-eko-hidroloških modela u agronomskoj praksi neophodna je za upravljanje oskudnim vodnim resursima, normalnim rastom i razvojem bilja te zaštiti od štetnih utjecaja odnosno zagađivača (Chen i sur., 2019.). Veliki problem današnjice su nedostatak vode i problem zasljenjenosti, toksične tvari i ostali zagađivači koji imaju negativan utjecaj na produktivnost usjeva (Molden, 1997.; Cominelli i sur., 2013.). Ne bi li se izbjegao negativan utjecaj zagađivača i zasljenjivanja te maksimizirao prinos usjeva i dotok vode, često se provode razne mjere i terenski eksperimenti (Tuong i Bhuiyan, 1999.; Kahlown i Azam, 2003.). Ipak, takvi pothvati zbog usjeva na različitim uvjetima u tlu, vodi i slanosti često mogu biti vrlo dugotrajni, mukotrpni i skupi posebice za dugoročne eksperimente koji uključuju česta mjerenja. Stoga se sve više koriste alati za simulaciju različitih procesa u cilju smanjenja primjene eksperimenata, optimizacije rada i upravljanja procesima. Validirani modeli osiguravaju pouzdano korištenje te istraživanje različitih strategija u cilju poboljšanja i povećanja prinosa usjeva (Chen i sur., 2019.).

Kod problematike toka podzemne vode i pronosa tvari koriste se modeli toka podzemne vode koji se zasnivaju na određenim pojednostavljenim pretpostavkama. Pretpostavke modela mogu biti smjer tečenja, geometrija vodonosnika (akvifera), heterogenost ili anizotropija sedimenata unutar vodonosnika, mehanizmi pronosa tvari, kemijske reakcije i dr. Prema hidrogeološkim značajkama i konceptualnom modelu određuje se oblik modela koji se namjerava koristiti. Oblici modela općenito mogu biti 1D, 2D ili 3D. Odabrani računalni program određuje se prema uvjetima koji su zabilježeni na terenu. Na temelju ispravno određenih hidrogeoloških obilježja potrebno je simulirati realne uvjete s terena (Mustać, 2015.).

Za modeliranje toka vode i pronosa tvari u nesaturiranoj i djelomično saturiranoj zoni koristi širok spektar programa. HYDRUS je softverski program koji osim numeričkih modela uključuje i analitičke modele za pronos tvari u tlu. Numerički modeli uključuju jednodimenzionalni (1D), dvodimenzionalni (2D) i trodimenzionalni (3D) oblik. Analitički modeli se nalaze u sklopu programa CXTFIT (Toride i sur., 1995.) i STANMOD (Šimunek, 1999.). U sklopu HYDRUS programa se također nalaze i baze podataka odnosno alati za analizu hidrauličkih svojstava tla: RETC (van Genuchten i sur., 1991., Schaap i sur. 2001.), ROSETTA (Schaap i sur., 2001.) i UNSODA (Leji i sur. 1999.). LAWSTAC je program koji se koristi za simulaciju toka vode i otopljenih tvari u slojevitom tlu (Chen i sur. 2019.). Program SWAP se također koristi za kontrolu i rješavanje problematike kretanja vode, zagađivača i transporta topline u nesaturiranoj zoni (Van Dam i sur., 2008.). Program SUTRA je program za simulaciju gibanja tekućina i pronos energije te otopljenih tvari u podzemlju (Voss i sur., 2002.). ANIMO je program koji se koristi za procjenu mogućnosti korištenja gnojidbe pa tako i za kontrolu količine ispiranja nitrata i fosfora (Groenendijk i sur., 2005.). Za tla u kojima prevladava vrlo raznolika struktura i različit odnos mikro- i makropora moguće je koristiti MACRO program. Program se koristi za simulaciju 1D toka voda i reaktivnog transporta što uključuje i brzinu protoka i transport tvari. Osim toga MACRO program ima mogućnost simulacije procesa razgradnje pesticida (Jarvis i sur., 1991.). LEACHM je program koji se sastoji od četiri modula čija je primarna uloga simulacija vertikalnog toka vode i tvari. Svaki od modula vodi različite opise procesa kemijske ravnoteže, transformacije i degradacije tvari. Za potrebe simulacije toka vode koristi se modul LEACHW, za procese razgradnje pesticida služi modul LEACHP, a za dušik i fosfor LEACHN dok se za stupanj zaslaničenosti u karbonatnim tlima može koristiti LEACHC (Hutson i sur., 1992.). RZWQM je model koji omogućava simulaciju kakvoće vode u zoni korijena (Hanson i sur., 1998.).

3. Materijali i metode

3.1. Opis lokacije

Istraživanje se provodilo u Vinogradarsko-vinarskom pokušalištu Jazbina na jednoj od parcela (slika 3.1.1.) u sklopu SUPREHILL projekta s ciljem precizne procjene nelinearnih procesa poljoprivrednog zemljišta na padinskom prostoru. Vinogradarsko-vinarsko pokušalište Jazbina se nalazi na južnim obroncima Zagrebačke gore na brijegu Biskupov čret u sjevernom dijelu Grada Zagreba te njime gospodari Agronomski fakultet od 1939.godine. Prostire se na oko 25 ha površine od čega je 6 ha u aktivnoj primjeni za proizvodnju vinskog grožđa, 2 ha zauzimaju voćnjaci dok ostatak površine predstavlja infrastrukturu pokušališta. Tlo na lokaciji istraživanja je klasificirano kao obronačni pseudoglej.



Slika 3.1.1. Prikaz lokacije istraživanja na vinogradarsko vinarskom pokušalištu Jazbina

Izvor: [Vedran](#) Krevh

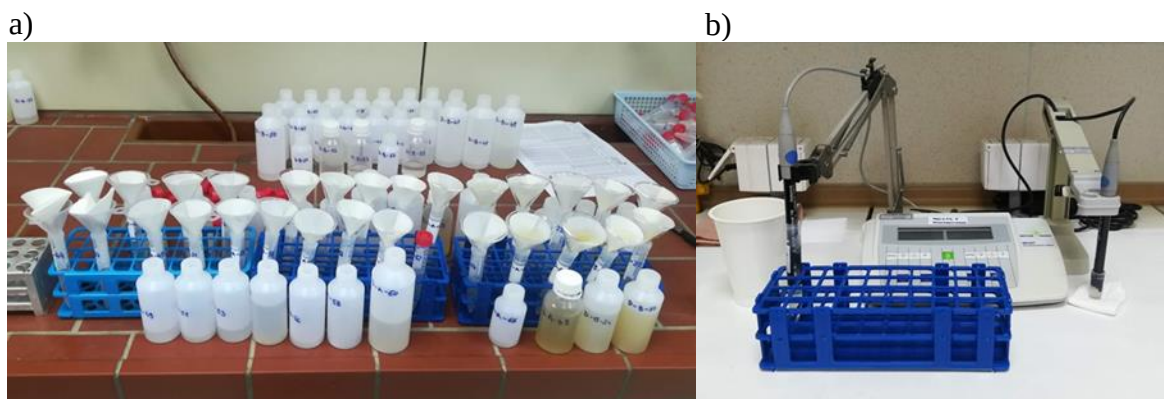
3.2. Opis metodologije određivanja fizikalno-kemijskih i hidropedoloških značajki tla

3.2.1. Metodologija određivanja fizikalno-kemijskih značajki tla

Prilikom postavljanja pokusa na terenu su se uzimali porušeni uzorci tla za potrebe provedbe analize fizikalno-kemijskih značajki tla pokusnog projekta SUPREHILL. Sveukupno je prikupljeno 34 uzoraka s 3 dubine 0–30, 30–60, 60–90 cm. Prema standardiziranoj normi HRN ISO 11464: 2004 određivanja fizikalno kemijskih značajkama uzorci su se sušili na zraku sobne temperature te su se nakon postupka sušenja usitnjavali i prosijavali kroz sito promjera mreže 0,5 i 2,0 mm.

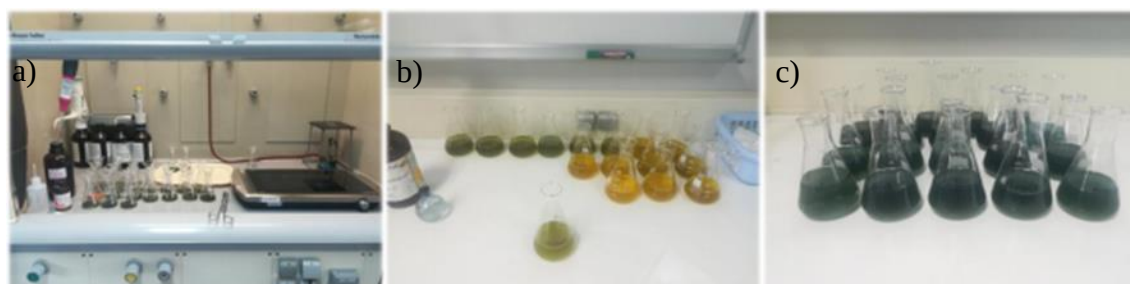
Prema HRN ISO 10390:2005 na *MettlerToledo* pH-metru određivao se pH tla u suspenziji u vodi u omjeru tlo/voda 1:5, u otopini 1 mol/l KCl-a (omjer tlo/KCl 1:5) te u otopini 0,01 mol/l CaCl_2 u omjeru: tlo/ CaCl_2 1:5. Potencijalna kiselost mjerila se u suspenziji tla s KCl-om dok se aktivna kiselost izračunavala mjerenjem pH u suspenziji tla s destiliranom vodom. Plastičnom laboratorijskom žlicom uzeto je 5 g reprezentativnog uzorka tla te je on stavljen u plastičnu kivetu. Uzorak se prelio s 25 ml destilirane vode te se postupak ponovio u drugoj, odnosno trećoj plastičnoj kiveti u kojima su uzorci tla prelivevi s 25 ml 1M KCl-a, odnosno 0,01M CaCl_2 . Nakon toga su se pripremljeni uzorci 5 minuta miješali u rotacijskoj mućkalici nakon čega su se 2 sata ostavili u mirovanju. Nakon mirovanja provedeno je mjerenje reakcije tla pH metrom (Slika 3.2.1.1.) koji je prethodno kalibriran dvjema pufer otopinama različitih reakcija ($\text{pH}=7,00$ i $\text{pH}=4,01$ pri $25\text{ }^\circ\text{C}$). U ispitivanju je korišten i referentni uzorak tla dobiven međunarodnom usporedbom laboratorija za analize tla i sedimenata WEPAL-ISE (Houba i sur., 1996.) u svrhu kontrole kvalitete provođenja postupka.

Električna vodljivost (EC) tla izmjerena je u suspenziji u vodi u omjeru tlo/voda 1:5 prema normi HRN ISO 11265:2004 na EC-metru MPC 227. U plastične kivete odvagano je 5 g uzorka tla te je dodano 25 ml destilirane vode. Tako pripremljen uzorak stavljen je u rotacijsku mućalicu u trajanju od 30 minuta. Uzorak je potom ostavljen na mirovanju 2 sata nakon čega je mjerena E.C. na konduktometru (Slika 3.2.1.1. b) koji je prethodno kalibriran pomoću 2 standarda (Standard 1 = 0,100 M KCl od 12,88 mS/cm; i Standard 2 = 0,010 M KCl od 1413 $\mu\text{S/cm}$ pri $25\text{ }^\circ\text{C}$). U svrhu kontrole kvalitete provođenja postupka, u ispitivanju je korišten i referentni uzorak tla dobiven međunarodnom usporedbom laboratorija za analize tla i sedimenata WEPAL-ISE (Houba i sur., 1996).



Slika 3.2.1.1. a) Priprema uzoraka za mjerenje pH i električne vodljivosti, i b) mjerenje pH tla i električne vodljivosti pH-metrom i konduktometrom (EC-metar) *MettlerToledo MPC227* u suspenziji u vodi.

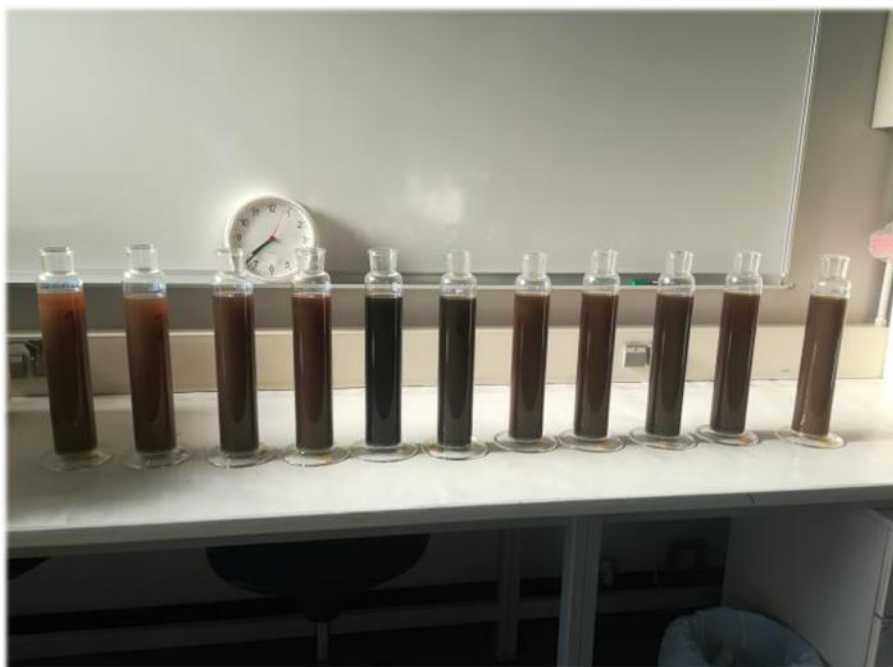
Organski ugljik (C_{org}) određen je sulfokromnom oksidacijom (HRN ISO 14235:1998). U Erlenmeyerovu tikvicu od 100 ml odvađnuto je 0,3 g tla, odnosno 0,1 g tla u slučaju visokog udjela humusa. U istu tikvicu pipetirano je 10 ml 0,067 M otopine kalijevog bikromata ($K_2Cr_2O_7$), nakon čega je dodana mala količina srebrnog sulfata Ag_2SO_4 (oko 0,1 g). Na tikvicu je stavljen mali stakleni lijevak (Slika 3.2.1.2.a) te se tikvica zajedno s lijevkom prenijela na ploču za kuhanje na zagrijavanje. Uzorak je kuhan 5 minuta od početka vrenja te je nakon toga uklonjen s kuhala i ostavljen na hlađenje. Nakon hlađenja, sadržaj tikvice se kvantitativno prenio u gradiiranu Erlenmeyerovu tikvicu od 300 ml pri čemu su lijevak i mala Erlenmeyerova tikvica dobro isprani destiliranom vodom. Sadržaj u velikoj Erlenmeyerovoj tikvici nadopunjen je destiliranom vodom do oznake od 150 ml. U tako pripremljen uzorak (Slika 3.2.1.2.b) dodano je 2 ml smjese koncentrirane H_3PO_4 i koncentrirane H_2SO_4 te 8 kapi DFS indikatora (difenilaminsulfonska kiselina). Nakon toga je uzorak titriran 0,1 M otopinom Mohrove soli ($Fe(NH_4)_2(SO_4) \times 6H_2O$) do prve promjene boje u zelenu (Slika 3.2.1.2.c). Za slijepu probu je umjesto tla korišteno 0,3 g kremenog pijeska uz jednaku pripremu kao i za uzorke tla. U svrhu kontrole kvalitete provođenja postupka, u ispitivanju je korišten i referentni uzorak tla dobiven međunarodnom usporedbom laboratorija za analize tla i sedimenata WEPAL-ISE (Houba i sur., 1996).



Slika 3.2.1.2. Određivanje udjela organskog ugljika (C_{org}) u tlu – Priprema uzoraka (a), uzorci prije titracije (b), uzorci poslije titracije (c).

Prema standardnoj proceduri HRN ISO 11277:2004 metodom prosijavanja određen je granulometrijski sastav (udio pijeska, gline i praha). Na analitičkoj vagi odvađano je 10 g uzorka tla koje je prebačeno u Erlenmeyerovu tikvicu i preliveno s 25 ml 0,4 N otopine natrijevog pirofosfata ($Na_4P_2O_7 \times 10 H_2O$). Uzorak je lagano promiješan i ostavljen preko noći. Uzorak je sljedeći dan promućkan te je izvršeno direktno mokro prosijavanje kroz dva sita,

preko lijevka, u stakleni cilindar za sedimentaciju pri čemu su dobivene frakcije krupnog pijeska (2–0,2 mm) i sitnog pijeska (0,2–0,05 mm). Obje frakcije prebačene su u zasebne porculanske zdjele kako bi se istaložile. Nakon taloženja višak vode je izliven, a nataloženi pijesak se pomoću mlaza destilirane vode isprao u prethodno odvagane staklene posudice. Odvojene frakcije pijeska nadalje su sušene na ploči za kuhanje te potom u sušioniku na 105 °C oko 30 minuta nakon čega su izvagane na analitičkoj vagi s tri decimale te je određen udio krupnog i sitnog pijeska. Sadržaj cilindra za sedimentaciju nadopunjen je destiliranom vodom do oznake od 1000 ml te je začepljen gumenim čepom. Tako zatvoren cilindar mućkan je oko 1 minute u horizontalnom položaju te je ostavljen da miruje 4 minute i 48 sekundi, nakon čega je izvršeno prvo pipetiranje suspenzije tla i vode (10 ml) s dubine od 10 cm od površine suspenzije. Sadržaj pipete prebačen je u prethodno odvaganu staklenu posudicu. Taj je uzorak predstavljao udio čestica praha i gline koji se potom sušio i vagao na analitičkoj vagi s četiri decimale točnosti (0,0001). Nakon 4 sata s dubine od 5 cm od površine suspenzije, pipetirano je 10 ml suspenzije tla i vode. Sadržaj pipete prebačen je u staklenu posudicu, a ovim pipetiranjem dobio se udio gline. Staklene posudice sa suspenzijama tla i vode stavljene su na sušenje na temperaturu od 105 °C. Nakon sušenja u sušioniku, uzorci su prenošeni u eksikatoru, kako bi se spriječilo vlaženje uzoraka vlagom iz zraka, u laboratorij na vaganje. U svrhu kontrole kvalitete provođenja postupka, u ispitivanju je korišten i referentni uzorak tla dobiven međunarodnom usporedbom laboratorija za analize tla i sedimenata WEPAL-ISE (Houba i sur., 1996).



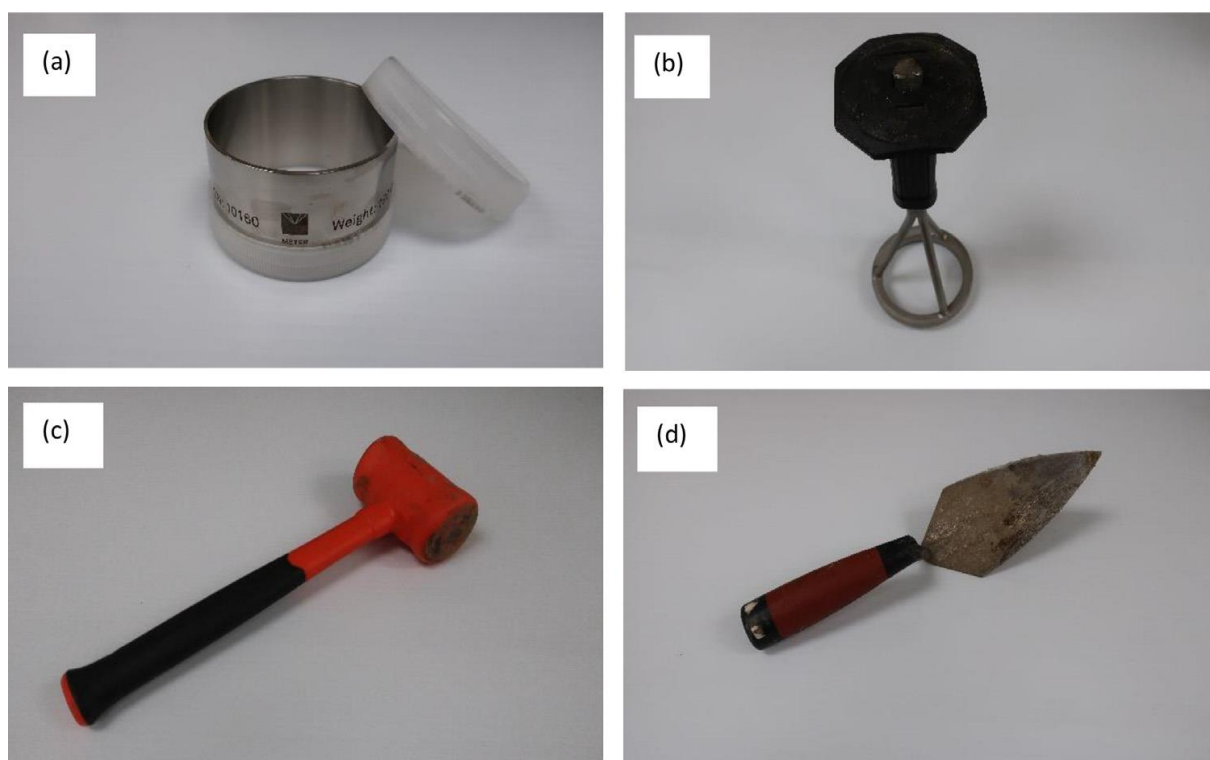
Slika 3.2.1.3. Cilindri sa suspenzijama tla prilikom određivanja granulometrijskog sastava tla.

Statistička obrada podataka (tekstura tla, pH i sadržaj organske tvari) provedena je u SAS programu (Statistical Analysis Software, SAS Institute Inc., Version 8.3 Update 1, Cary NC USA, 2019-2020). One-Way ANOVA korištena je za analizu varijance, a značajnost razlike

između srednjih vrijednosti određena je Tukeyevim testom (Tukey's Studentized range Honest Significant Difference – HSD Test) pri $P < 0,05$.

3.2.2. Metodologija određivanja hidropedoloških značajki tla

Za potrebe određivanja hidropedoloških značajki tla na terenu uzimali su se uzorci u neporušenom stanju na vrhu i dnu padine u 3 ponavljanja na dubinama od 15 do 20 cm za potrebe određivanja fizikalnih parametara: poroznost, hidraulička provodljivost, volumna gustoća tla te izradu retencijskih krivulja tla. Uzorkovanje se izvodilo pomoću specijalizirane opreme propisane od strane METER grupe. Oprema se sastoji od 4 alata neophodna za precizno uzorkovanje: cilindar, alat za umetanje prstena za uzorak, gumeni čekić i gleter (Slika 3.2.2.1.).



Slika 3.2.2.1. Alati za uzorkovanje tla: (a) cilindar, (b) alat za umetanje prstena za uzorke, (c) gumeni čekić, (d) gleter.

Izvor: Shokrana i Ghane, 2020.

Neporušeni uzorci uzimali su se i držali u cilindrima karakterističnog volumena od 250 cm^3 (Slika 3.2.2.2.) nakon čega su se čuvali u hladnjaku.



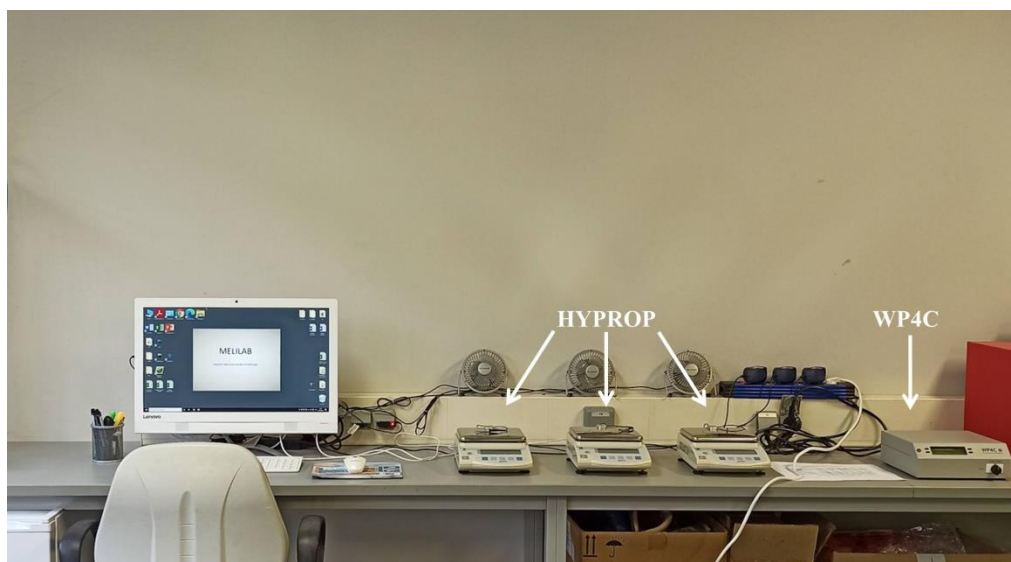
Slika 3.2.2.2. Cilindri volumena 250 cm³ za uzorkovanje neporušenih uzoraka tla (METER Group)

Uzorkovanje tla provodilo se na terenu gdje su se cilindri pozicionirali na površinu tla te su se uz pomoć alata za umetanje utiskivali u tlo i dodatno sabijali uz pomoć gumenog čekića. U trenutku potpunog ispunjenja cilindra tlom, pomoću gletera se vadio cilindar iz tla te se odstranjivao višak tla. Cilindri su se s gornje i donje strane zatvarali plastičnim čepovima (Slika 3.2.2.3.).



Slika 3.2.2.3. Uzorkovanje tla: (a) zabijanje cilindra, (b) ispunjeni cilindar, (c) uklanjanje tla s bočne strane cilindra, (d) stavljanje poklopca prije vađenja, (e) vađenje uzorka, (f) ravnanje površine cilindra
Izvor: Shokrana i Ghane, 2020.

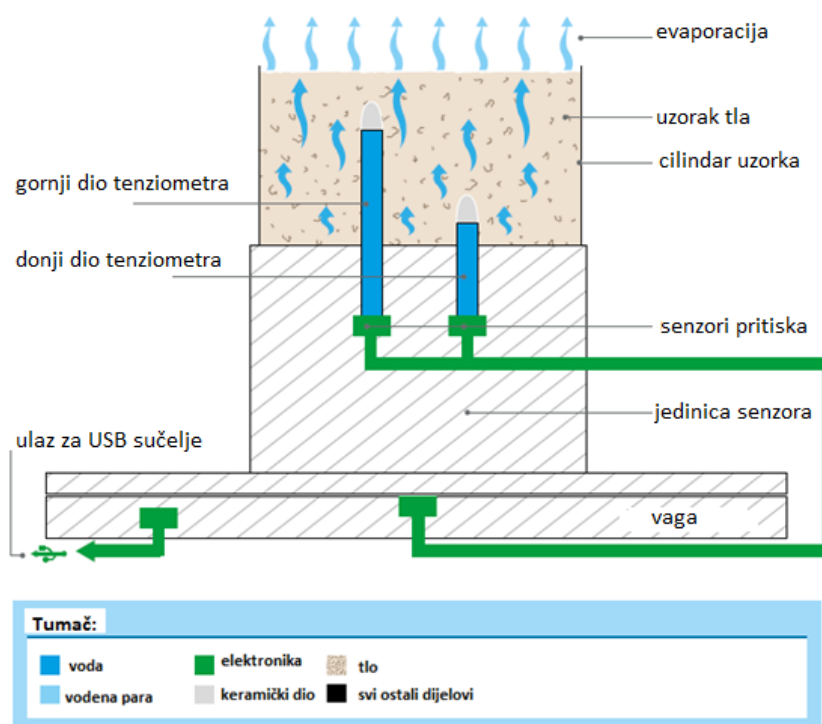
Za potrebe određivanja hidrauličkih parametara i procjene retencijskih krivulja tla koristili su se instrumenti WP4C i HYPROP (Slika 3.2.2.4). Hidraulički parametri tla određivali su se pojednostavljenom evaporacijskom metodom (Schindler i Müller, 2017.) pomoću automatiziranog sustava HYPROP u laboratoriju Zavoda za melioracije (MELILAB).



Slika 3.2.2.4. Oprema za procjenu retencijskih krivulja tla i određivanje hidrauličkih parametara (HYPROP, WP4C) smještena u laboratoriju Zavoda za melioracije.

3.2.2.1. Određivanje hidrauličkih značajki tla pomoću automatiziranog sustava HYPROP

HYPROP (HYdraulic PROPerTy Anaylser system) je automatizirani sustav koji koristi pojednostavljenu evaporacijsku metodu za određivanje hidrauličkih parametara tla (Slika 3.2.2.1.1.; Schindler i Müller, 2017.). Metoda se temelji na promjeni težine uzorka i matričnog (vodnog) potencijala u uzorku tla tijekom procesa sušenja evaporacijom (METER Group, 2015.).

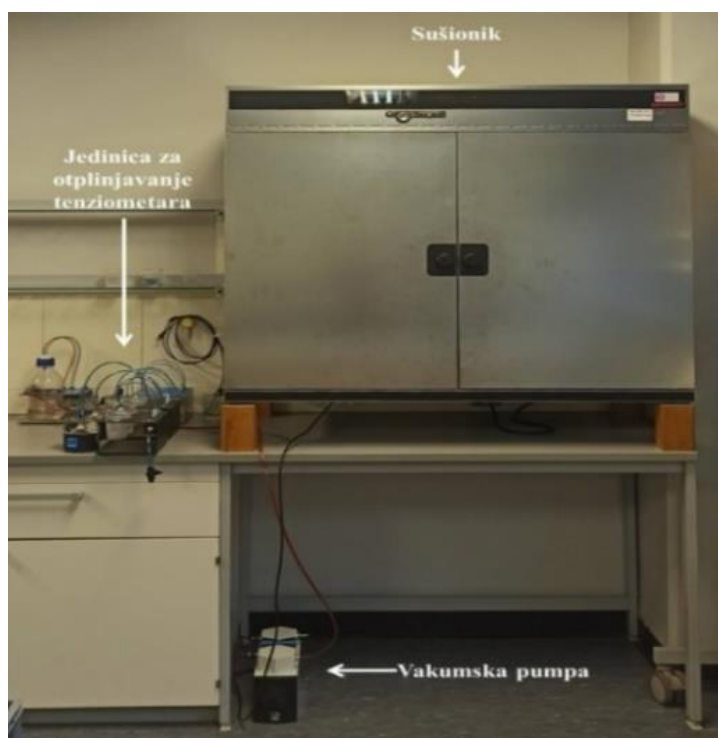


Slika 3.2.2.1.1. Shematski prikaz HYPROP sustava

Izvor: Mešić, 2018.

Sustav je namijenjen za korištenje u laboratoriju te je primjenjiv za većinu tala (Haghverdi i sur., 2018.). Prednosti ove metode u odnosu na tradicionalne metode su: mogućnost generiranja podataka o retenciji vode visoke rezolucije i skraćenog trajanja svakog mjernog ciklusa (za svaki pojedini uzorak) koji obično traje do nekoliko dana (Haghverdi, 2018.). Hidraulički parametri tla opisani su van Genuchten-Mualemovim modelom (van Genuchten, 1980.).

Kako bi se metoda ispravno provela, potrebno je izvršiti određeni postupak pripreme uzoraka i dijelova instrumenta koje propisuje METER grupa. Prvi korak u pripremi uzoraka za mjerenje je potapanje istih u posudu s vodom do njihove potpune saturacije pazeći pritom da se ne naruši struktura neporušenog tla. Cilindri su napravljeni od nehrđajućeg čelika promjera 8 cm i visine od 5 cm. Sustav se sastoji od dva tenziometra (većeg i manjeg) vertikalno smještenih na dvije različite dubine u uzorku čiji je cilindar stezaljkama pričvršćen za jedinicu senzora. S obzirom da mjerenje prestaje u trenutku kada zrak uđe u tenziometar, prije upotrebe tenziometri moraju proći postupak otplinjavanja radi osiguravanja ispravnog rada. To se postiže vakumskom pumpom i jedinicom za otplinjavanje tenziometara (Slika 3.2.2.1.2.).



Slika 3.2.2.1.2. Jedinica za otplinjavanje tenziometara s vakumskom pumpom i sušionik.

Nakon otplinjavanja tenziometri se pažljivim rukovanjem postavljaju na senzorsku jedinicu. Na tenziometre se postavljaju gumene kapice gdje se dodaje ultračista voda kako bi se osigurala potpuna odsutnost zraka u tenziometrima (Slika 3.2.2.1.3. a). Neposredno prije umetanja tenziometara u cilindre s tlom, potrebno je formirati rupe u uzorcima kako bi se tenziometri nesmetano umetnuli u neporušeni uzorak te kako nebi došlo do oštećenja tenziometara (Slika 3.2.2.1.3. b).



Slika 3.2.2.1.3. a) Tenziometri sa senzorskom jedinicom, b) Formiranje rupa u tlu
Izvor: METER grupa, 2015.

Cilindar s neporušenim uzorkom tla volumena 250 cm^3 sa senzorskom jedinicom postavlja se na vagu čime započinje mjerenje težine tla i vodnog potencijala tla (Slika 3.2.2.1.4.).



Slika 3.2.2.1.4. Neporušeni uzorci tla u cilindrima tijekom mjerenja na HYPROP sustavu.

Mjerenja vodnog potencijala i mase odvija se unutar vremenskog intervala od 1 do 30 minuta. Na temelju potencijala tijekom mjerenja izračunava se hidraulički gradijent te pomoću dobivenih podataka o razlici težine tla i volumena vode u tlo moguće je izračunati tok vode. Nadalje, određivanje količine vode (θ_s) pomoću HYPROP sustava određuje se u uvjetima potpune saturacije zajedno s rezidualnom količinom vode (θ_r). Kalibracijom modela dobiveni su empirijski parametri α i n .

Za evaluaciju mjerenja koristi se HYPROP-FIT softver. Pojedine točke retencijske krivulje automatski se, pomoću HYPROP-FIT softvera, izračunavaju na temelju gubitka vode po volumenu uzorka u određenom vremenu i povezuju sa srednjim vrijednostima površinske napetosti u uzorku (Schindler i Müller, 2017.). HYPROP uređajem određuje se količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije, odnosno θ_s , zajedno s rezidualnom količinom vode θ_r . Optimizacija hidrauličke vodljivosti temelji se na θ_s , θ_r i n vrijednostima (Mualem, 1976). Retencijskim krivuljama tla određuje se odnos između relativne količine vode u tlu (masa vode u tlu / masa osušenog tla) i vodnog potencijala h .

3.2.2.2. Određivanje vodnog potencijala u točki kondenzacije primjenom WP4C sustava

Ukupni vodni potencijal uzorka je zbroj gravitacijskog, matričnog i osmotskog potencijala. WP4C (METER Group, 2017.; Slika 3.2.2.2.1.) je uređaj kojim se određuje zbroj osmotskog i matričnog potencijala uzorka tehnikom hlađenog zrcala u točki kondenzacije. Jedan od navedenih potencijala može biti dominantan za određivanje ukupnog potencijala u pojedinom uzorku, a najčešće je to matrični potencijal.

U trenutku kada je zrak ušao u tenziometar, tada mjerenje na HYPROP uređaju završava te se uzorci skidaju s vaga nakon čega se uzorci pripremaju za WP4C mjerenje. Za svaki uzorak u tri repeticije uzima se određena količina tla s tri dubine (gornja, srednja i donja) po dva ponavljanja. Tlo se usitnjava te se stavlja u male metalne posudice s odgovarajućim plastičnim poklopcem (Slika 3.2.2.2.2.), a za mjerenje je potrebno skinuti plastični čep s metalnih posudica (Slika 3.2.2.2.3.) te se posudice s tlom bez poklopca stavljaju se u komoru čime započinje mjerenje (Slika 3.2.2.2.1.). Mjerenje je gotovo u trenutku kada se čuje zvučni signal te vizualno LED indikatorskom lampicom.



Slika 3.2.2.2.1. Umetanje metalne posudice u WP4C uređaj.

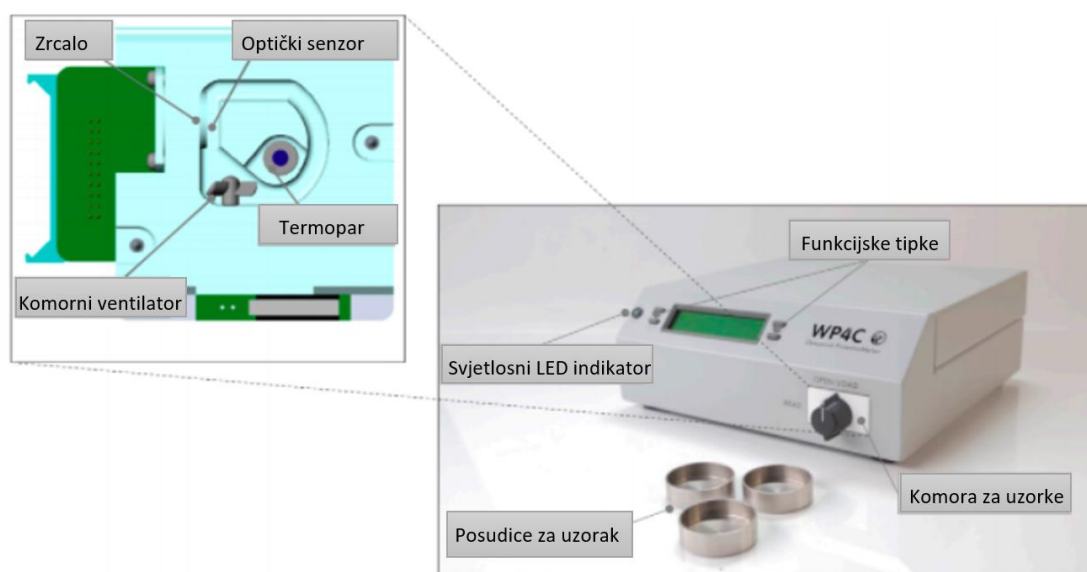


Slika 3.2.2.2.2. Uzorci u metalnim posudicama s plastičnim poklopcem



Slika 3.2.2.2.3. Uzorci tla u metalnim posudicama pripremljeni za mjerenje.

Uređaj uravnotežuje uzorak s prostorom iznad uzorka u zatvorenoj komori (Slika 3.2.2.2.4.). U instrumentu se nalazi zrcalo koje očitava trenutak pojave kondenzacije. Kada su uzorak i prostor iznad uzorka uravnoteženi, vodni potencijal zraka u komori jednak je vodnom potencijalu uzorka. Temperatura zrcala je precizno kontrolirana termoelektričnim (Peltier) hladnjakom. Fotoelektričnom ćelijom se određuje točka u kojoj se kondenzacija prvi put pojavljuje na zrcalu. WP4C usmjerava snop svjetlosti na zrcalo koje se reflektira u fotodetektor koji zabilježi promjenu refleksije kada započinje kondenzacija na zrcalu. Termopar, koji je pričvršćen na zrcalo, bilježi temperaturu pri kojoj dolazi do kondenzacije. Velika temperaturna razlika između uzorka i posudice uzorka značajno će produljiti vrijeme mjerenja. Točno i potpuno očitavanje nastat će u trenutku kad je temperatura uzorka i posudice uzorka < 1 . Na kraju mjerenja instrument prikazuje vrijeme (u minutama) koje je bilo potrebno za očitavanje, temperaturu uzorka i vodni potencijal u megapaskalima (MPa) i pF vrijednostima (logaritam negativnog hidrostatskog tlaka).



Slika 3.2.2.2.4. Dijelovi WP4C uređaja

Izvor: METER grupa

http://library.metergroup.com/Manuals/20588_WP4C_Manual_Web.pdf

Odnos između vodnog potencijala uzorka i tlaka zasićene pare zraka u komori određuje se pomoću jednadžbe:

$$\Psi = \frac{RT}{M_w} \ln \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_s)} \quad (4)$$

gdje su: $e_s(T_d)$ tlak zasićene pare pri temperaturi rosišta, $e_s(T_s)$ tlak zasićene pare temperature uzorka, R plinska konstanta, $8,31 \text{ J}/(\text{mol} \times \text{K})$, T temperatura uzorka izražena u Kelvinima, M molekulska masa vode, $18,01528 \text{ g/mol}$.

3.3. Modeli za evaluaciju retencijskih krivulja tla

U ovom istraživanju korišteno je 4 različitih modela za evaluaciju retencijskih krivulja tla od kojih je svaki od modela različit u nekim specifičnostima poput parametara koje izračunava. Modeli koji su se koristili u istraživanju su: Brooks Corey (BC model; Brooks, 1964.), Fredlund Xing (FX model; Fredlund, 1994.), Kosugi (K model, Kosugi, 1996.) i van Genuchten (VG model, Van Genuchten, 1980.).

BC model je jedan od prvih modela koji je razvijen za dobivanje parametara retencijskih krivulja tla te se sastoji od konstantne ravne linije i funkcije snage koja se spaja oko pritiska mjehurića. BC definiran je sljedećom matematičkom formulom:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} \quad h > \alpha^{-1} \quad (5)$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \leq \alpha^{-1} \quad (6)$$

pri čemu je $\theta(h)$ volumetrijski sadržaj vode pri tlaku tla h , α (1/cm) je inverzna vrijednost ulaznog zraka (tlak mjehurića), λ (–) predstavlja indeks raspodjele veličine pora (utječe na nagib krivulje), θ_s predstavlja sadržaj vode pri saturiranom tlu, θ_r predstavlja rezidualni sadržaj vode u tlu.

FX model formira krivulju pri čemu je pretpostavka da njen oblik ovisi o raspodjeli veličine pora u tlu. FX model definiran je sljedećom matematičkom formulom:

$$\theta(h) = \theta_s X(h) \Gamma(h) \quad (7)$$

$$\Gamma(h) = \{ \ln[e + (\alpha h)^n] \}^{-m} \quad (8)$$

$$X(h) = 1 - \frac{\ln(1+h/h_r)}{\ln(1+h_0/h_r)} \quad (9)$$

pri čemu su α , n i m parametri oblika retencijske krivulje, h_r je napetost koja odgovara θ_r , h_0 je napetost tla pri nultom sadržaju vode, e predstavlja Eulerov broj.

K model je modificirana verzija Kosugi modela (Kosugi, 1994.) koja je izvedena primjenom log normalne distribucije temeljene na tri parametra koji opisuju distribuciju pora u tlu. K model definiran je sljedećom matematičkom formulom:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{1}{2}(\theta_s - \theta_r) \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (10)$$

pri čemu je $erfc$ komplementarna funkcija pogreške, a σ je standardna devijacija logaritamski transformirane distribucije pora u tlu, hm je usis koji odgovara srednjem promjeru pora.

VG model je model koji se najčešće koristi za evaluaciju retencijskih krivulja tla. VG model definiran je sljedećom matematičkom formulom:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1-1/n} \quad (11)$$

pri čemu su α i h parametri oblika retencijske krivulje te ostali parametri koji su prethodno opisani.

3.4. Usporedba mjernih podataka i rezultata primijenjenih modela

Mjera koja daje srednje odstupanje između modela i mjerenih podataka, osnovna je srednja vrijednost kvadratne pogreške *RMSE* (eng. *root mean square error*).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r [y_i - \hat{y}_i]^2} \quad (12)$$

Pri čemu su y_i izmjerene vrijednosti, $\hat{y}_i$ predstavljaju predikaciju modela, a u ovom slučaju se odnose na sadržaj vode, θ ili hidraulička vodljivost, $\log_{10}$ (K).

Kod usporedbe modela mora se uzeti u obzir da svaki od modela ima različit broj (količinu) parametara koji su prilagođeni istim podacima, HYPROP-FIT također izračunava Akaikeov informacijski kriterij (*AIC*), $AIC = 2(L+k)$ (Akaike, 1974.), gdje je L funkcija vrijednosti, a k je broj korištenih parametara. U najmanju ruku procjene kvadrata i s $N(0, \sigma_2)$ informacijski kriterij *AIC* može se izraziti u obliku kako su ga izrazili Ye i sur. (2008.).

$$AIC = n \ln(\Phi_{min}/n) + 2k \quad (13)$$

Pri čemu je n broj izmjerenih podataka a k broj prilagodljivih parametara. Ako je mjerni broj n premali u odnosu na k , tada je potrebno proširiti izvorni broj *AIC* pomoću korektivnog izraza koji uzima u obzir male vrijednosti za n/k (Hurvich i Tsai, 1989.).

4. Rezultati i rasprava

4.1. Statistička obrada fizikano-kemijskih značajki tla na padini

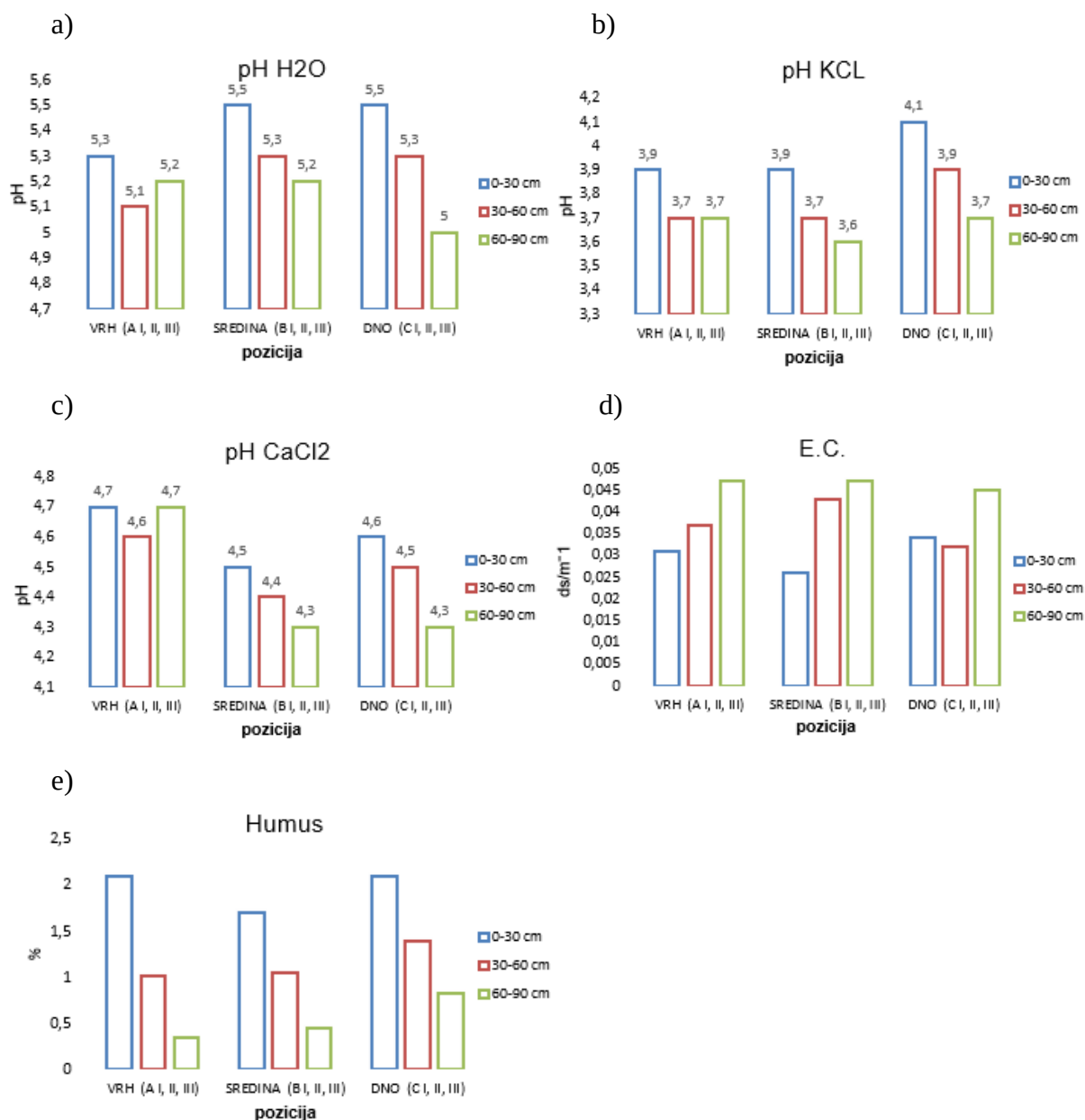
Rezultati fizikalno-kemijskih analiza tla prikazani su u Tablici 4.1.1. i Tablici 4.1.2. te grafički prikaz na slici 4.1.1. Za određivanje fizikalno-kemijskih parametara uzeti su uzorci tla na dnu, sredini i vrhu padine s tri dubine: 0–30, 30–60 i 60–90 cm. Kemijskom analizom određen je pH vode, KCl-a i CaCl_2 , električna vodljivost (EC), te udio humusa u tlu.

Rezultati kemijskih analiza tla na pokusnoj lokaciji Jazbina, ukazuju da na prve dvije dubine uzorkovanja tla (0–30 i 30–60 cm) nije bilo statistički značajne razlike između mjerenih parametara s obzirom na poziciju na padini (vrh, sredina, dno padine).

Na dubini tla od 60–90 cm za $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ i udio humusa u tlu (%) utvrđena je statistički značajna razlika s obzirom na poziciju. Rezultati ukazuju da je $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ tla na dubini od 60 do 90 cm mjereno od površine tla bio statistički značajno viši na vrhu padine ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4,7) u odnosu na sredinu i dno padine ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4,3), između kojih razlika u izmjerenim vrijednostima nije bila statistički značajna (Tablica 4.1.1.).

Udio humusa (%) u tlu na dubini 60–90 cm tla bio je najviši na dnu padine gdje je iznosio 0,82 % humusa, dok između vrha (0,35 % humusa) i sredine (0,44% humusa) padine nije utvrđena statistički značajna razlika (Tablica 4.1.1.).

Za parametre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} i električne vodljivosti – EC na dubini 60–90 cm dubine nije utvrđena statistički značajna razlika između mjerenih parametara s obzirom na poziciju na padini – vrh, sredina ili dno padine (Tablica 4.1.1.).



Slika 4.1.1. Grafički prikaz analize kemijskog sastava tla na pozicijama A – vrh padine, B – sredina padine, C – dno padine, za dubine 0–30, 30–60 i 60–90 cm za: a) $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, b) pH_{KCl} , c) $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, d) EC, e) humus.

Tablica 4.1.1. Kemijski parametri izmjereni u tlu na Vinogradarsko-vinarskom pokušalištu Jazbina uzorkovani na vrhu (A) sredini (B) i dnu (C) padine u tri ponavljanja (I, II, III)

KEMIJSKI SASTAV TLA					
POLOŽAJ NA PADINI	pH			E.C.	Humus
	H ₂ O	KCl	CaCl ₂	dS m ⁻¹	%
0 – 30 cm					
VRH (A I, II, III)	5,3 a	3,9 a	4,7 a	0,031 a	2,1 a
SREDINA (B I, II, III)	5,5 a	3,9 a	4,5 a	0,026 a	1,7 a
DNO (C I, II, III)	5,5 a	4,1 a	4,6 a	0,034 a	2,1 a
30 – 60 cm					
VRH (A I, II, III)	5,1 a	3,7 a	4,6 a	0,037 a	1,02 a
SREDINA (B I, II, III)	5,3 a	3,7 a	4,4 a	0,043 a	1,05 a
DNO (C I, II, III)	5,3 a	3,9 a	4,5 a	0,032 a	1,39 a
60 – 90 cm					
VRH (A I, II, III)	5,2 a	3,7 a	4,7 a	0,047 a	0,35 b
SREDINA (B I, II, III)	5,2 a	3,6 a	4,3 b	0,047 a	0,44 b
DNO (C I, II, III)	5,0 a	3,7 a	4,3 b	0,045 a	0,82 a
<i>Srednje vrijednosti označene istim slovom nisu značajno različite pri P<0,05</i>					

Analizom granulometrijskog sastava tla utvrđeno je da za udio frakcije sitnog praha ne postoji statistički značajna razlika između vrha (39,3 %) i sredine (39,7 %) padine. Analiza je također pokazala da udio (%) frakcije sitnog praha (veličine čestica 0,02–0,002 mm) na dubini tla 0–30 cm mjereno od površine tla bio statistički značajno veći na dnu (42,7 %) u odnosu na vrh (39,3 %) i sredinu (39,7 %) padine.

Na dubini tla 0–30 cm za udjele ostalih granulometrijskih frakcija – krupni i sitni pijesak, krupni prah i glina, nije utvrđena statistički značajna razlika (Tablica 4.1.2.).

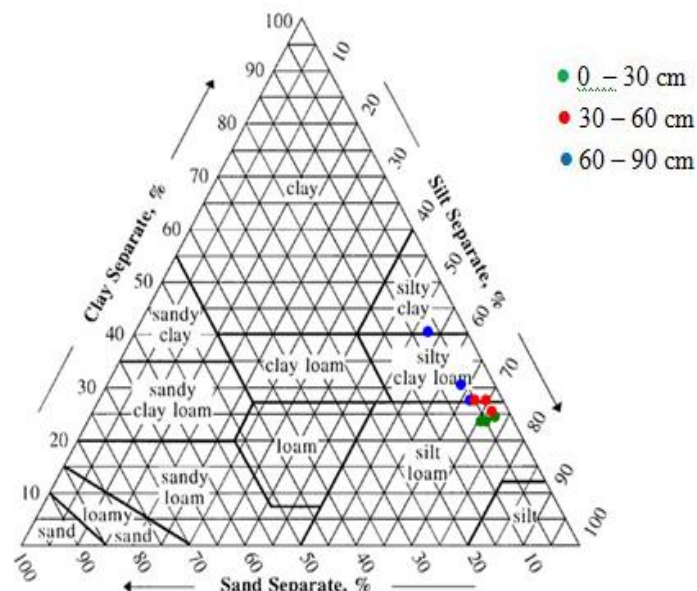
Na dubini tla 30–60 cm mjereno od površine tla nije utvrđena statistički značajna razlika u granulometrijskom sastavu tla (%) s obzirom na poziciju na padini – vrh, sredina ili dno padine (Tablica 4.1.2.).

Na dubini tla 60–90 cm mjereno od površine tla utvrđena je statistički značajna razlika u udjelu (%) frakcija krupnog (2–0,2 mm) i sitnog (0,2–0,063 mm) pijeska, pri čemu su u oba slučaja najviše vrijednosti utvrđene na sredini padine (11 % krupnog i 5,7 % sitnog pijeska) u odnosu na vrh (3,7 % krupnog i 3,7 % sitnog pijeska) i dno padine (2,7 % krupnog i 3,7 % sitnog pijeska). Vrijednosti udjela krupnog i sitnog pijeska na vrhu i dnu padine nisu statistički odstupale (Tablica 4.1.2.). Analizom je također utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika na dubini 60–90 cm za udjele granulometrijskih frakcija – krupni prah, sitni prah i glina (Tablica 4.1.2.). Na dubini tla 60–90 cm za udjele ostalih granulometrijskih frakcija – krupni prah, sitni prah i glina, nije utvrđena statistički značajna razlika (Tablica 4.1.2.).

Tablica 4.1.2. Granulometrijski sastav tla[%] na lokaciji Jazbina uzorkovani na vrhu (A) sredini (B) i dnu (C) padine u tri ponavljanja (I, II, III)

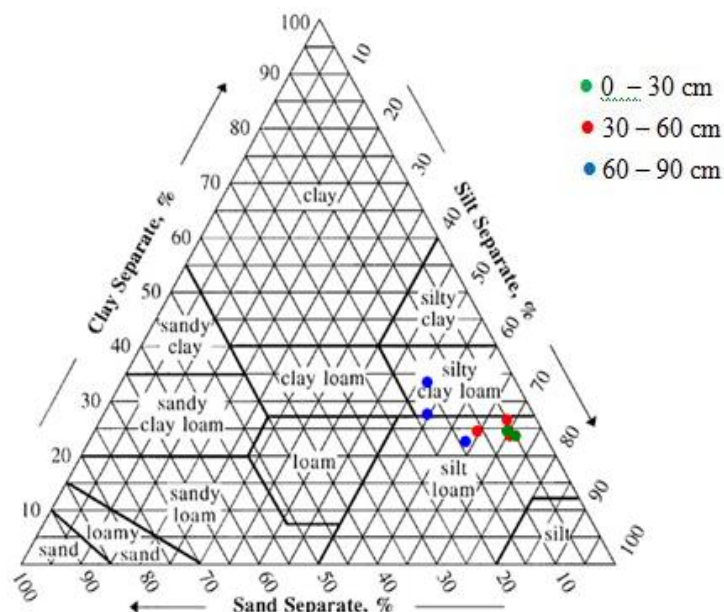
POLOŽAJ NA PADINI	GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA [%]				
	Krupni pijesak	Sitni pijesak	Krupni prah	Sitni prah	Glina
	2 – 0,2	0,2 – 0,063	0,063 – 0,02	0,02 – 0,002	< 0,002
mm					
0-30 cm					
VRH (A I, II, III)	1,7 a	4,0 a	31,7 a	39,3 b	23,3 a
SREDINA (B I, II, III)	2,7 a	4,0 a	30,3 a	39,7 b	23,3 a
DNO (C I, II, III)	3,0 a	3,7 a	32,3 a	42,7 a	18,3 a
30 – 60 cm					
VRH (A I, II, III)	1,3 a	3,3 a	30,7 a	38,3 a	26,3 a
SREDINA (B I, II, III)	3,7 a	4,7 a	30,3 a	37,0 a	24,3 a
DNO (C I, II, III)	3,0 a	4,0 a	32,0 a	40,0 a	21,0 a
60 – 90 cm					
VRH (A I, II, III)	3,7 b	3,7 b	25,3 a	35,0 a	32,3 a
SREDINA (B I, II, III)	11,0 a	5,7 a	23,7 a	32,3 a	27,3 a
DNO (C I, II, III)	2,7 b	3,7 b	30,7 a	37,0 a	26,0 a
Srednje vrijednosti označene istim slovom nisu značajno različite pri $P < 0,05$					

Na temelju dobivenih analiza fizikalnih značajkama tla moguće je odrediti teksturni sastav tla na pokusnoj parceli pokušališta Jazbina. Na najvišoj poziciji (A) na dubini 0–30 cm prevladava praškasta ilovača, na dubini 30–60 cm nalazimo nešto teže tlo (praškasto glinasta ilovača) dok je na dubini 60–90 cm prevladavala praškasto glinasta ilovača i praškasta glina (Slika 4.1.2.).



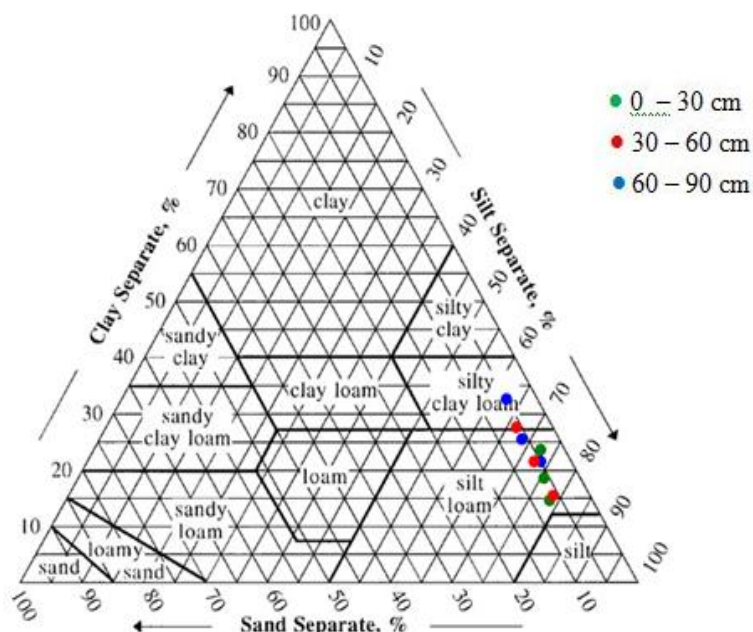
Slika 4.1.2. Slikovni prikaz teksturnog sastava tla na vrhu padine (pozicija A) za dubine: 0–30 cm, 30–60 cm i 60–90 cm.

Na središnjoj poziciji (B) padine uočeno je na dubinama 0–30 i 30–60 cm tlo praškasto-ilovaste strukture, dok na dubinama 60–90 cm prevladavala praškasto glinasta ilovača (Slika 4.1.3.).



Slika 4.1.3. Slikovni prikaz teksturnog sastava tla na sredini padine (pozicija B) za dubine: 0–30 cm, 30–60 cm i 60–90 cm.

Na najnižoj poziciji (C) vinograda prevladava praškasta ilovača za većinu uzorkovanih dubina te se samo na dvije mikrolokacije na dubini 30–60 cm i 60–90 cm nalazi praškasto glinasta ilovača (Slika 4.1.4.).



Slika 4.1.4. Slikovni prikaz teksturnog sastava tla na dnu padine (pozicija C) za dubine: 0–30 cm, 30–60 cm i 60–90 cm.

4.2. Rezultati izrađenih retencijskih krivulja tla za SFL 1 i SFL 2

Temeljem podataka o vodnom potencijalu, toku vode i hidrauličke vodljivosti izrađene su retencijske krivulje tla za dvije pozicije na padini: SFL 1 (vrh padine) i SFL 2 (dno padine) na položaju ugradnje lizimetara (Smart Field Lysimeter, METER). Na lokaciji SFL 1 uzimali su se cilindri s tlom na dubini od 15–20 cm (Tablica 4.2.1.). Na lokaciji SFL 2 uzimali su se cilindri s tlom na dubini od 15–20 cm (Tablica 4.2.1.). Krivulje prikazuju kontinuiranu promjenu sadržaja gdje θ_s predstavlja potpunu saturaciju tla dok θ_r predstavlja rezidualnu, odnosno minimalnu vrijednost sadržaja vode u tlu. Vodni potencijal može varirati u svakoj točki mjerenja ovisno strukturi i rasporedu pora, teksturnom sastavu te prisutnosti sekrecija, korijena i gujavica.

Tablica 4.2.1. Granulometrijski sastav tla uzoraka korištenih za izradu retencijskih krivulja

Pozicija na padini	Oznaka uzorka	Dubina cm	GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA %				
			Krupni pijesak 2-0,2 mm	Sitni pijesak 0,2-0,063 mm	Krupni prah 0,063-0,02 mm	Sitni prah 0,02-0,002 mm	Glina < 0,002 mm
Vrh	SFL 1	15–20	2	3	35	44	16
Dno	SFL 2	15- 20	4	4	34	42	16

Uzorci SFL 1 i SFL 2 provedeni su u HYPROP-FIT programu u četiri različita modela: van Genuchten, Kosugi, Fredlund Xing i Brooks Corey kao što je prikazano na slikama (Slike 4.2.1, 4.2.2. i 4.2.3.). Tablica 4.2.2. i 4.2.3 prikazuje parametre za sva četiri modela korištena za evaluaciju retencijskih krivulja tla. Modeli variraju na temelju različitog broja parametara kojeg pojedini model računa. Modeli Brooks Corey, Kosugi i van Genuchten računaju 6 parametara dok model Fredlund Xing računa 8 parametara. Parametri koji opisuju krivulje ovog istraživanja su: α , n , θ_r , θ_s , K_s , τ , h_r , pF_{dry} , m , σ , λ i hm od čega su samo θ_s i K_s zajednički svim modelima.

Količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije (θ_s) na istraživanom području varirala je od 0,433 (SFL 2 – B.C. model) do 0,447 cm³/cm³ (SFL 1 – Kosugi). Sva četiri modela pokazuju relativno manju količinu vode za uzorke s lokacije SFL 2 u odnosu na SFL 1 lokaciju (Tablica 4.2.2. i 4.2.3.) zbog nešto manjeg postotnog udjela sitnog i krupnog praha (prikazano u Tablici 4.2.1.) što ukazuje na slabije zadržavanje vode. HYPROP metodu za određivanje hidrauličkih parametara i vodnog potencijala tla za veliki niz teksturno različitih modela primijenili su Schindler i sur. (2017.) čime su ukazali na pouzdanost korištenja ovih metoda kod većine tala.

Hidraulička provodljivost tla (K_s) za ispitano područje prikazana je na Slikama 4.2.2. i 4.2.3. Hidraulička provodljivost opisuje sposobnost tla za transport vode i otopljenih tvari kroz porozni medij. Kao i kod vodnog potencijala hidraulička vodljivost može imati različite vrijednosti, a ponajviše ovisi o veličini i rasporedu pora u tlu odnosno o strukturi i teksturnom sastavu tla. U uvjetima potpune saturacije hidraulička provodljivost veća je kod pjeskovitih tala u odnosu na glinovita tla. Krivulja hidrauličke provodljivosti ilustrira ovisnost hidrauličke

provodljivosti o sadržaju vode u tlu. Vrijednost hidrauličke vodljivosti K_s za lokaciju SFL 1 kretala se od 0,2 cm³/dan (BC model) do najviše vrijednosti: 1,89 cm³/dan (FX model).

Hidraulička vodljivost K_s za lokaciju SFL 2 kretala se od najniže vrijednosti koja je iznosila 0,00470 (SFL 2 – BC model) do najviše vrijednosti koja je iznosila 28,7 cm/dan (SFL 2 FX model) što ukazuje na velike razlike između dobivenih vrijednosti korištenih modela. Takvo veliko odstupanje može dovesti do krive kvantifikacije toka vode u tlu.

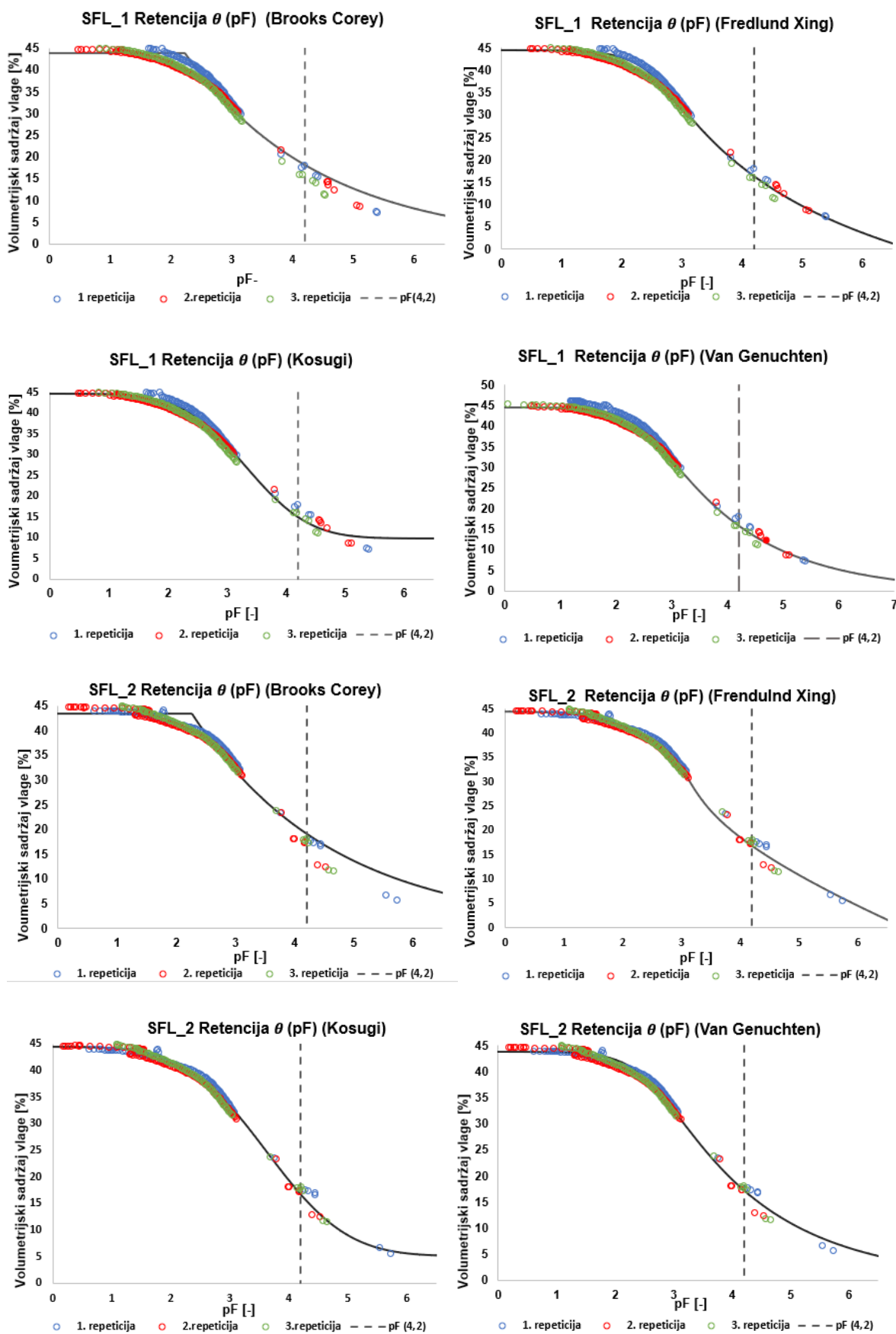
Usporedbom lokacija SFL 1 i SFL 2 na temelju dobivenih numeričkih vrijednosti moguće je uočiti kako je za oba slučaja najmanja vrijednost hidrauličke vodljivosti dobivena Brooks Corey modelom te najveća vrijednost dobivena je Fredlund Xing modelom.

Tablica 4.2.2. Parametri retencijskih krivulja za BC, FX, K i VG modele na lokaciji SFL 1

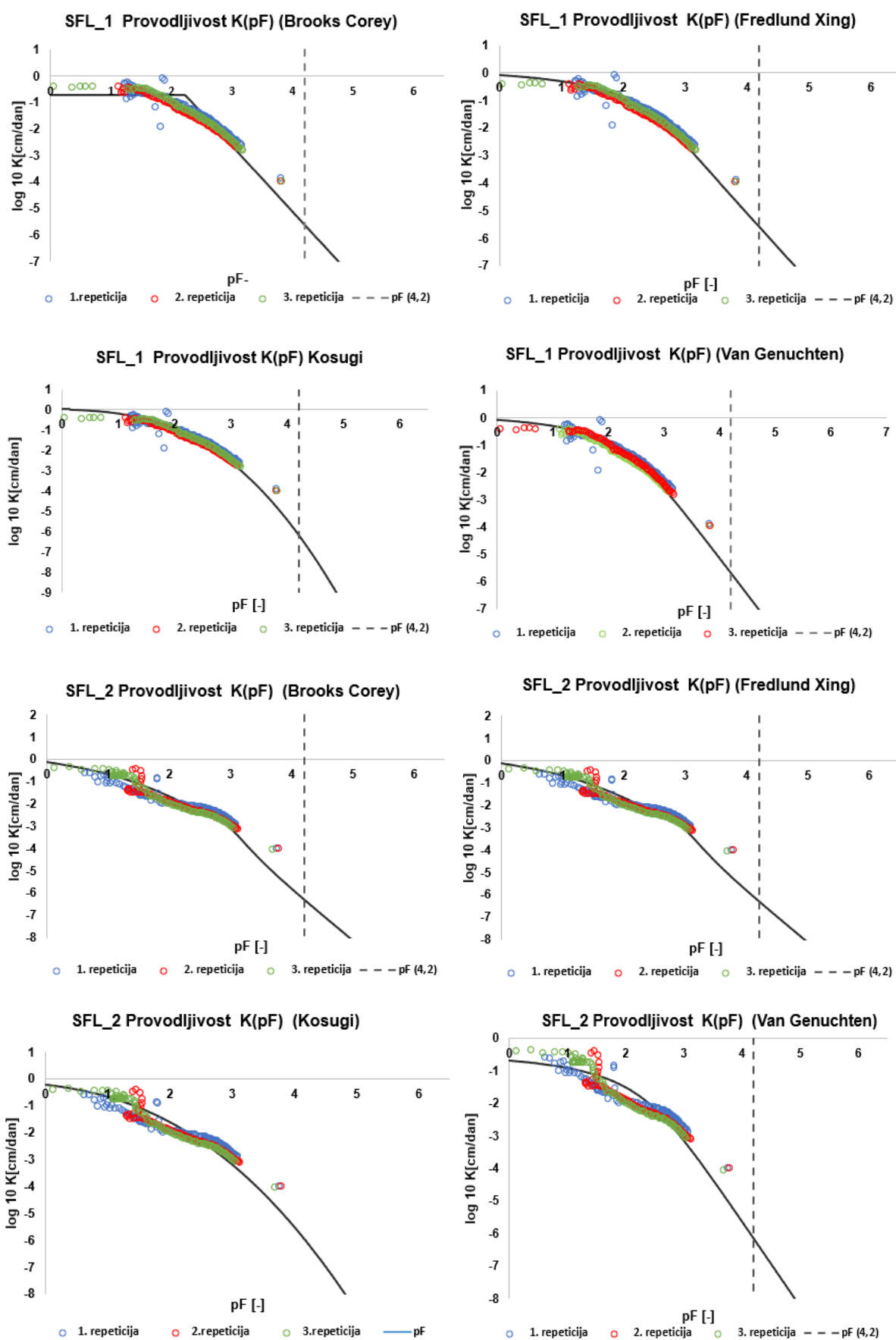
Parametri	Mjerne jedinice	Modeli			
		Brooks Corey	Fredlund Xing	Kosugi	Van Genuchten
α	1/cm	0,00597	0,00297	-	0,00295
n	—	-	1,268	-	1,267
θ_r	cm ³ /cm ³	0,000	-	0,097	0,000*
θ_s	cm ³ /cm ³	0,438	0,445	0,447	0,446
K_s	cm/dan	0,200	1,89	1,09	1,35
τ	—	0,500	0,500	0,500	0,500
h_r	cm	-	4221,752	-	-
pF_{dry}	—	-	6,80	-	-
m	—	-	0,482	-	-
σ	—	-	-	1,961	-
λ	—	0,194	-	-	-
Hm	—	-	-	2026	-

Tablica 4.2.3. Parametri retencijskih krivulja za BC, FX, K i VG modele na lokaciji SFL 2

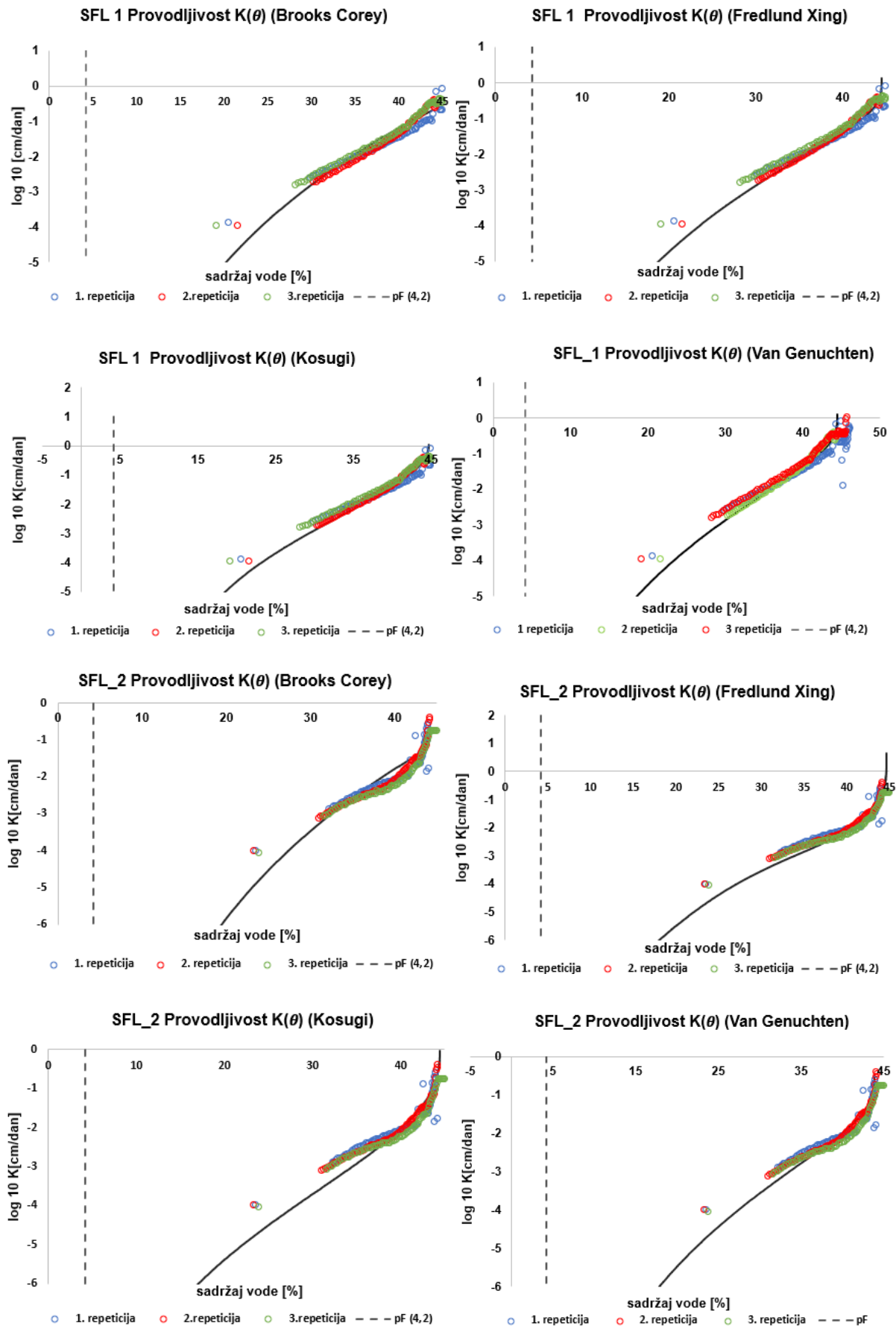
Parametri	Mjerne jedinice	Modeli			
		Brooks Corey	Fredlund Xing	Kosugi	Van Genuchten
α	1/cm	0,00548	0,00112	-	0,00271
n	—	-	3,823	-	1,247
θ_r	cm ³ /cm ³	0,000*	-	0,050	0,000*
θ_s	cm ³ /cm ³	0,433	0,446	0,444	0,439
K_s	cm/dan	0,0470	28,7	0,911	0,339
τ	—	0,500	0,500	0,500	0,500
h_r	cm	-	94,989	-	-
pF_{dry}	—	-	6,80	-	-
m	—	-	0,147	-	-
σ	—	-	-	2,477	-
λ	—	0,183	-	-	-
hm	—	-	-	4211	-



Slika 4.2.1. Retencijske krivulje tla dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za SFL 1 i SFL 2 u 4 različita modela.



Slika 4.2.2. Hidraulička provodljivost $K(pF)$ tla dobivena pomoću HYPROP-FIT programa za lokacije SFL 1 i SFL 2 u 4 različita modela.



Slika 4.2.3. Hidraulička provodljivost $K(\theta)$ tla dobivena pomoću HYPROP-FIT programa za lokacije SFL 1 i SFL 2 u 4 različita modela.

Mjera evaluacije kvalitete kalibriranog modela izražena je *RMSE* pogreškom (eng. *root mean square error*). *RMSE* izražava srednju devijaciju između modela i podataka. Pogreška modela vodne retencije (*RMSE_TH*) izračunata je odvojeno od pogreške modela hidrauličke provodljivosti (*RMSE_K*), što je i vidljivo u Tablici 4.2.4. i 4.2.5. U svrhu dodatne preciznosti korišten je *AICc* informacijski kriterij koji uzima u obzir broj neovisnih varijabli korištenih u modelu. Uzimajući u obzir broj parametara *AICc* broj pokazuje pouzdanost modela obzirom na broj parametara. Kod *RMSE* je pouzdanost modela bolja što je broj manji tj. bliži 0, odnosno manja je pogreška.

Prema dobivenim rezultatima najveća pogreška modela *RMSE* za lokaciju SFL 1 očituje se kod Brooks Corey modela gdje vrijednost pogreške za *RMSE_TH* iznosila 0,0164 i 0,2980 za *RMSE_K*. Najmanju vrijednost pogreške za lokaciju SFL 1 pokazao je model van Genuchten čija je vrijednost pogreške *RMSE_TH* iznosila 0,0103 i za *RMSE_K* 0,2169 što ukazuje na najveću pouzdanost od sva 4 korištena modela. Pouzdanost VG modela za ovaj slučaj također potvrđuje *AICc* broj koji je od svih modela imao najveću vrijednost (-5568) za razliku od BC modela gdje je vrijednost *AICc* bila najmanja (-5056) (Tablica 4.2.4.). Filipović i sur. (2015.) koristili su VG model za određivanje hidrauličkih značajki na pokusnom istraživanju učinka biogoriva i komposta proizvedenog iz kanalizacijskog mulja gdje je model pokazao visok stupanj pouzdanosti.

Cornelis i sur. (2005.) procjenjivali su izvedbe retencijskih krivulja koje su također uključivale BC, FX, K i VG modele čime su dokazali da je VG model sa srednjom vrijednošću od 0,008 cm³/cm³ pokazao najveće podudaranje s podacima o izmjerenom sadržaju vode koji su odgovarali za preko 67 % ispitanih uzoraka. Također su dokazali niže performanse za BC, VG i K modele sa srednjim vrijednostima od 0,014 cm³/cm³, 0,010 cm³/cm³ i 0,009 cm³/cm³.

Tablica 4.2.4. Mjere evaluacije kvalitete kalibriranih modela za SFL 1

Modeli	<i>RMSE_TH</i>	<i>RMSE_K</i>	<i>AICc</i>
Brooks Corey	0,0164	0,2980	-5056
Fredlund Xing	0,0104	0,2180	-5552
Kosugi	0,0105	0,2239	-5540
Van Genuchten	0,0103	0,2169	-5568

Tablica 4.2.5. Mjere evaluacije kvalitete kalibriranih modela za SFL 2

Modeli	<i>RMSE_TH</i>	<i>RMSE_K</i>	<i>AICc</i>
Brooks Corey	0,0159	0,4671	-4901
Fredlund Xing	0,0077	0,2904	-5603
Kosugi	0,0079	0,3062	-5561
Van Genuchten	0,0092	0,3166	-5453

Za lokaciju SFL 2 vrijednosti *RMSE* pogreške značajno su varirale od modela do modela, a najmanju vrijednost pogreške pokazao je FX model pri čemu je *RMSE_TH* iznosio 0,0077 i *RMSE_K* je iznosio 0,3062. Najveću pogrešku *RMSE* za lokaciju SFL 2 pokazao je BC model čija je vrijednost *RMSE_TH* iznosila 0,0159 te za *RMSE_K* vrijednost 0,4671 čime je i na ovoj

lokaciji BC model pokazao najmanju pouzdanost. Najveći *AICc* broj kod FX modela (-5603) potvrđuje pouzdanost modela za ovu lokaciju (Tablica 4.2.5.)

Haghverdi i sur. (2020.) ispitivali su pouzdanost modela za različite tipove tla gdje je FX model također rangiran kao najbolji gdje je *RMSE* iznosi 0,007. K i BC modeli su u njihovom istraživanju pokazali najniže performanse za većinu teksturnih tala. BC model pokazao je veću pogrešku za većinu slučajeva u blizini zasićenja. Loše podudaranje BC modela također su dokazali Cornelis i sur. (2005.). Razlike rezultata između studija često mogu biti povezane s ograničenim brojem izmjerenih podataka pri točki saturacije.

5. Zaključak

U ovom istraživačkom radu provedena je procjena evaluacije retencijskih krivulja tla primjenom Brooks Corey, Fredlund Xing, Kosugi i van Genuchten modela. Primijenjena je laboratorijska pojednostavljena evaporacijska metoda HYPROP te uređaj WP4C u cilju određivanja vodnog potencijala i količine vode vinogradarskog tla (obronačni pseudoglej) ispitnog područja pokušališta Jazbina. Primjenom HYPROP-FIT softvera dobiveni su broježani podaci o hidrauličkoj vodljivosti, vodnom potencijalu te sadržaju vode, te su izrađene krivulje hidrauličke vodljivosti i retencijske krivulje tla.

Za evaluaciju retencijskih krivulja tla korištena su četiri različita modela: Brooks Corejev (BC), Fredlund Xingov (FX), Kosugiev (K) i van Genuchtenov model (VG). Vrijednost hidrauličke vodljivosti K_s za lokaciju SFL 1 kretala se od 0,2 cm/dan (BC model) do 1,89 cm/dan (FX model). Hidraulička vodljivost za lokaciju SFL 2 kretala se od 0,00470 cm/dan (BC model) do 28,7 cm/dan (FX model) što ukazuje na velike razlike između dobivenih vrijednosti korištenih modela. Najmanja vrijednost hidrauličke vodljivosti za obje lokacije dobivena je BC modelom te najveća vrijednost dobivena je FX modelom. Najveću pogrešku modela $RMSE$ za lokaciju SFL1 pokazao je BC model čija je vrijednost pogreške za $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0164 i 0,2980 za $RMSE_K$. Najmanju vrijednost pogreške za lokaciju SFL 1 pokazao je model VG čija je vrijednost pogreške $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0103 i za $RMSE_K$ 0,2169 što ukazuje na najveću pouzdanost od sva četiri korištena modela. Za lokaciju SFL 2 vrijednosti $RMSE$ pogreške značajno su varirale između modela, a najmanju pogrešku pokazao je FX model pri čemu je $RMSE_{TH}$ iznosio 0,0077 i $RMSE_K$ je iznosio 0,3062. Najveću pogrešku $RMSE$ za lokaciju SFL 2 pokazao je BC model čija je vrijednost $RMSE_{TH}$ iznosila 0,0159 te za $RMSE_K$ vrijednost 0,4671 čime je i na ovoj lokaciji BC model pokazao najmanju pouzdanost.

Porušeni uzorci koji su se analizirali bili su prikupljeni s površinskog sloja (0 – 30 cm) u tri repeticije na dvije različite lokacije (vrh i podnožje padine). Razlike u teksturnom sastavu tla nisu značajno varirale te je uglavnom prevladavala praškasto glinasta ilovača na vrhu i dnu padine. Takav uzak spektar korištenih podataka ne može se smatrati reprezentativnim uzorkom. Stoga bi u idućim istraživanjima trebalo uključiti veći broj različitih teksturnih klasa. Na takav način bilo bi eventualno moguće vidjeti koji modeli bi odgovarali teksturno lakšim tlima a koji bi bili primjenjiviji za teksturno teža tla.

Istraživanje je usredotočeno na pouzdanu parametrizaciju pune krivulje zadržavanja vode u tlu od zasićenja do apsolutno suhog tla. Važnost primjene različitih modela u određivanju hidrauličkih značajki očituju se u ograničenom dometu podataka o zadržavanju vode između pojedinih modela. Iako u ovom radu primjena različitih modela nije bitnije utjecala na izgled retencijskih krivulja, odabir najprikladnijeg modela svakako može biti važan faktor pri preciznom određivanju toka vode u tlu i procjeni hidrauličkih značajki tla. Samim time, velike razlike u hidrauličkoj vodljivosti mogu dovesti do krive kvantifikacije toka vode u tlu.

6. Popis literature

1. Akaike, H. (1974.). A new look at statistical model identification, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-19, 716–723.
2. Amezket, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14. Str. 83-151.
3. Baver, L.D., Gardner, W.H., Gardner, W.R., 1972. *Soil Physics*, fourth ed. Wiley, New York.
4. Beasley, R.S. (1976). Contribution of Subsurface Flow from the Upper Slopes of Forested Watersheds to Channel Flow. *Soil Science Society of America Journal* 40(6):955-957. doi:10.2136/sssaj1976.03615995004000060039x. – pristup 05.05.2021.
5. Brooks, R.; Corey, T. (1964.). Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design. *Trans. ASAE*. 7, 26–28.
6. Casenave, A., Valentin, C. (1992.) A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.* 130, 231–249.
7. Chen, S., Mao, X., Barry, D. A., & Yang, J. (2019.). Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil. *Agricultural Water Management*, 221, 160–174. doi:10.1016/j.agwat.2019.04.031 – pristup 09.05.2021.
8. Clothier, B.E., Green, S.R., Deurer, M. (2008.). Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 2–13.
9. Cominelli, E., Conti, L., Tonelli, C., Galbiati, M. (2013.) Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. *New Biotechnol.* 30 (4), 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2012.11.001> – pristup 09.05.2021.
10. Coquet, Y., & Bruand, A. (2018.). Preferential Flows. *Soils as a Key Component of the Critical Zone* 3, 121–143. doi:10.1002/9781119438045.ch4 – pristup 04.05.2021.
11. Cornelis, W.; Khlosi, M.; Hartmann, R.; Van Meirvenne, M.; De Vos, B. (2005.). Comparison of Unimodal Analytical Expressions for the Soil-Water Retention Curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1902–1911.
12. Dane, J., Hopmans, J.W. (2002.). Laboratory. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 675–719.
13. Dettmann, U., Bechtold, M., Frahm, E., Tiemeyer, B. (2014.). On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten-Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *J. Hydrol.* 515, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.047> – pristup 26.06.2021.
14. Dettmann, U., Bechtold, M., Viohl, T., Piayda, A., Sokolowsky, L., & Tiemeyer, B. (2019.). Evaporation experiments for the determination of hydraulic properties of peat and other organic soils: An evaluation of methods based on a large dataset. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.088 – pristup 01.07.2021.
15. Dexter, A.R. (1988.). Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11, 199–238.
16. Dunne, T., Zhang, W., Aubry, B.F. (1991.). Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.* 27, 2271–2285.

17. Durner W. i Flühler H. (2005). Soil Hydraulic Properties. Braunschweig Technical University, Germany.
18. Durner, W., Lipsius, K. (2005.). Chapter 75: determining soil hydraulic properties. In: Anderson, M.G., McDonnell, J.J. (Eds.), Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1121–1144.
19. FAO (2006). Guidelines for soil description, str. 25–29.
20. Filipović, V. (2015.). Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
21. Filipović, V., Černe, M., Šimunek, J., Filipović, L., Romić, M., Ondrašek, G., Ban, D. (2020.). Modeling Water Flow and Phosphorus Sorption in a Soil Amended with Sewage Sludge and Olive Pomace as Compost or Biochar. *Agronomy*, 10(8), 1163. doi:10.3390/agronomy10081163 – pristup 02.07.2021.
22. Fluhler, H., Durner, W., Flury, M., (1996.) Lateral solute mixing processes—a key for understanding field-scale transport of water and solutes. *Geoderma* 70, 165–183.
23. Frank, S., Tiemeyer, B., Bechtold, M., Lücke, A., Bol, R., (2017.) Effect of past peat cultivation practices on present dynamics of dissolved organic carbon. *Sci. Total Environ.* 574, 1243–1253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.121>. – pristup 07.05.2021.
24. Fredlund, D. (1994.). Xing, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.*, 31, 521–532.
25. Gardner, W. R., ed. (1996.). “A New Era for Irrigation.” National Academy Press, Washington, DC.
26. Gerke, H.H. (2006.). Preferential flow descriptions for structured soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 382–400.
27. Gerke, H.H., Germann, P., Nieber, J. (2010.). Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale. *Vadose Zone J.* 9 (2), 207–212.
28. Gjetvaj, G. (2006.). Skripte iz hidraulike. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
29. Golubev, V., Whittington, P., 2018. Effects of volume change on the unsaturated hydraulic conductivity of Sphagnum moss. *J. Hydrol.* 559, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.083>. – pristup 20.05.2021.
30. Groenendijk, P., Renaud, L. V., Roelsma, J. (2005.). Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters; Process descriptions of the Animo 4.0 model. Wageningen, Alterra—Report 983.
31. Guo, L., Lin, H., 2016. Critical zone research and observatories: current status and future perspectives. *Vadose Zone J.* 15, 1–14. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.06.0050> – pristup 22.04.2021.
32. Guo L., Lin H. (2018.). Addressing Two Bottlenecks to Advance the Understanding of Preferential Flow in Soils. *Advances in Agronomy* 147 : 61-117.
33. Haghverdi, A., Najarchi, M., Öztürk, H. S., & Durner, W. (2020.). Studying Unimodal, Bimodal, PDI and Bimodal-PDI Variants of Multiple Soil Water Retention Models: I. Direct Model Fit Using the Extended Evaporation and Dewpoint Methods. *Water*, 12(3), 900.

34. Haghverdi A., Öztürk H.S., Durner W. (2018.). Measurement and Estimation of the Soil Water Retention Curve Using Evaporation Method and Pseudo Continuous Pedotransfer Function. *Journal of Hydrology* 563: 251–259.
35. Hajnos, M., Lipiec, J., Świeboda, R., Sokołowska, Z., Witkowska-Walczak, B. (2006.). Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods. *Geoderma* 135. str. 307–314.
36. Hanson, J.D., Ahuja, L.R., Shaffer, M.D., Rojas, K.W., DeCoursey, D.G., Farahani, H., Johnson, K., (1998.). RZWQM: simulating the effects of management on water quality and crop production. *Agric. Syst.* 57 (2), 161–195. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00002-X). – pristup 02.06.2021.
37. Hardie, M.A., R.B. Doyle, W.E. Cotching, and S. Lisson. (2012.) Subsurface lateral flow in texture-contrast (duplex) soils and catchments with shallow bedrock. *Applied and Environmental Soil Science*. doi:10.1155/2012/861358. – pristup 13.05.2021.
38. Hencher, S.R., (2010.) Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides. *Hydrol. Process.* 24, 1610–1630.
39. Hillel D. (1998.). *Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, SAD.
40. Hillel D. (2004.). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Science, SAD.
41. Holden, J., (2005.). Peatland hydrology and carbon release: why small-scale process matters. *Philos. Trans. R. Soc. A* 363, 2891–2913. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1671>.
42. Hopmans, J.W., Simunek, J., Romano, N., Durner, W. (2002.). Inverse Methods. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis; Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc, Madison, pp. 963–1008.
43. Houba V. J. G., Uittenbogaard J., Pellen P. (1996.). Wageningen evaluating programmes for analytical laboratories (WEPAL) organization and purpose. *Commun Soil Sci Plan* 27(3-4): 421-431.
44. HRN ISO 10390:2005 (2005.). *Kakvoća tla - Određivanje pH-vrijednosti*. Internacionalni standard, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
45. HRN ISO 11265:2004 (2004.). *Kakvoća tla - Određivanje specifične električne vodljivosti*. Internacionalni standard, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
46. HRN ISO 11277:2004 (2004.). *Kvaliteta tla - Određivanje raspodjele veličine čestica (mehaničkog sastava) u mineralnom dijelu tla - Metoda prosijavanja i sedimentacije*. Internacionalni standard, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
47. HRN ISO 11464:2004 (2004.). *Kakvoća tla - Priprema uzorka za fizikalno-kemijske analize*. Internacionalni standard, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
48. HRN ISO 14235:1998 (1998.). *Kakvoća tla - Određivanje organskog ugljika sulfokromnom oksidacijom*. Internacionalni standard, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
49. Hurvich, C., and C. Tsai. (1989.). Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika* 76 (2), 297–307, doi:10.1093/biomet/76.2.297.
50. Hutson, J.L., Wagenet, R. J. (1992.). LEACHM: Leaching estimation and chemistry model: A process-based model of water and solute movement, transformations, plant and chemical reactions and unsaturated zone. Version 3.0.

51. Jarvis N. J. (2007.). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science* 58: 523–546.
52. Jarvis, N., Bergstrom, L., Dik, P.E. (1991.). Modeling water and solute movement in macroporous soil. II. Chloride leaching under non-steady flow. *Journal of Soil Science* 42: 71-81.
53. Jarvis, N.J. (2007.) A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 523–546.
54. Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J. (1998.). Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol. Biochem.* 30, 905–916.
55. Jenny, H. (1941.) *Factors of Soil Formation: a System of Quantitative Pedology*. Republished in 1994. Dover Publications, New York, USA.
56. Jović, V. (2006.). *Osnove hidromehanike*. Element, Zagreb.
57. Kahlown, M.A., Azam, M. (2003.). Effect of saline drainage effluent on soil health and crop yield. *Agric. Water Manage.* 62 (2), 127–138. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00096-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00096-9).
58. Kay, B.V. (1990.). Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12, 1–41.
59. Kettler, T. A., W. J Doran, T. L Gilbert. (2001.). Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses, *Soil Science Society of America Journal* 65. str. 849–852.
60. Kirkham, D. (1961a.). *Lectures on Agricultural Drainage*. Institute of Land Reclamation. College of Agriculture, Alexandria University, Alexandria, Egypt (Copy in the Iowa State University Library, Ames, Iowa.).
61. Kirkham, D. (1973.) Soil physics and soil fertility. *Bull. Rech. Agron. Gembloux Fac. Sci. Agron. l'E' tat*, (New series) 8 (2), 60-88.
62. Kirkham, D., Powers, W.L. (1972.). *Advanced Soil Physics*. Wiley, New York.
63. Kirkham, M.B. (2004.). *Principles of soil plant water relations*. Manhattan, USA.
64. Kisić I. (2012.). *Sanacija onečišćenog tla. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu*. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
65. Koestel, J. (2020.) Soil drying and soil structure. *Proceedings of the EGU2020*, 4563. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4563> – pristup 05.05.2021
66. Koestel, J., Jorda, H. (2014.). What determines the strength of preferential transport in undisturbed soil under steady-state flow? *Geoderma* 217, 144–160.
67. Koestel J. K., Moeys J., Jarvis N. J. (2012.). Meta-analysis of the effects of soil properties, site factors and experimental conditions on solute transport. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 1647–1665.
68. Kosugi, K. (1996.). Lognormal Distribution Model for Unsaturated Soil Hydraulic Properties. *Water Resour. Res.* 32, 2697–2703.
69. Kramer, P.J. (1983.) *Water Relations of Plants*. Academic Press, New York.

70. Kumar, C. P. (2001.). Comon Ground Water Modeling Errors and Remediation. Journal of Indian Water Resources Society, Vol. 21, Nr. 4pp. 149-156.
71. Leij, F.J., Alves, W.J., van Genuchten, M. Th. (1999.). The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database, User's manual Version 1,0.
72. Lin, H. (2010.). Linking principles of soil formation and flow regimes. J. Hydrol. 393, 3–19.
73. Liu, H., Lin, H. (2015.). Frequency and control of subsurface preferential flow: from pedon to catchment scales. Soil Sci. Soc. Am. J. 79, 362–377.
74. Luzar, A., Chandler, D. (1996.). Hydrogen-bond kinetics in liquid water. Nature 379, 55-57.
75. METER Group AG (2015.). HYPROP-FIT Manual.
76. METER Group, Inc. (2017.). WP4C Dew Point PotentiaMeter Operator's Manual. <http://www.labcell.com/media/140280/wp4c%20instruction%20manual.pdf>. - pristup 01. srpnja 2021.
77. Mohanty, B.P., Bowman, R.S., Hendrickx, J.M.H., van Genuchten, M.Th (1997.). New piecewisecontinuous hydraulic functions for modeling preferential flow in an intermittent floodirrigated field. Water Resour. Res. 33, 2049-2063.
78. Molden, D. (1997.) Accounting for Water Use and Productivity. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka. <https://doi.org/10.1080/07900629948934> – pristup 22.05.2021.
79. Morales, V.L., Parlange, J.Y., Steenhuis, T.S. (2010.). Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. J. Hydrol. 393, 29–36.
80. Mualem Y. (1976.). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research. 12 (3): 513–522.
81. Mustać, I. (2015.). Primjena modelacijskih pristupa u agroekosustavima. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Filipović V., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 256-280.
82. Nimmo, J. R. (2020.). The processes of preferential flow in the unsaturated zone. Soil Science Society of America Journal. doi:10.1002/saj2.20143 – pristup 09.05.2021
83. Nobel, P.S. (1974.). Introduction to Biophysical Plant Physiology. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
84. Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Filipović V., Petek M., Lazarević B., Bubalo M. (2015.). Voda u agroekosustavima. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
85. Or, D., Ghezzehei, T.A. (2002.). Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. Soil Tillage Res. 64, 41–59.
86. Petek, M., Lazarević B. (2015.). Svojstva vode i fiziološka uloga vode u sustavu tlo – biljka – atmosfera. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb. 53-85.
87. Scaini, A., C. Hissler, F. Fenicia, J. Juilleret, J.F. Iffly, L. Pfister, and K. Beven. (2018.). Hillslope response to sprinkling and natural rainfall using velocity and celerity estimates in a slate-bedrock catchment. Journal of Hydrology 558:366-379. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.011>. pristup – 22.05.2021.

88. Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th. (2001.). ROSETTA: a computer model for estimating Soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251: 163-176.
89. Schindler U., Müller L. (2017.). Soil hydraulic functions of international soils measured with the Extended Evaporation Method (EEM) and the HYPROP device. *Open Data Journal for Agricultural Research*. 3: 10-16.
90. Schwärzel, K., Renger, M., Sauerbrey, R., Wessolek, G. (2002.). Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 479–486. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:43.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:43.0.CO;2-8). – pristup 09.05.2021.
91. Soil Science Society of America, (2008.). *Glossary of Soil Science Terms 2008*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
92. Song, Y., Ham, J.M., Kirkham, M.B., Kluitenberg, G.J. (1998.). Measuring soil water content under turfgrass using the dual-probe heat-pulse technique. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 123, 937e941.
93. Šimunek J., Angulo-Jaramillo R., Schaap M.G., Vandervaere J.P., van Genuchten M.T. (1998.). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension disc infiltrometer data. *Geoderma*. 86:61–81.
94. Šimunek J., Dong W., P.J. Shouse, van Genuchten, M.Th. (1998.). Analysis of field tension disc infiltrometer data by parameter estimation. *Int. Agrophysics*. 12: 167-180 .
95. Šimunek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th. (1999.). The HYDRUS software package for simulation twodimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
96. Šimunić, I. (2013.). *Uređenje voda*. Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
97. Tiemeyer, B., Albiac Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., et al. (2016.). High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biol.* 22, 4134–4149. <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>. – pristup 13.05.2021.
98. Tisdall, J.M., Oades, J.M. (1982.). Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33, 141–163.
99. Tomić F. (1988.). *Navodnjavanje*. Fakultet poljoprivrednih znanosti i Društvo inženjera i tehničara Hrvatske, Zagreb.
100. Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980.). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574e582. van Genuchten, M. Th., 1994. New issues and challenges in soil physics research. *Trans. 15th Int. Congr. Soil Sci.* 1, 5e27.
101. Topp, G. C., and Ferré, P. A. (2002.). Water content. In: Dane, J., and Topp, G. C., eds., “Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods.” Soil Science Society of America, Madison, WI.
102. Toride, N., Leij, F.J., van Genuchten, M. Th. (1995.). *The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments*, Research Report No. 137. California.

103. Tuong, T.P., Bhuiyan, S.I. (1999.). Increasing water-use efficiency in rice production: Farm level perspectives. *Agric. Water Manage.* 40 (1), 117–122. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00091-2) - pristup 22.05.2021.
104. Uhlenbrook, S. (2006.). Catchment hydrology—a science in which all processes are preferential—invited commentary. *Hydrol. Process.* 20, 3581–3585.
105. Valentin, C., Bresson, L.-M. (1992.). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225–245.
106. Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Kroes, J.G. (2008.). Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal* 7: 640-653.
107. Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M., Droogers, P. (1994.). Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 647–652. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030002x>. – pristup 03.06.2021.
108. Van Genuchten, M. Th. (1980.). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-1037.
109. Van Genuchten, M. Th., Leij, F.J., Yates, S.R. (1991.). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, California.
110. Von Post, L., Granlund, E. (1926.). *ödra Sveriges Torvtillgångar I* (Peat resources in southern Sweden I). *Sveriges Geol. Undersökning C 335* (19), 1–128 (in Swedish).
111. Voss, C.I., Provost, A.M. (2002.). SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, USA.
112. Vučić, N. (1973.). *Navodnjavanje poljoprivrednih kultura*. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
113. Vukadinović, V., Lončarić, Z. (1997.). *Ishrana bilja*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek.
114. Waddington, J., Morris, P., Kettridge, N., Granath, G., Thompson, D., Moore, P. (2015.). Hydrological feedbacks in northern peatlands. *Ecohydrology* 8, 113–127. <https://doi.org/10.1002/eco.1493>.
115. Ye, M., P.D. Meyer, and S.P. Neuman (2008.). On model selection criteria in multimodel analysis. *Water Resources Research* 44 (3) W03428, doi:10.1029/2008WR006803.
116. Zhang R. (1997.). Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61:1024-1030.
117. Žugaj, M., Dumičić, K., Dušak, V. (2006.). *Temelji znanstvenoistraživačkog rada. Metodologija i metodika*. Drugo, dopunjeno i izmijenjeno izdanje. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet organizacije i informatike, Varaždin.

7. Životopis

Roberta Štornoga rođena je 05. ožujka 1994. godine u Rijeci. Od 2008. do 2012. pohađala je Srednju Školu Vladimira Gortana u Bujama usmjerenja: hotelijersko-turistički tehničar. Preddiplomski studij na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Hortikultura upisuje u akademskoj godini 2015./2016. a završava u akademskoj godini 2018./2019. iste godine upisuje diplomski studij na istom Fakultetu, smjer melioracije na akademskoj godini 2020./2021. Služi se engleskim jezikom razine B1, talijanskim jezikom razine B2. Tijekom studija radila je nekoliko poslova preko Student servisa.