

# Kalibracija i validacija modela toka vode u tlu primjenom senzorske tehnologije

---

**Mikičić, Stjepan**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:413446>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**



*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



# **KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA TOKA VODE U TLU PRIMJENOM SENZORSKE TEHNOLOGIJE**

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Mikičić

Zagreb, rujan, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Agroekologija

# **KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA TOKA VODE U TLU PRIMJENOM SENZORSKE TEHNOLOGIJE**

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Mikičić

Mentor:

doc. dr. sc. Vilim Filipović

Zagreb, rujan, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## **IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Stjepan Mikičić**, JMBAG 0178103299, rođen 6. prosinca 1995. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

### **KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA TOKA VODE U TLU PRIMJENOM SENZORSKE TEHNOLOGIJE**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor 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 upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Stjepana Mikičića**, JMBAG 0178103299, naslova

**KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA TOKA VODE U TLU PRIMJENOM SENZORSKE**

**TEHNOLOGIJE**

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. doc. dr. sc. Vilim Filipović mentor

\_\_\_\_\_

2. doc. dr. sc. Ivan Mustać član

\_\_\_\_\_

3. doc. dr. sc. Vedran Rubinić član

\_\_\_\_\_



# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. Cilj istraživanja	1
<b>2. Pregled literature</b>	<b>2</b>
2.1. Vodni režim	2
2.1.1. Hidrološki ciklus	2
2.1.2. Bilanca vode	3
2.1.3. Tok vode u tlu	4
2.2. Hidrauličke karakteristike tla	5
2.3. Numeričko modeliranje toka vode i inverzno modeliranje	7
2.4. TDR tehnologija	9
<b>3. Materijali i metode</b>	<b>10</b>
3.1. Područje istraživanja	10
3.1.1. Lokacije istraživanja	10
3.1.2. Pedološke značajke	11
3.2. Laboratorijske metode	13
3.2.1. Određivanje hidrauličkih karakteristika tla HYPROP metodom	14
3.3. Numeričko modeliranje toka vode primjenom HYDRUS-1D modela	17
3.3.1. Inverzno modeliranje	18
3.4. Senzorna mjerenja uporabom TDR tehnologije	19
3.4.1. TEROS senzori	19
3.4.1.2. ZENTRA Cloud	21
3.5. Statistička analiza	22
<b>4. Rezultati i rasprava</b>	<b>23</b>
4.1. Rezultati određivanja hidrauličkih karakteristika tla	23
4.2. Klimatski parametri na lokaciji istraživanja	27
4.3. Kalibracija i validacija modela toka vode na temelju TDR senzora	28
4.4. Rezultati inverznog modeliranja toka vode	31
4.4.1. Usporedba simulacija toka vode istraživanih lokacija primjenom inverzno dobivenih vrijednosti hidrauličkih parametara tla	32
<b>5. Zaključak</b>	<b>34</b>
<b>6. Literatura</b>	<b>35</b>
<b>7. Prilozi</b>	<b>40</b>
<b>Životopis</b>	<b>42</b>

# Sažetak

Diplomskog rada studenta **Stjepana Mikičića**, naslova

## **KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA TOKA VODE U TLU PRIMJENOM SENZORSKE TEHNOLOGIJE**

Tok vode u tlima ključan je proces koji utječe na njenu količinu i kvalitetu. S obzirom da je transport onečišćivača u tlu usko povezan s kretanjem vode vrlo je važno na pravilan način procijeniti navedene procese u stvarnim (poljskim) uvjetima. Cilj ovog rada je kalibrirati i validirati model toka vode u nesaturiranoj zoni tla na temelju podataka o količini vode u tlu i vodnog potencijala tla. Istraživanje je provedeno na tri lokacije u drugoj zoni vodozaštite grada Zagreba. Terenskim opažanjima (TDR tehnologija) i laboratorijskim analizama (HYPROP-FIT) eksperimentalno su određeni hidraulički parametri tla koji su prvi korak u određivanju toka vode. Za primjenu numeričkih simulacija korišten je HYDRUS-1D program kojim je simulirana volumna količina vode u tlu i vodni potencijal. Radom se izvršila kalibracija modela toka vode pri čemu su korištene optimizirane, inverzno dobivene vrijednosti hidrauličkih parametara. Rezultati istraživanja varirali su ovisno o hidrauličkim parametrima tla te klimatskim parametrima (temperatura, oborine i evapotranspiracija). Statističkom analizom podataka potvrđeno je da je model uspješno validiran i kalibriran.

**Ključne riječi:** numeričko modeliranje, nesaturirano tlo, TDR, inverzno modeliranje, HYDRUS



## Summary

Of the master's thesis – student **Stjepan Mikičić**, entitled

### **CALIBRATION AND VALIDATION OF WATER FLOW MODEL IN SOIL USING SENSOR TECHNOLOGY**

Water flow in soils is a key process that affects its quantity and quality. Given that the transport of pollutants in the soil is closely related to the water flow, it is very important to properly assess these processes in real (field) conditions. The aim of this paper is to calibrate and validate the water flow model in the unsaturated soil zone based on soil water content and pressure head data. The research was conducted at three locations in the second water protection zone of Zagreb city. With the field observations (TDR technology) and laboratory analyzes (HYPROP-FIT) we experimentally determined the hydraulic parameters of the soil, which is the first step in determining the water flow. HYDRUS-1D program was used for the numerical simulations, which determined soil water content and pressure head. The calibration of the water flow model was performed using optimized, inversely obtained values of hydraulic parameters. The results of the research varied depending on soil hydraulic properties and climatic parameters (temperature, precipitation and evapotranspiration). Statistical analysis of the data confirmed that the model was successfully validated and calibrated.

**Keywords:** numerical modeling, unsaturated soil, TDR, inverse modeling, HYDRUS

## 1. Uvod

Promjene u ekosustavu mogu znatno izmijeniti dostupnost prirodnih resursa kao što su voda i hrana (Hillel, 2004.), stoga se posljednjih nekoliko desetljeća sve veća pozornost posvećuje zaštiti okoliša i kontroli onečišćenja u sustavu atmosfera – biljka – tlo – voda. Uslijed globalnih promjena, bilo klimatskih ili iskorištavanja zemljišta, povećava se zabrinutost za naglim promjenama hidrološkog sustava (Robinson i sur., 2019.). Sve je veći broj potencijalno štetnih tvari (supstanci) koje se primjenjuju ciljano u poljoprivrednoj praksi, industriji i/ili urbanim sredinama (Ondrašek i sur., 2015.). Važno je analizirati interakcije između svih aspekata biosfere uključujući atmosferske, biogeokemijske, hidrološke i vegetacijske procese (Kucharik i sur., 2000.). Sve je jasnije da korištenje više vode za poljoprivredu može imati ozbiljne posljedice na druge korisnike vode i sami sustav (Rockström i sur., 2004.) te je važna racionalna upotreba vode kako bi se smanjili štetni utjecaji nedostatka vode (Lal i Stewart, 2012.). Prema Filipoviću (2012.), tok vode u tlima ključan je proces koji utječe na njenu količinu i kvalitetu u prirodi. S obzirom da je transport onečišćivača u tlu usko povezan s kretanjem vode vrlo je važno na pravilan način procijeniti navedene procese u stvarnim (poljskim) uvjetima. Eksperimentalno određivanje hidrauličkih parametara tla temeljem terenskih opažanja (npr. procjedni lizimetri, TDR senzori) i laboratorijskih analiza predstavlja primarnu komponentu u određivanju toka vode i vodnog režima. Prema navodima Hillela (2004.), većina procesa koji uključuju interakciju tla i vode (opskrba biljaka vodom i hranjivima, transport vode i otopina izvan zone korijena) javljaju se dok je tlo u nezasićenom stanju. Sve su češća istraživanja koja se posvećuju nesaturiranoj zoni tla koja može biti izvor mnogih tvari koja se mogu klasificirati kao onečišćivači te u kojoj dolazi do njihova ispiranja (Filipović i sur., 2016.). Kontinuiranim motrenjem uz dovoljan broj opažanja (senzora) za mjerenje relativne količine vode u tlu i vodnog potencijala je moguće kalibrirati model toka vode istraživanog područja (Ondrašek i sur., 2019.). Numeričko modeliranje se u posljednje vrijeme često koristi za procjenu pronosa i distribucije tvari pri različitim inicijalnim i graničnim uvjetima (Filipović i sur. 2016.) Razvijeni su brojni modeli koji rješavaju probleme kretanja vode, topline i onečišćivača u nesaturiranoj zoni tla. Jedan od najrazvijenijih i najčešće korišten numerički model je HYDRUS-1D i HYDRUS-2D/3D. HYDRUS programi se koriste za modeliranje kretanja vode i tvari u (ne) saturiranoj zoni u jedno-, dvo-, i trodimenzijalnom prostoru (Šimunek i sur., 2008.; Filipović i sur., 2013., Kirkham i sur., 2019.).

### 1.1. Cilj istraživanja

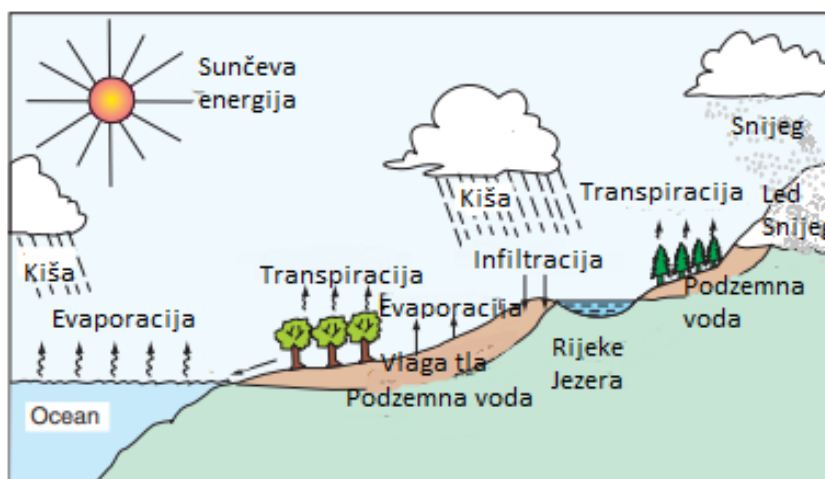
Cilj rada bio je kalibrirati i validirati model toka vode u nesaturiranoj zoni tla na temelju podataka o količini vode u tlu i vodnog potencijala tla koji su prikupljeni postavljanjem senzora na tri lokacije istraživanja.

## 2. Pregled literature

### 2.1. Vodni režim

#### 2.1.1. Hidrološki ciklus

Hidrološki ciklus ili kruženje (recirkulacija) vode prirodni je fenomen u kojem se voda, zbog svojih specifičnih svojstava, transformira iz pojedinog stanja (kruto-tekuće-plinovito), odnosno izmjenjuje se između Zemljine vodene i/ili kopnene površine te atmosfere (Ondrašek i sur., 2015.). Prema Lalu i Stewartu (2012.) i Ondrašeku (2015.), najvažnije sastavnice hidrološkog ciklusa su oborine, otjecanje (površinsko i podzemno), infiltracija te evaporacija i transpiracija, tj. evapotranspiracija. One vode koje padnu na tlo u obliku oborina isparavaju se u atmosferu (evaporacija) ili površinski otječu, a dio se infiltracijom procijedi u tlo gdje se putem biljaka transpiracijom vraća nazad u atmosferu ili podzemno otječe čime formira podzemnu vodu (Lal i Stewart, 2012.).



Slika 2.1.1.1. Hidrološki ciklus

Izvor: Hillel, 2004.

Prema Lalu i Stewartu (2012.) hidrološki ciklus je neprekidno i stalno kretanje vode s neodređenim početkom i krajem. Karakterizira ga varijabilnost u prostoru i vremenu te se isprepleće s drugim ciklusima u okolišu kao što su prijenos tvari i energije.

Kako bi se predvidjele promjene u ekosustavu, odnosno promjene hidrološkog ciklusa i režima oborina uslijed povećanja koncentracija stakleničkih plinova, potrebno je primijeniti kombinacije pokusa i analiza (Ondrašek, 2015.). Postoje dokazi koji ukazuju da promjena režima oborina uslijed klimatskih promjena, smanjuje primarnu produktivnost ekosustava. Produktivnost biljaka, vodni stres kao i biogeokemija tla su pod snažnim utjecajem dinamike vlage u tlu. Manjak vlažnosti u tlu potiče smanjenje vodnog potencijala u biljkama,

što uzrokuje dehidraciju, pad turgora, smanjenje fotosinteze i sl. Čak i održavanje količine i povećanje intenziteta oborina, ali smanjenje njihove učestalosti, utječe na dinamiku vlage u tlu (Porporato i sur., 2014.). Hidrološki ciklus je od presudne važnosti za klimu i globalne procese ekosustava (Kucharik i sur., 2000.)

### 2.1.2. Bilanca vode

Svaki pokušaj kontroliranja pristupačnosti vode biljkama mora biti temeljen na kvantitativnom znanju dinamike vode u tlu (Hillel, 2004.). Bilanca vode u agroekosustavu ( $\Delta W$ ) predstavlja količinski izraz vodnog režima tla (Šimunić, 2013.), odnosno razliku između ukupnih prihoda (inputa, ulaza ili dotoka) vode koja uđe u sustav ( $W_{in}$ ) i ukupnih rashoda (outputa, izlaza ili gubitaka) vode koja taj isti sustav napusti ( $W_{out}$ ) (Ondrašek, 2015.). Dakle, bilanca vode u tlu uzima u obzir vode koje se pohranjuju i izlaze iz određenog obujma tla tijekom određenog vremenskog razdoblja (Hillel, 2004.).

Matematički se prikazuje:

$$\Delta W = W_{in} (O + N + K + P_{in} + P_{pin}) - (W_{out} (E + T + P_{out} + P_{pout} + P_{er})) \quad (1)$$

O	oborine
N	navodnjavanje
K	kapilaritet
$P_{in}$	površinsko pritjecanje vode
$P_{pin}$	potpovršinsko pritjecanje vode
E	evaporacija
T	transpiracija
$P_{out}$	površinsko otjecanje
$P_{pout}$	potpovršinsko otjecanje
$P_{er}$	perkolacija (procjeđivanje)

Različiti procesi toka vode u tlu (infiltracija, redistribucija, evaporacija, ocjeđivanje i dr.) su izrazito ovisni jedni o drugima jer se pojavljuju sekvencijalno ili simultano. Bilanca vode temelji se na zakonu očuvanja mase, u kojem se navodi da materija ne može biti niti stvorena niti uništena, već može se promijeniti samo njeno stanje i položaj (Hillel, 2004.).

Prema Bradyju (1984.) zadržavanje vode u tlu, usvajanje od strane biljke i gubitak u atmosferu je energetski fenomen. U taj proces su uključene različite energije uključujući potencijalnu, kinetičku i električnu, kao i tzv. slobodnu energiju koja karakterizira energetski status vode. Uslijed energije dolazi do kretanja i mijenjanja iz stanja više energije u stanje niže slobodne energije. Stoga se voda u tlu kreće iz zone područja gdje je razina slobodne

energije visoka u područje gdje je razina slobodne energije niska. Dakle kreće se iz saturirane zone tla (visoka slobodna energija) u nesaturiranu zonu tla (niska energija).

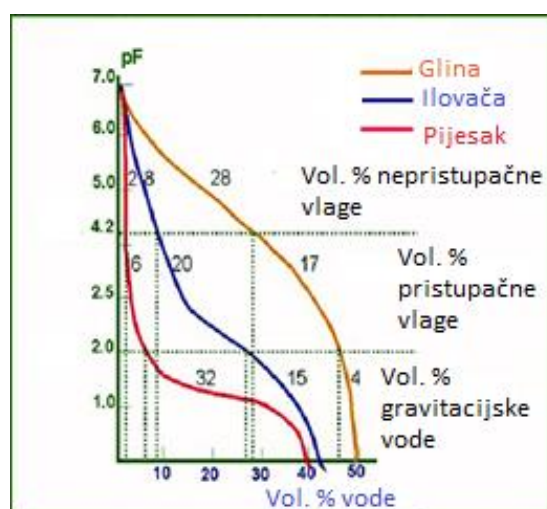
### **2.1.3. Tok vode u tlu**

Kretanje vode u tlu ovisi o gravitaciji ili hidrauličkom gradijentu, površinskoj napetosti ili koheziji te adheziji, adsorpciji i higroskopnosti (McCarty i sur., 2016.). Tok vode javlja se kao odgovor na gradijent hidrauličkog potencijala, a ne nužno kao odgovor na gradijent sadržaja vode (Hanks, 1992.). Tok podzemnih voda dijeli se na tok u saturiranoj i nesaturiranoj sredini. Tok u nesaturiranoj sredini primarno je vertikalna, a tok u saturiranoj sredini primarno je horizontalan (Gjetvaj, 2006). Prema Mustaću (2015.) i McCartyju i sur. (2016.) kretanje podzemne vode može se odvijati kroz nezasićeno (nesaturirano) i kroz zasićeno (saturirano) tlo, a brzinu i smjer gibanja određuje količina vode u tlu, tekstura, struktura i poroznost tla, sadržaj organske tvari u tlu i sile koje uzrokuju gibanje. Voda u tlu se pojavljuje, odnosno ulazi u različitim uvjetima (Hillel, 2004.) te se može kretati u svim smjerovima: descendntno, ascendentno i lateralno (Tomić, 1988.; Hillel, 2004.,; Sraka, 2016.). Kretanje vode u tlu uzrokuju uglavnom kapilarne sile, sila gravitacije te hidrostatski tlak. Smjer kretanja ovisan je o djelovanju sila kohezije u kapilarama tla. Tijekom prirodnog vlaženja tla oborinama ili navodnjavanjem, voda se kreće descendntno (prema dolje). Ascendentno kretanje vode (prema gore) odvija se kapilarnim vlaženjem od strane podzemne vode, a prilikom lateralnog kretanja vode (bočno) tlo se vlaži u svim smjerovima. Za potrebe utvrđivanja vodnog režima tla i regulacije vode u tlu treba voditi računa o tri osnovna oblika gibanja tekuće vode: kapilarnom gibanju, infiltraciji i vodopropusnosti tla (Šimunić, 2013). Razina vode naziva se vodno lice. Pore tla ispod vodnog lica čine saturiranu zonu tla i potpuno su ispunjene vodom. U njemu se kretanje vode odvija pod utjecajem gravitacije. Iznad razine atmosferskog tlaka (vodnog lica) nalazi se zasićeno kapilarno područje koje postupno prelazi u nezasićeno kapilarno područje. U zasićenom području gibanje vode između pora odvija se dominantno zbog gravitacijske sile, a u nezasićenom području na gibanje vode između pora, uz kapilarnu i gravitacijsku silu, utječu i termodinamičke sile (Mustać, 2015.; Sraka 2016.)

Iznad kapilarnog područja nalazi se područje adhezijske vode u kojemu je voda uz čestice tla vezana u obliku opne. Pore tla u tom području ispunjene su mješavinom zraka i vodene pare čime se područje iznad kapilarnoga naziva nesaturirana zona tla. Područje adhezijske vode (nesaturirana zona tla) podijeljena je na područje membranske vode i higroskopne vlage. Kretanje vode u području adhezijske membranske vode uzrokovano je kapilarnim, termodinamičkim i elektrostatičkim silama, a u području higroskopne vlage na kretanje utječu samo termodinamičke sile (Jović, 2006).

## 2.2. Hidrauličke karakteristike tla

Hidrauličke karakteristike tla opisuju makroskopske odnose između vodnog potencijala, faze koncentracije pojedinih otopina u tlu i ponašanja kretanja vode i plinova u tlu. Navedeni odnosi ovise o temperaturi, (geometrijskoj) strukturi pora u tlu, karakteristikama površine matriksa tla, te o karakteristikama tekućina ili otopina koje se nalaze u prostoru pora. Kako navodi Filipović (2015.), važno je odrediti hidrauličke karakteristike istraživanog tla prilikom modeliranja jer one direktno utječu na sadržaj vode u tlu, dok sadržaj vode u tlu utječe na sadržaj zraka i plina u tlu, što posljedično utječe na disanje korijena, aktivnost mikroorganizama i kemijsko stanje tla (npr. oksido-redukcijski potencijal) (Hillel, 2004). Retencijske krivulje tla definiraju odnos između relativne količine vode u tlu  $\theta$  (omjer mase vode u tlu i mase osušenog tla u određenom trenutku) i vodnog potencijala tla  $h$ . Također, imaju karakterističan odnos za različite tipove tala (Slika 2.2.1.). Pri potencijalu blizu vrijednosti 0, tlo je gotovo potpuno saturirano i voda u matriksu tla je pod utjecajem kapilarnih sila dok je u poroznom sustavu tla slobodna. Prilikom smanjenja  $\theta$  sile vezanja postaju sve jače (potrebna je jača sila za ekstrakciju vode iz tla), i kod malih potencijala (blizu granici točke venuća  $pF$  4,2; = 15,000 cm) voda koja je zadržana u tlu nalazi se u najsitnijim porama tla.



Slika 2.2.1. Primjer retencijske krivulje tla za ilovaču, pijesak i glinu

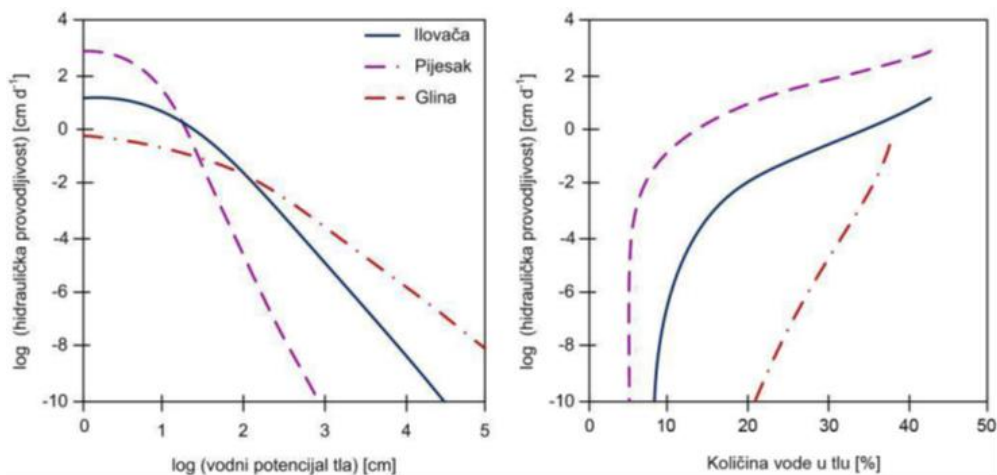
Izvor: Kueneman i sur., 2020.

Filipović (2015.) navodi da je tok vode u nesaturiranoj zoni tla puno kompleksniji nego u saturiranoj zoni. Za simuliranje toka vode u nesaturiranom tlu potrebno je odrediti dvije hidrauličke karakteristike tla: relativnu količinu vode u tlu (parametar retencijske krivulje tla) i hidrauličku provodljivost nesaturiranog tla (parametar krivulje hidrauličke provodljivosti). Ukupni vodni potencijal tla reflektira energetske status tekućine (vode) u određenoj točki u poroznom sustavu (tlu). Petek i Lazarević (2015.) vodni potencijal ( $\Psi_w$ ) predstavljaju i kao kemijski potencijal vode. Kemijski potencijal vode relativna je veličina, a predstavlja razliku između potencijala tvari u određenim uvjetima i potencijala vode u standardnim uvjetima.

Vodni potencijal opisuje slobodnu energiju po jedinici volumena vode u otopini u odnosu na standardno stanje vode. Filipović (2015) također tvrdi da, unatoč tome što mnogobrojne različite sile pridonose ukupnom potencijalu i na taj način utječu na tok vode u nesaturiranom tlu, neke su komponente ukupnog vodnog potencijala u većini slučajeva zanemarive. Najvažnije su gravitacijski potencijal, hidrostatski (osmotski) potencijal i matrični potencijal. U praksi se najčešće koristi kombinacija matričnog potencijala za nesaturiranu zonu s hidrostatskim tlačnim potencijalom za saturiranu zonu (pozitivan predznak) kao vodni potencijal tla ( $h$  – definiran jedinicom duljine) koji je onda lako primjenjiv za obje, saturirane i nesaturirane uvjete.

Filipović (2015.) također navodi kako teksturno lakša tla (pjeskovita) vodu gube mnogo brže od teksturno težih tala (glina) što predstavlja izravan odraz distribucije veličine pora u tlu pri određenoj teksturnoj jedinici tla. Obzirom da većina pora u teksturno lakšim tlima ima veći promjer, voda će se procijediti kod malih negativnih potencijala tla, a u teksturno težim tlima (glina, ilovača, praškasta ilovača) procjeđivanje vode događa se pri vrlo visokim vrijednostima negativnog vodnog potencijala. Oblik retencijske krivulje opisuje se primjenom različitih modela, a najčešći je van Genuchten – Mualem model (van Genuchten, 1980.).

Hidraulička provodljivost je sposobnost tla za prijenos (transport) vode i na taj je način inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Kao takva, hidraulička provodljivost smanjuje se tijekom sušenja tla i sa smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom. Hidraulička provodljivost mnogo je veća u teksturno lakšim tlima (pjesak), nego u tlima glinovite ili ilovaste strukture (slika 2.2.2). Vrlo je važno napomenuti da se prelaskom tla iz saturirane u nesaturiranu fazu hidraulička provodljivost drastično smanjuje. Smanjenje je, ako je izraženo kao funkcija vodnog potencijala tla, mnogo izraženije u lakšim nego u težim tlima (Filipović, 2015.).



Slika 2.2.2. Primjer odnosa hidrauličke provodljivosti i vodnog potencijala tla (lijevo); odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu za teksturno različita tla (desno)

Izvor: Ondrašek i sur., 2015.

### 2.3. Numeričko modeliranje toka vode i inverzno modeliranje

U modernom pristupu zaštite vodnih resursa i održive poljoprivredne proizvodnje sve važniju ulogu imaju simulacije toka vode i transporta onečišćivača (Šimunek i Bradford, 2008.). Filipović i sur. (2016.) navode da modeli toka vode i pronosa tvari služe kao alati kojima se mogu opisati i predvidjeti specifični procesi u nesaturiranoj i saturiranoj zoni tla. Zbog važnosti nesaturirane zone kao bitnog faktora održavanja ekosustava na Zemlji prisutna je velika potreba za razumijevanjem i predviđanjem složenih interakcija u nesaturiranoj zoni, uključujući biokemijske reakcije (Filipović, 2012.). Modele treba gledati kao jedan od vrlo naprednih i korisnih „alata“ kojima se uz pravilnu upotrebu mogu predvidjeti različiti procesi koji se odvijaju u okolišu (Maloić, 2018). Prema Kumaru i Singhu (2015.) modeli su konceptualni opisi ili aproksimacije koje opisuje fizikalni sustav koristeći matematičke jednadžbe, no oni nisu točan opis fizikalnih sustava ili procesa. Matematički prikazujući pojednostavljenu verziju hidrogeološkog sustava, mogu se predvidjeti scenariji koji mogu ujedno biti i uspoređeni i testirani.

Brojni znanstvenici u svrhu modeliranja toka vode u nesaturiranoj zoni koriste HYDRUS-1D program koji rješava tok vode numerički pomoću Richardsove jednadžbe (Richards, 1931.) za saturirani i nesaturirani tok vode. Richardsova jednadžba bazirana je na jednadžbi kontinuiteta i Darcyjevom zakonu (Darcy, 1856). Jednadžbom kontinuiteta izražava se promjena u relativnoj količini vode u zadanom volumenu tla, kao posljedici prostorne promjene toka vode. Darcyjev zakon primijenjen je na djelomično saturirani tok i opisuje hidrauličku provodljivost kao funkciju relativne količine vode u tlu  $K = K(\theta)$ , što znači da će malo smanjenje količine vode u tlu dovesti do signifikantnog smanjenja hidrauličke provodljivosti  $K$ . Zbog navedenog razloga u mnogim tipovima tala postoji razlika u hidrauličkoj provodljivosti ispod i iznad razine podzemne vode koja može biti vrlo velika. Kao što je već navedeno, model numerički rješava Richardsovu jednadžbu za varijabilno saturirane medije te jednadžbu advekcije i disperzije za transport tvari (Šimunek i van Genuchten, 2006.; Er-Raki i sur., 2021.).

Program je korišten u stotinama znanstvenih istraživanja prvenstveno zbog širokog područja primjene (npr. Šimunek, 2006.; Caiqiong i Jun, 2016.). Kanzari i sur. (2018.) navode da je HYDRUS 1D model, koji rješava tok vode pomoću Richardsove formule i transport tvari pomoću jednadžbe advekcije i disperzije, jedan od najraširenijih modela. Također navode da je korišten u istraživanjima u kojima su koristili geokemijske module za simuliranje toka vode i tvari. HYDRUS model korišten je u različite svrhe kao npr., simuliranje geokemijskog transporta teških metala u nesaturiranoj zoni ( Jacques i sur., 2008.), simuliranje toka vode i soli u svrhu procjene HYDRUS-1D modela u različitim terenskim uvjetima (Kanzari i sur., 2018.), simulacije gospodarenja navodnjavanjem (Suileman, 2008.) i sl.



HYDRUS-1D model simulira jednodimenzionalni tok vode i tvari u poroznom i promjenjivo saturiranom mediju, u stalnom ili privremenom režimu te u poznatom metričkom sustavu (Šimunek i sur., 2005.). Koristi u svrhu simulacija kretanja vode u tlu i komponenti vodne bilance (infiltracije, duboke perkolacije, evaporacije i transpiracije) te je zbog svoje jednostavnosti najčešće korišten model u odnosu na druge kompliciranije modele (Er-Raki i sur., 2021.). Brojne studije ukazuju da HYDRUS-1D model može uspješno simulirati sadržaj vode u tlu na različitim lokacijama, pri različitim uvjetima poput tipa tla, klimatskih uvjeta i različitog biljnog pokrova. Osim toga, može simulirati komponente cijelog hidrološkog sustava uključujući evapotranspiraciju, oborine ili navodnjavanje te drenažu (Caiqiong i Jun, 2016.). Jedan od glavnih nedostataka navedenog modela je veliki broj ulaznih parametara i manjak nedostatak validacija u terenskim uvjetima (Kanzari i sur., 2018.).

HYDRUS programski paketi imaju ugrađen Marquardt-Levenberg tip optimizacije parametara tako da skoro svaka primjena koja se može pokrenuti u direktnom načinu (kada su svi parametri i početni te rubni uvjeti određeni kao i predviđanja) može biti pokrenuta jednako uspješno i u inverznom načinu. Ovi modeli su stoga učinkoviti za razne kalibracije modela i određivanje hidrauličkih parametara tla (Šimunek i van Genuchten, 2006; Mešić, 2018.).

Minimizacija objektivne funkcije ostvaruje se primjenom Levenberg-Marquardtove nelinearne metode (Marquardt, 1963.). Ova metoda uključuje Newtonove i niz drugih metoda te generira intervale za optimiziranje parametara. Smatra se vrlo učinkovitom i postala je standardna metoda kojom se koriste znanstvenici (Šimunek i sur., 2012.b.)

Prema Šimunku i sur. (2012.a.) kalibracija modela je definirana kao proces podešavanja modela manipulirajući ulaznim podacima (npr. hidrauličkim parametrima tla) i inicijalnim ili rubnim uvjetima unutar razumnih raspona sve dok se rezultati simuliranog modela ne poklapaju s promatranim varijablama (npr. vodnim potencijalom, sadržajem vode, i koncentracijom). Za kalibraciju modela odabire se objektivna funkcija koje služi kao „mjera sporazuma“ između izmjerenih i modeliranih podataka te koja je direktno ili indirektno povezana s podesivim parametrima. Najbolji parametri se postižu tako što se objektivna funkcija svodi na najmanju moguću mjeru. Kalibracija modela može se postići korištenjem automatizirane minimizacije i tehnikom procjene parametara. Model se smatra uspješno kalibriran kada reproducira podatke unutar subjektivno prihvatljive razine preciznosti. Mogućnost inverzije podataka može se koristiti za određivanje raspona hidrauličkih parametara tla te transporta tvari i topline u tlu, ali se ne može koristiti za određivanje drugih varijabli ili parametara kao što su inicijalni i rubni uvjeti ili parametri usvajanja vode korijenom.

Kirkham i sur. (2019.) navode da se inverznim modeliranjem fizikalnih parametara tla osigurava neizravan način procjenjivanja hidrauličkih svojstava nesaturiranog tla. Međutim

potrebna su brojna mjerenja kako bi se osigurali dostatni podaci za određivanje nepoznatih parametara. Tehnike inverzne optimizacije sve se više upotrebljavaju za procjenu parametara te brojni modeli imaju ugrađene alate za optimizaciju. Metoda uključuje višestruke izračune u kojima se prilagođavaju parametri koristeći Levenberg-Marquardt metodu, sve dok se predikcije ne slože dovoljno dobro s izmjerenim podacima. To ima prednosti u odnosu na druge tehnike za procjenu hidrauličkih parametara, jer su optimizirani parametri procijenjeni izravno iz izmjerenih podataka.

## 2.4. TDR tehnologija

*TDR (Time Domain Reflectometry)* je elektromagnetska tehnologija te je vrlo precizna i automatizirana metoda (Jones i sur., 2002.) koja se počela uspješno primjenjivati sredinom 1970-ih godina te je postala općeprihvaćena tehnika za mjerenje sadržaja vode u tlu i električne vodljivosti (Ferré i Topp, 2002.; Jones i sur., 2002.; Persico i sur., 2019.). Prema navodima Persica i sur. (2019.) koristi se u svrhu dijagnostike i monitoringa u različitim područjima zbog svoje svestranosti, točnosti i relativno niskih troškova. Dodatna prednost TDR-a je da može biti automatiziran što je korisno za daljinsko upravljanje. Uz gravimetrijsku metodu, TDR metoda je najčešće korištena za određivanje sadržaja vode u tlu (Hillel, 2004.; Kirkham, 2014.). Dokazana valjanost i učinkovitost TDR tehnologije, potaknula je razvoj instrumenata koji su usmjereni na izravno mjerenje karakteristika tla. Voda, otopljene tvari (ioni) i zrak su glavne značajke u tlu koje se mogu mjeriti in-situ pomoću senzora (Ferré i Topp, 2002.). Weil i Brady (2017.) navode da TDR mjeri dva parametra: 1. vrijeme putovanja elektromagnetskog impulsa niz dvije ili tri paralelne metalne prijenosne šipke (vodiče) koje su zakopane u tlu i 2. stupanj rasipanja impulsa koje je u interakciji s tlom na krajevima linija. Vrijeme putovanja impulsa povezano je s dielektričnom konstantom tla, a rasipanje signala povezan je s razinom soli u tlima. Stoga i vlažnost tla i salinitet mogu biti izmjereni TDR-om.

Prema Hillelu (2004.) i Kirkhamu (2014.), TDR upotrebljava dielektričnu konstantu ( $\epsilon$ ) vode za određivanje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Dielektrična konstanta materijala je omjer kapaciteta kondenzatora s materijalom između ploča i kapaciteta s vakuumom između ploča. Dielektrična konstanta ovisi i materijalu. Primjerice, dielektrična konstanta za vakum  $\epsilon$  je 1 (Kirkham, 2014.), za parafinski vosak 2,0 – 2,5, za tinjac 6,0 -8,0, dok je vrijednost za suho tlo približno 4,0. U odnosu na navedeno, vrijednost dielektrične konstante vode je 80, stoga sadržaj vode u tlu određuje dielektričnu konstantu (Hillel, 2004.). Kondenzator je uređaj koji se sastoji od dvije ili više ploča koje su odvojene jedne od drugih izolatorom i koristi se za primanje i pohranjivanje električnog naboja. Dielektrična konstanta varira ovisno o temperaturi. Primjerice pri 0 °C iznosi 88,0, dok pri 100 °C iznosi 55,3. Većina čvrstih komponenti tla ima dielektričnu konstantu u rasponu od 2 do 7. Dakle, mjera dielektrične konstante tla je mjerilo sadržaja vode u tlu. (Kirkham, 2014.). Sadržaj vode očitao je iz dielektrične permitivnosti medija, dok se električna vodljivost očitava iz TDR-ovog

prigušenog signala. Empirijski i dielektrični modeli koriste se za povezivanje sadržaja vode i izmjerene dielektrične permitivnosti (Jones i sur., 2002.). Permitivnost vode nije u potpunosti konstantna, odnosno ovisi o temperaturi, elektromagnetskoj frekvenciji i prisutnosti električno nabijenih površina i otopljenih tvari (Cooper, 2016.). Napredak TDR tehnologije i drugih dielektričnih metoda obećava jeftinije i točnije alate za determinaciju sadržaja vode i tvari (Jones i sur., 2002.)

Persico (2019.) navodi da je tokom godina, pomoću TDR tehnologije, razvijeno nekoliko teorijskih i empirijskih modela za određivanje sadržaja vlage u tlu. Koristi se u razne svrhe; primjerice za mjerenje sadržaja vode u nekim prehrambenim proizvodima (u kavi, soji, kukuruzu), za proučavanje mikrovalnih dielektričnih svojstava krute i tekuće hrane, u geotehničkom inženjerstvu, za otkrivanje organskih onečišćujućih tvari u tlima i sl.

### **3. Materijali i metode**

#### **3.1. Područje istraživanja**

##### **3.1.1. Lokacije istraživanja**

Temelj vodoopskrbnog sustava Grada Zagreba čine vodocrpilišta s pripadajućim zdencima. Na osam većih vodocrpilišta nalazi se pedesetak zdenaca koji omogućuju opskrbu vodom. Površina zagrebačkog vodoopskrbnog sustava iznosi oko 800 m<sup>2</sup> s 2400 km cjevovoda, 8000 zasunskih komora i 16000 hidranata te se proteže od padina Medvednice do Kravarskog i od granice sa Slovenijom do Sesveta. Kao cjelina, vodoopskrbni sustav raspolaže s oko 4000 – 5000 l s<sup>-1</sup> vode. Vodoopskrbni sustav Grada Zagreba podijeljen je u tri visinske vodoopskrbne zone. Na gornjim granicama svake zone smještene su vodospreme s kotama preljeva na 185,5 m n.m. – prva zona, na 264,5 m n.m. – druga zona i na 344 m n.m. – treća zona. Ukupna zapremnina vodosprema prve visinske zone iznosi oko 91 000 m<sup>3</sup>, druge visinske zone oko 14 000 m<sup>3</sup> i treće visinske zone oko 6 000 m<sup>3</sup> (Bačani i Posavec, 2014.). Istraživanje je provedeno na području Grada Zagreba (Slika 3.1.1.1.), na tri reprezentativne lokacije (Petruševac, Mala Mlaka i Odra) u drugoj zoni vodozaštite crpilišta.



Slika 3.1.1.1. Ortofoto snimka Grada Zagreba s lokacijama istraživanja

### 3.1.2. Pedološke značajke

Na temelju provedenih detaljnih terenskih i laboratorijskih pedoloških istraživanja na istraživanim područjima, pritom uvažavajući postojeću klasifikaciju tala (Husnjak, 2014.), izdvojena su dva tipa tla s nižim pedosistematskim jedinicama. Kemijska i fizikalna svojstva, karakteristike tala prikazane su u tablici 3.1.2.1..

Tablica 3.1.2.1. Klasifikacija tla te fizikalna i kemijska svojstva tla na istraživanim lokacijama. Prikazani su podaci za prvi i treći horizont u kojima su odrađene detaljne analize tla.

Lokacije	Tip tla	Podtip	Dubina (cm)	Sadržaj mehaničkih čestica (%) u Na-pirofosfatu					Kapacitet tla za vodu (% vol.)	Ukupni porozitet (% vol.)	Volumna gustoća tla (g cm <sup>-3</sup> )	Gustoća pakovanja (g cm <sup>-3</sup> )	Humus %	Reakcija tla (pH)		
		Varijetet		Krupni pijesak	Sitni pijesak	Krupni prah	Sitni prah	Glina						H <sub>2</sub> O	KCl	Ocjena
		Forma														
Petruševac	Rendžina	Na fluvijalnom nanosu	0-30	0,6	2,2	22,8	55	19,4	41,5 – osrednji	49,8 – porozno	1,31	1,49 – srednja	3,96 – dosta humozno	7,79	7,27	alkalična
		Karbonatna	85-110	1,3	6,1	45,4	36,3	10,9	43,1 – osrednji	46,3 – porozno	1,45	1,55 – srednja	1,22 – slabo humozno	8,12	7,42	alkalična
		Duboka														
Mala Mlaka	Rendžina	Na fluvijalnom nanosu	0-42	1,2	15,6	31,5	35,5	16,2	39,2 – osrednji	46,3 – porozno	1,43	1,58 – srednja	2,43 – slabo humozno	7,73	7,20	alkalična
		Karbonatna	82-110	0,9	3,7	34,6	46,5	14,3	41,3 – osrednji	43,8 – malo porozno	1,5	1,63 – srednja	0,78 – vrlo slabo humozno	8,22	7,47	alkalična
		Duboka														
Odra	Eutrično smeđe tlo	Na fluvijalnom nanosu	0-23	16	10,9	24	35,6	13,5	36,8 – osrednji	45,0 – porozno	1,43	1,55 – srednja	3,44 – dosta humozno	7,64	6,60	neutralna
		Tipično	23-43	12,7	10,7	23,6	33,9	19,1	34,1 – malen	45,0 – porozno	1,43	1,60 – srednja	1,89 – slabo humozno	7,61	6,45	slabo kisela
		Ilovasto														

Tla istraživanih područja (Slika 3.1.2.1.) pripadaju redu terestričkih tala koje karakterizira vlaženje isključivo oborinskom vodom, pri čemu se suvišna voda slobodno procjeđuje kroz solum tla. Različitost obilježja tala odražava se na intenzitet i pravac razvoja tala, te na fizikalna, kemijska i biološka svojstva tla (Husnjak, 2014.).

Na vodozaštitnim lokacijama Petruševac i Mala Mlaka tip tla je rendzina koja pripada razredu humusno-akumulativnih tala. Uglavnom nastaje daljnjim razvojem sirozema, ali i na koluvijalnim i fluvijalnim nanosima. Razvija se pretežno na rastresitom matičnom supstratu i na različitim reljefnim formama. Kriterij za izdvajanje podtipova je vrsta matičnog supstrata. Na razini varijeteta kriterij za razvrstavanje rendzine je stupanj razvoja tla koji upućuje na karbonatnost i nekarbonatnost (izluženost). Na razini forme kao kriterij izabrana je ekološka dubina (Husnjak, 2014.).

Na istraživanoj lokaciji Odra nalazi se eutrično smeđi tip tla. Prema Husnjaku (2014.) tlo pripada razredu tipičnih kambičnih tala te ga obilježava prisutnost dijagnostičkog kambičnog (B)0 horizonta, odnosno njegove eutrične forme. Na zaravnjenim terenima i u težem mehaničkom sastavu može se pojaviti kratkotrajno stagniranje oborinske vode. Kao kriterij za izdvajanje podtipova izabrana je vrsta matičnog supstrata. Kriterij za razvrstavanje na razini varijeteta izabran je dostignuti stupanj razvoja, a na razini forme izabrani su tekstura tla i dubina podzemne vode.



Slika 3.1.2.1. Prikaz lokacije i pedološkog profila Petruševac, Mala Mlaka i Odra  
Fotografija: Husnjak, 2018.

### 3.2. Laboratorijske metode

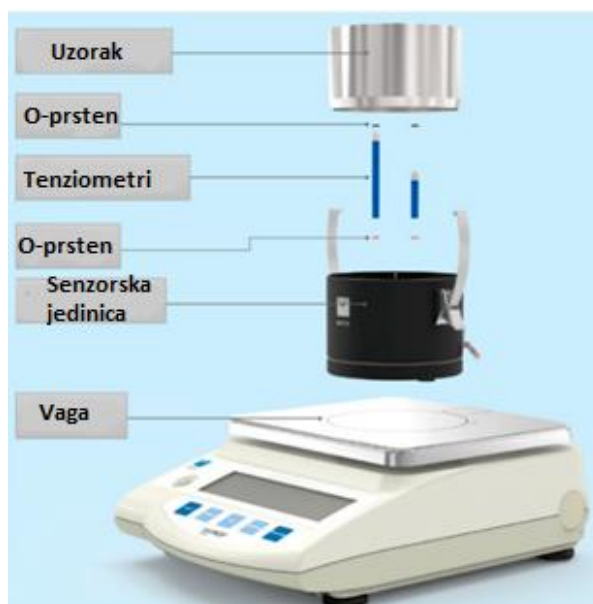
Priprema uzoraka koja uključuje i odvajanje skeleta određena je prema normi HRN ISO 11464:2009, a granulometrijski sastav tla odnosno udio frakcija pijeska, praha i gline određen je prema modificiranoj metodi prosijavanja i sedimentacije (HRN ISO 11277:2011). Volumna gustoća suhog tla određena je prema gravimetrijskoj metodi koja uključuje sušenje

i vaganje uzoraka tala u kojima je prethodno određen volumen (HRN ISO 11272:2004). Prema FAO metodi (2006.) određene su teksturne klase horizonata. Prema Gračaninu (JDPZ, 1971.) određen je kapacitet tla za vodu, a ukupni porozitet računski pomoću gustoće tla (JDPZ, 1971.). Gustoća pakovanja (GP) određena je prema izračunu parametra Rangera, odnosno pomoću volumne gustoće i sadržaja gline u tlu, po formuli:  $GP = \rho_v + 0,009 \times \% \text{ gline (g cm}^{-3}\text{)}$  (SSEW, 1974). Sadržaj humusa određen je metodom po Tjurinu (JDPZ, 1966). Određivanje reakcije tla (pH vrijednosti) provedeno je u vodi i KCl-u (HRN ISO 10390:2005).

### **3.2.1. Određivanje hidrauličkih karakteristika tla HYPROP metodom**

Određivanje hidrauličkih parametara tla je provedeno na temelju pojednostavljene evaporacijske metode (Schindler i Müller, 2017.) pomoću HYPROP automatiziranog sustava koji je primjenjiv kod većine tipova tala (Haghverdi, 2018.) u laboratoriju Zavoda za melioracije (MELILAB). Metoda uzima u obzir promjenu težine uzorka i matričnog (vodnog) potencijala u uzorku tla tijekom procesa sušenja evaporacijom. Dvije su velike prednosti sustava u odnosu na tradicionalne metode: generiranje podataka o retenciji vode visoke rezolucije (preko 100 točaka u rasponu od 0 do 100 kPa u odnosu na 10 točaka kod analize tlačnim ekstraktorom (Fields i sur., 2016.) i vremenski period trajanja svakog mjernog ciklusa (za svaki pojedini uzorak) koji obično traje do nekoliko dana (Haghverdi i sur., 2018.).

Provedbom uzorkovanja tala na istraživanom području, uzeti su uzorci u neporušenom stanju (u cilindrima od 250 cm<sup>3</sup> u dva ponavljanja) za procjenu hidrauličkih parametara u laboratoriju. Neporušeni uzorci tla pohranjeni su u cilindrima od nehrđajućeg čelika promjera 8 cm i dubine 5 cm. Uzorci su saturirani u plastičnoj posudi ispunjenom vodom nakon čega su pripremljeni za analizu HYPROP sustavom. Sustav se sastoji od dva tenziometra koji su vertikalno smješteni u uzorak čiji je cilindar stezaljkama pričvršćen za jedinicu senzora. Uzorak se smješta na vagu čime započinje mjerenje razlike u težini uzorka tla i matričnog (vodnog) potencijala u uzorku tla tijekom procesa sušenja evaporacijom (Slika 3.2.1.1.) (Schindler i Müller, 2017.). Pomoću tenziometara određuje se prosječna vrijednost vodnog potencijala ( $\Psi$ ) uzorka tla. Ta vrijednost odgovara prosječnoj vrijednosti količine vode u odnosu na masu cijelog uzorka (Baviskar i Heimovaara, 2017.). Hidraulički parametri izmjereni su HYPROP-FIT programom na temelju evaporacijske metode, čime je započeto mjerenje. Ovaj tip analize omogućuje korištenje manjeg broja ponavljanja (također postoji vremensko ograničenje zbog trajanja analize jednog uzorka, 7-12 dana).



Slika 3.2.1.1. Prikaz HYPROP sustava za mjerenje hidrauličkih parametara tla na temelju evaporacijske metode

Izvor: Haghverdi i sur., 2020.

Masa i vodni potencijal mjereni su u vremenskim intervalima od 30 minuta. Hidraulički gradijent izračunat je na temelju potencijala tijekom vremenskog perioda mjerenja. Tok vode dobiven je iz razlika težine tla odnosno razlika volumena vode u tlu. Pojedine točke retencijske krivulje su automatski, putem HYPROP-FIT programa, izračunate na temelju gubitka vode po volumenu uzorka u određenom vremenu i povezane sa srednjim vrijednostima vodnog potencijala tla u uzorku (Schindler i Müller, 2017.).

Mjerenje hidrauličke provodljivosti tla pri saturiranim uvjetima je provedeno pomoću KSAT uređaja (Slika 3.2.1.2.). Mjerenja se baziraju na Darcyjevoj jednadžbi (Darcy, 1856.) koja govori da je brzina kretanja vode kroz tlo proporcionalna hidrauličkom gradijentu i koeficijentu propusnosti (Hadas, 1964.):

$$Ks = -(L \times V) / H \times A \times t \quad (1)$$

gdje je:

$L$  visina uzorka tla [L]

$H$  visina stupca vode u bireti (koja iznosi 5 cm po mjerenju) [L]

$A$  površina uzorka [L<sup>2</sup>]

$V$  volumna količina vode [L<sup>3</sup>]

$t$  vrijeme [T]





Slika 3.2.1.2. KSAT uređaj za mjerenje hidrauličke vodljivosti u saturiranim uvjetima  
Izvor: <https://www.metergroup.com/environment/products/ksat-saturated-hydraulic-conductivity/>

Retencijskim krivuljama tla određuje se odnos između relativne količine vode u tlu (masa vode u tlu / masa osušenog tla) i vodnog potencijala  $h$ . Van Genuchten-Mualemovim modelom opisuju se hidraulički parametri tla (van Genuchten, 1980.):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \text{ za } h < 0 \quad (2)$$

$$\theta(h) = \theta_s \text{ za } h \geq 0 \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}; n > 1 \quad (6)$$

$\vartheta(h)$  relativna količina vode u tlu [ $L^3 L^{-3}$ ]

$\vartheta_s$  količina vode u tlu pri uvjetima potpune saturacije [ $L^3 L^{-3}$ ]

$\vartheta_r$  rezidualna količina vode u tlu [ $L^3 L^{-3}$ ]

$K(h)$  hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [ $L T^{-1}$ ]

$h$  vodni potencijal tla [L]

$\vartheta$  volumna količina vode u tlu

$S_e$  efektivna saturacija tla

$K_s$  koeficijent hidrauličke provodljivosti tla u saturiranim uvjetima [ $L T^{-1}$ ]

- $m$  koeficijent optimizacije  
 $\alpha$  inverzna vrijednost svih pora ispunjenih zrakom [ $L^{-1}$ ]  
 $n$  indeks raspodjele veličine pora  
 $l$  faktor povezanosti pora (0,5 – preporučena vrijednost)

\*  $M$  – mass (korištene jedinice mmol za nitrate i  $\mu\text{g}$  za izopruron),  $L$  – length (cm),  $T$  – time (dani)

Pomoću HYPROP uređaja određuje se količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije, odnosno  $\vartheta_s$ , zajedno s rezidualnom količinom vode -  $\vartheta_r$ . Saturirana hidraulička provodljivost određuje se pomoću KSAT uređaja, koji se bazira na Darcyjevoj jednadžbi, a empirijski parametri  $\alpha$  i  $n$  dobiveni su nakon kalibracije modela. Optimizacija hidrauličke vodljivosti temelji se  $\vartheta_s$ ,  $\vartheta_r$  i  $n$  vrijednostima, skupa s  $K_s$  i  $l$ , odnosno faktorom povezanosti pora koji je u svim tlima bio isti – 0,5 (Mualem, 1976.).

### 3.3. Numeričko modeliranje toka vode primjenom HYDRUS-1D modela

HYPROP i KSAT uređajima utvrđuju su hidraulički parametri u uzorcima tla, odnosno hidraulička provodljivost i određeni empirijski parametri (inverzna vrijednost veličine pora i indeks raspodjele veličina pora). Na temelju dobivenih podataka, koji se unose u HYDRUS program, vrši se modeliranje kretanja vode i tvari. Za potrebe ovog istraživanja, modeliranje toka vode u nesaturiranoj zoni provedeno je programom HYDRUS 1D. Program rješava tok vode numerički pomoću Richardsove jednadžbe (Richards, 1931.) za saturirani i nesaturirani tok vode.

Simuliranje toka vode u jednodimezionalnoj ravnini opisano je *Richardsovom jednadžbom za Darcyjev tok vode u (ne)saturiranom poroznom mediju*:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} - S(h) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (8)$$

- $\theta$  količina vode u tlu [ $L^3 L^{-3}$ ]  
 $h$  vodni potencijal tla [L]  
 $Z$  vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore) [L]

$K$	hidraulička provodljivost nesaturiranog tla [ $L T^{-1}$ ]
$t$	vrijeme [T]
$S$	voda koju biljka usvaja [ $T^{-1}$ ]

Dakle, HYDRUS-1D je softver koji simulira jednodimenzionalno kretanje vode, topline i različitih tvari u varijabilno saturiranom mediju (Šimunek i van Genuchten, 2006.). HYDRUS model koristi hidrauličke funkcije tla po van Genuchtenu (1980.) i Mualemu (1976.) da bi opisao retencijske krivulje tla –  $\theta(h)$  i hidrauličku propusnost nesaturiranog tla –  $K(\theta)$ .

Granični uvjeti modela su postavljeni kao atmosferski na vrhu i slobodno procjeđivanje na dnu profila. Kao inicijalni uvjeti su korišteni podaci sa senzora. Simuliran je tok vode za razdoblje od 305 dana, odnosno od 1. siječnja 2020. do 31. listopada 2020.godine. Uključeno je i usvajanje vode korijenom te je za parametre kulture postavljena trava (pašnjak) u HYDRUS 1D modelu.

### 3.3.1. Inverzno modeliranje

Optimizacija parametara je indirektni pristup za procjenu hidrauličkih parametara tla i/ili parametara transporta tvari iz podataka toka ili transporta tvari. Inverzne metode se obično temelje na minimizaciji prikladne objektivne funkcije, koja odražava odstupanja između promatranih vrijednosti i predviđenog odgovora sustava. Odgovor sustava predstavlja numeričko rješenje jednadžbe toka uzimajući u obzir hidrauličke funkcije, odabrane transportne parametre i odgovarajuće inicijalne i granične uvjete. Početne procjene optimiziranih parametara se potom uzastopno poboljšavaju tijekom procesa minimizacije sve dok se ne postigne željeni stupanj preciznosti (Šimunek i sur., 2005.).

Postupak kalibracije korišten nakon početne direktne simulacije podacima dobivenim evaporacijskom metodom. Kalibracija je provedena na osnovu podataka prikupljenih na terenu primjenom Levenberg-Marquardt metode koja se primjenjuje u HYDRUS-1D modelu za optimizaciju različitih parametara van Genuchten jednadžbe te je time osigurana najmanja razlika između mjerenih i simuliranih podataka vlažnosti tla. Pritom, za mjerenje vlažnosti tla na terenu korišteni su TDR senzori.

### 3.4. Senzorna mjerenja uporabom TDR tehnologije

U posljednje vrijeme, sve su učestalija istraživanja koja se posvećuju nesaturiranoj zoni tla, pa je tako primjenom kontinuiranog monitoringa uz dovoljan broj opažanja (senzora) za mjerenje relativne količine vode u tlu i vodnog potencijala, moguće kalibrirati model toka vode istraživanog područja. Ondrašek (2019.) navodi da primarnu komponentu u određivanju toka vode i vodnog režima predstavlja eksperimentalno određivanje hidrauličkih parametara tla temeljem terenskih opažanja (TDR senzori) i laboratorijskih analiza. Razvoj novih tehnologija utjecao je na povećano korištenje numeričkih modela, kako za procjenu onečišćenja podzemnih voda uzrokovanog poljoprivrednom proizvodnjom (Ferré i Topp, 2002.; Ondrašek 2019.), tako i za izradu modela toka vode u tlu. Uspjeh ili neuspjeh tijekom istraživanja ovisi o korištenju analiza podataka kako bi se došlo do pravih zaključaka. Nažalost, većina vremena se potroši na prikupljanje podataka, nego na analiziranje. Stoga se razvila potreba za zapisnikom podataka (logger) kojima se može smanjiti vrijeme utrošeno na samo prikupljanje podataka te se stoga razvio ZENTRA cloud (METER group, 2018.).

Za potrebe istraživanja korištena je TDR tehnologija, točnije korišteni su senzori TEROS 10 za mjerenje sadržaja vode u tlu i TEROS 21 za mjerenje vodnog potencijala (poglavlje 3.4.1.) koji su bili spojeni na ZENTRA cloud sustav (poglavlje 3.4.2.).

#### 3.4.1. TEROS senzori

*Teros 10* je poboljšana verzija osnovnih, klasičnih senzora vlage (Slika 3.4.1.1.1.). Primjenjuje se u mjerenju volumetrijskog sadržaja vode, mjerenju kapaciteta tla za vodu te za potrebe navodnjavanja koristeći nehrđajuće čelične igle. Osnovna jezgra postavljena je na senzorski kabel 7,7 cm udaljena od glave senzora te se upotrebljava za izoliranje senzora od bilo kakvih interferencija u sustavu. Frekvencija od 70 MHz minimalizira utjecaj saliniteta i teksture tla čineći senzor točnim tijekom primjene u većini tala ili drugih medija. Senzor podnosi najteže uvjete na terenu što osigurava sigurnost mjerenja. Omogućuje karakterizaciju na više dubina i lokacija, a pritom imaju i nisku potrošnju energije i visoku rezoluciju. Napravljen je da traje duže na terenu na kojem prevladavaju teži uvjeti. Idealan je za velike mreže senzora, osjetljiv je na male promjene volumetrijskog sadržaja vode u cijelom rasponu sadržaja vode tla i supstrata. Može se koristiti u gotovo svim tlima – od suhih pustinskih tala pa sve do vrlo vlažnih tresetnih tala. Senzori eliminiraju probleme koji uzrokuju interferencije kao što su preferencijalni tok i zrak u porama (METER group, 2018.a.).

Senzor je postavljen na istraživanim lokacijama (Mala Mlaka, Odra, Petruševac) u razdoblju od 1. siječnja 2020. do 31. listopada 2020. godine te su senzori postavljeni na dubinu od 30 cm.



Slika 3.4.1.1.1. TEROS 10 senzor

Izvor: <https://www.metergroup.com/environment/products/teros-10/>

*Teros 21* senzor mjeri vodni potencijal i temperaturu pomoću poroznih keramičkih pločica (Slika 3.4.1.1.2.). Senzor mjeri dielektričnu permitivnost čvrstog matriksa (poroznih keramičkih pločica) kako bi odredio vodni potencijal. Dielektrična permitivnost ovisna je o količini vode koja se nalazi u porama. Senzor ima nisku potrošnju energije stoga je idealan za trajno postavljanje u tlo i neprekidno očitavanje podataka. Kako bi se postigla točna mjerenja, *Teros 21* senzor mora imati dobar hidraulički kontakt s okolnim tlom. Senzor radi na principu mjerenja sadržaja vode pomoću pločica te izmjereni sadržaj vode pretvara u vodni potencijal, stoga je vrlo važno da se keramičke pločice isušuju pri širokom rasponu vodnog potencijala te da se veličina pora kreće od vrlo sitnih do krupnih. Veličina pora određuje vodni potencijal pri kojem se pore isušuju. Na kalibraciju senzora ne utječe tip tla jer senzori mjere samo vodni potencijal keramičkih pločica koje su u ravnoteži s tlom. Senzor radi u bilo kojem tipu tla ili drugom mediju ukoliko je ispravno ugrađen (METER Group, 2017.)

Za mjerenje temperature, senzor koristi površinu termorezistora. Ako je crno plastično tijelo izloženom solarnom zračenju, očitavanje temperature može biti visoko. Izlaganje plastičnog tijela dovodi do drastičnog smanjenja vijeka trajanja senzora, stoga je vrlo važno instalirati senzor unutar tla (METER Group, 2017.).

Mjerenje vodnog potencijala izvršeno je u razdoblju od 305 dana (1. siječnja 2020. – 1. listopada 2020.) na istraživanim lokacijama pri čemu su senzori postavljeni na dubinu od 50 cm.

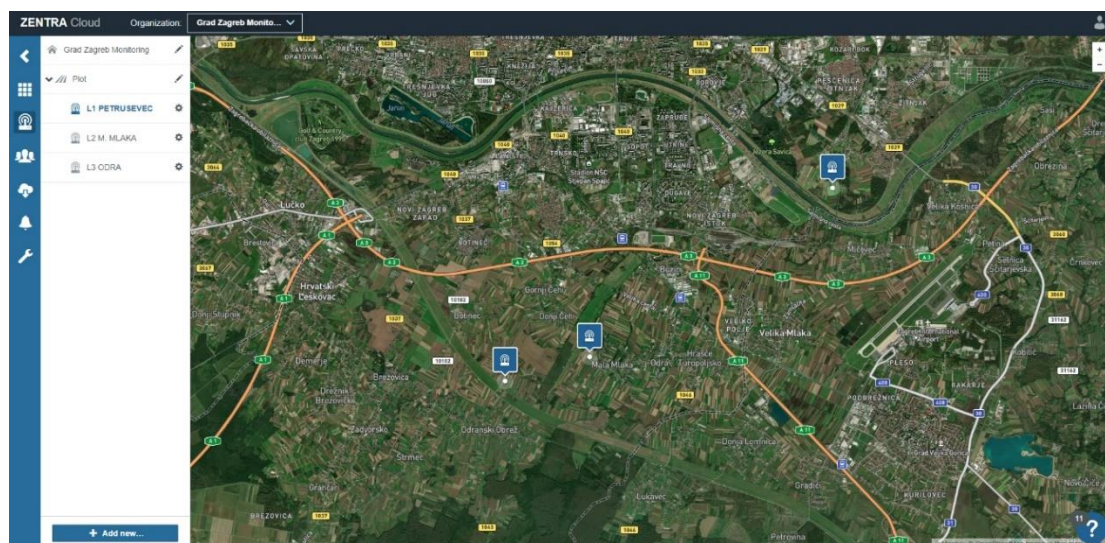


Slika 3.4.1.1.2. TEROS 21 senzor

Izvor: <https://ictinternational.com/products/mps-6/teros-21-water-potential-sensor/>

### 3.4.1.2. ZENTRA Cloud

ZL6 logger / zapisnik podataka je dio ZENTRA sustava (Slika 3.4.1.3.1.), zbirke zapisnika podataka, softvera i kompatibilnih senzora za precizno i ekonomično mjerenje parametara okoliša. Na slici 3.4.1.3.2. prikazan je ZL6 koji koristi ZENTRA cloud kako bi se dobili podaci u kratkom vremenu, na bilo kojem mjestu. Prethodno navedeno dovodi do toga da istraživači troše manje vremena na preuzimanje podataka na terenu, a više na samo istraživanje. Pristup podacima na ZENTRA cloudu ubrzava samu analizu tako što omogućuje korelaciju različitih faktora, prikaz različitih trendova ili otkriti probleme u kratkom roku. Podaci se mogu vrlo lako distribuirati i podijeliti te su dostupni na USB, mogu se slati e-mailom ili dijeliti podatke preko clouda. ZL6 spaja se na šest različitih METER senzora kojima se mogu pratiti različiti parametri u isto vrijeme poput vremena, vlažnosti tla i potencijala. Uređaj je robustan i ne zahtijeva posebno održavanje (METER group, 2018.b.).



Slika 3.4.1.3.1. Prikaz ZENTRA cloud sustava s označenim lokacijama istraživanja: Petruševac, Mala Mlaka, Odra



Slika 3.4.1.3.2. ZL6 na istraživanom području na lokaciji Petruševac

### 3.5. Statistička analiza

Mjera evaluacije kvalitete kalibriranog modela izražava se u obliku *RMSE* pogreške (eng. *root mean square error*). *RMSE* predstavlja srednju devijaciju između modela i podataka. Pogreška modela vodne retencije (*RMSE\_TH*) izračunata je odvojeno od pogreške za model hidrauličke provodljivosti (*RMSE\_K*), kao što je vidljivo u tablici 4.1.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r [y_i - \hat{y}_i]^2} \quad (10)$$

$y_i$         izmjerena vrijednost

$\hat{y}_i$         predviđena vrijednost modela

*Koeficijent determinacije*  $R^2$  izražava jačinu linearne povezanosti između dva faktora, tj. koliko će promjena jednog faktora utjecati na promjenu drugog, a izračunava se kvadratom koeficijenta korelacije.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^r [y_i - \bar{y}_i][\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i]}{\sqrt{\sum_1^r [y_i - \bar{y}_i]^2 [\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i]^2}} \quad (11)$$

## 4. Rezultati i rasprava

### 4.1. Rezultati određivanja hidrauličkih karakteristika tla

Hidraulička funkcija tla je sposobnost tla da infiltrira i zadrži vodu kako bi se osigurala dovoljna vlažnost koja održava mikrobiološki sustav u tlu. Matematički prikazano, hidraulička funkcija tla obično se opisuje vrijednostima hidrauličkih parametara, kao što su hidraulička provodljivost i retencija vode u tlu (Robinson i sur., 2019.).

Na temelju podataka vodnog potencijala, sadržaja i toka vode određene su funkcije retencije vode i hidrauličke provodljivosti mjerenih uzoraka tla na istraživanim lokacijama. Krivulje projicirane na osnovu izmjerenih vrijednosti vodnog potencijala i sadržaja vode u tlu baziraju se na van Genuchten-Mualemovom modelu (van Genuchten, 1980.). (Slika 4.1.1., Slika 4.1.2.). Model prikazuje promjenu sadržaja vode u kontinuitetu, od potpune saturacije (zasićenja)  $\theta_s$ , pa sve do najmanjih vrijednosti, ili  $\theta_r$ , tj. rezidualnog sadržaja vode u tlu. Pri karakterističnim vodnim potencijalima povezanim s velikim porama u poroznom mediju, odnosno u tlu, odvija se prijelaz iz potpunog do parcijalnog zasićenja. Veličina pora ovisi o strukturi i teksturi tla (Sraka, 2016.). Retencijske (Slika 4.1.1.) hidrauličke (Slika 4.1.2., Slika 4.1.3.) krivulje dobivene su HYPROP-FIT programom. Primjena ove metode uvjetuje potpunu saturaciju uzoraka tla i sušenje evaporacijskom metodom (Schindler i sur., 2017).

Crna linija na prikazanim grafovima (Slika 4.1.1., Slika 4.1.2., Slika 4.1.3.) predstavlja krivulje koje su projicirane na osnovu izmjerenih vrijednosti sadržaja vode i vodnog potencijala u tlu na istraživanim lokacijama te se temelje na van Genuchten-Mualemovom modelu. Linija prikazuje kontinuiranu promjenu sadržaja vode od potpunog zasićenja ( $\theta_s$ ) do rezidualnog sadržaja vode u tlu ( $\theta_r$ ). Pri određenim vodnim potencijalima koji su povezani s velikim porama u poroznom mediju, odvija se prijelaz iz potpunog zasićenja do parcijalnog zasićenja. Crveni, plavi i zeleni krugovi predstavljaju neporušene uzorke tla koji su uzeti na dvije dubine unutar soluma tla te u dva ponavljanja.

Raspon vrijednosti količine vode ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) u tlu pri uvjetima potpune saturacije ( $\theta_s$ ) na istraživanom području varirao je od 0,401  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Petruševac) do 0,446  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Odra). Varijabilnost  $\theta_s$  ovisi o fizikalnim i kemijskim svojstvima tla koje se međusobno razlikuju te zbog svojih karakteristika tlo različito zadržava vodu pri različitim tlakovima, no na istraživanim lokacijama ne može se uočiti značajna razlika u vrijednostima pri potpunoj saturaciji ( $\theta_s$ ).

RMSE\_TH vrijednosti manje od 0,01 ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) i RMSE\_K manje od 1 ( $\text{cm dan}^{-1}$ ) ukazuju na primjenjivost van Genuchten-Mualemovog modela za sve uzorke sa područja istraživanja te

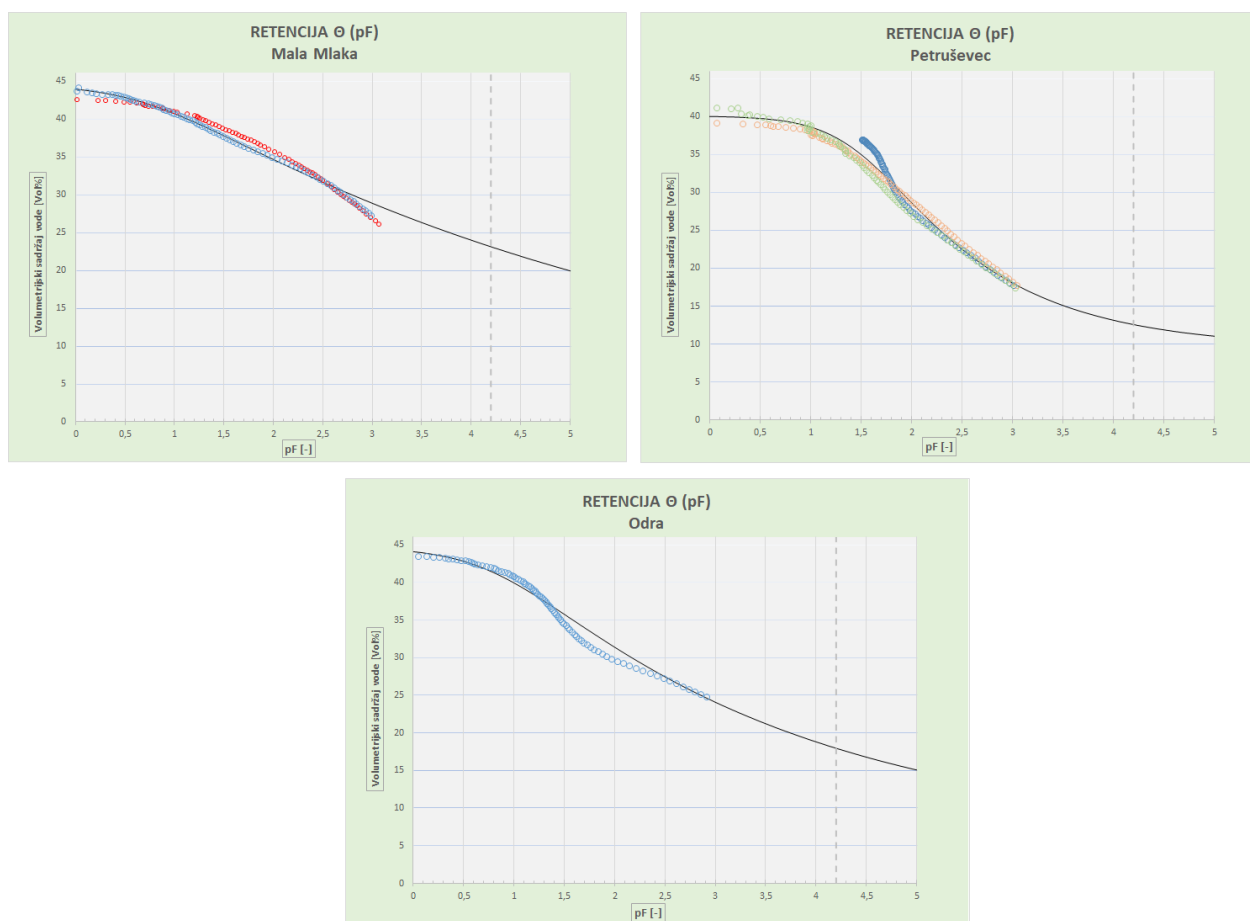


kod procjene hidrauličkih parametara ukazuju na visoku pouzdanost metode (Schelle i sur., 2013., Tablica 4.1.1.).

Tablica 4.1.1. Hidrauličke karakteristike tla istraživanog područja određene HYPROP- FIT programom

Lokacije	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ (-)	n	$K_s$ ( $\text{cm d}^{-1}$ )	l=tau	RMSE_TH	RMSE_K	$R^2$ Retencija	$R^2$ Hidraulička provodljivost
Petruševac	0,095	0,401	0,031	1,371	15,8	-2,126	0,0108	0,1309	0,8905	0,9000
Mala Mlaka	0,000	0,445	0,218	1,080	944,0	-5,096	0,0071	0,3593	0,9418	0,9609
Odra	0,059	0,446	0,161	1,149	473,8	-1,138	0,0088	0,2752	0,9385	0,9461

Odnos između volumetrijskog sadržaja vode ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) i matričnog potencijala (kPa) je funkcija retencije vode (Slika 4.1.1.) koja je postala ključna pri karakterizaciji hidrauličkih karakteristika tla te je značajna u svrhu planiranja i upravljanja navodnjavanjem. Retencijska krivulja ovisna je o raspodjeli i veličini čestica (kojima je određena tekstura tla) te raspored krutih čestica (koja se odnosi na strukturu tla). Osim toga, oblik retencijske krivulje ovisi o organskoj tvari u tlu te sastavu vode u tlu (Moret-Fernandez i sur., 2012.).



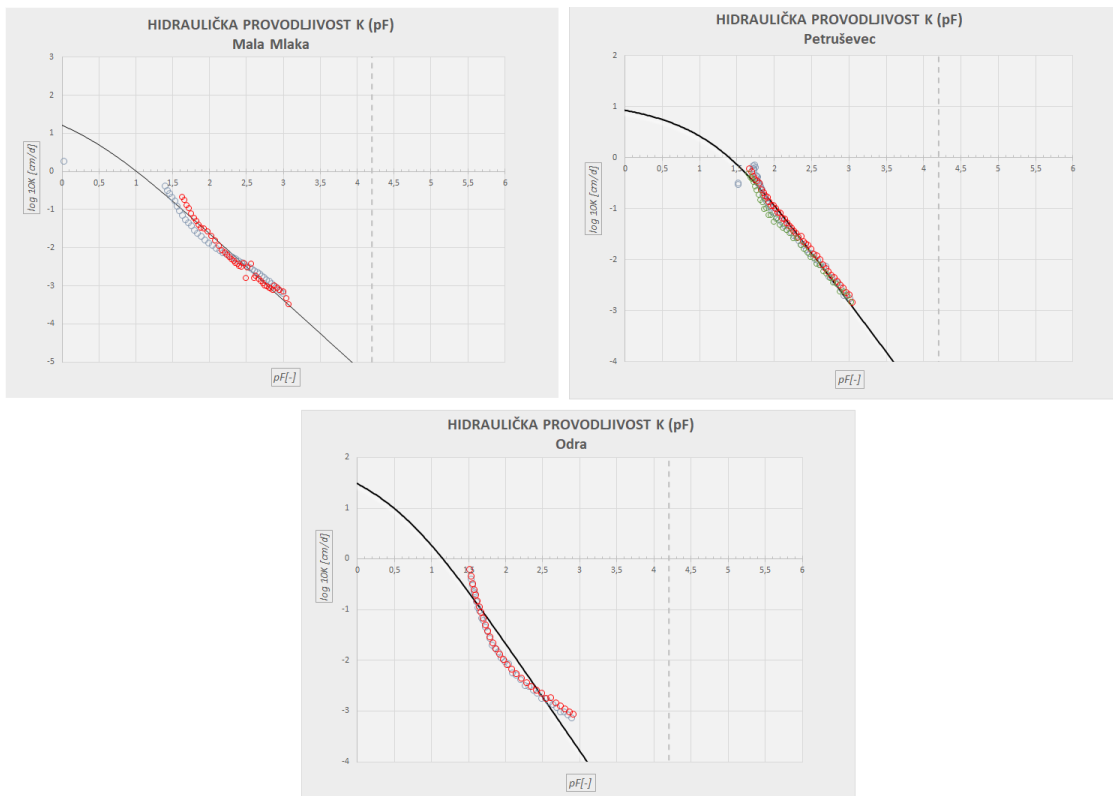
Slika 4.1.1. Prikaz retencijskih krivulja (crna linija) dobivenih HYPROP-FIT programom na istraženim lokacijama za površinski horizont tla i rezultata provedene analize (crveni, plavi i zeleni krugovi)

Hidraulička provodljivost (Slika 4.1.2.) je sposobnost tla da transportira vodu i tvari kroz solum tla te je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Hanks (1992.) navodi da je hidraulička provodljivost jako ovisna o sadržaju vode u tlu. Također, ovisi o teksturi i strukturi tla, a ponajviše ovisi o veličini makropora. Provodljivost je veća u teksturno lakšim tlima (pijesak) u odnosu na teksturno teža tla (glina). Hidraulička krivulja prikazuje ovisnost hidrauličke provodljivosti o sadržaju vode u tlu. Slika 4.1.2. i slika 4.1.3. prikazuju odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu.

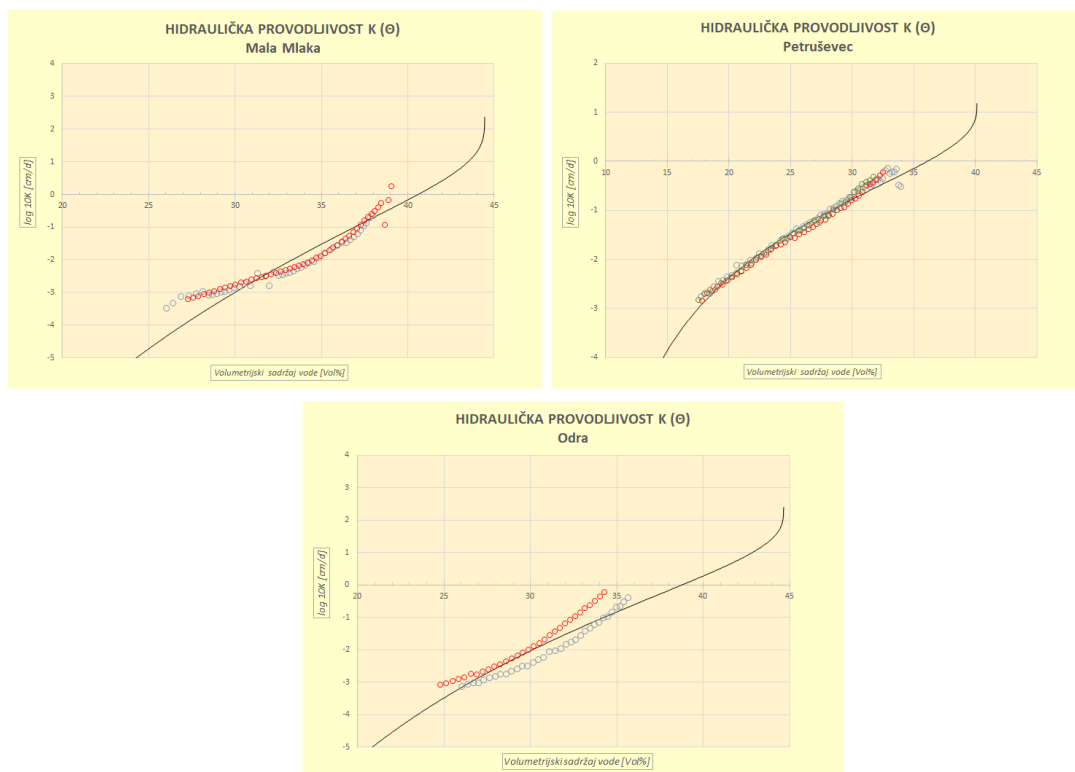
Koeficijent hidrauličke provodljivosti ( $K_s$ ) u mjerenim uzorcima varirao je od 15,8 cm dan<sup>-1</sup> (Petruševac) do 944,0 cm dan<sup>-1</sup> (Mala Mlaka) (Tablica 4.1.1) zbog razlike u fizikalnim i kemijskim svojstvima tla. Iako je na istraživanim lokacijama Mala Mlaka i Petruševac isti tip tla (Tablica 3.1.2.1.), na istraživanoj lokaciji Mala Mlaka, prilikom određivanja sadržaja mehaničkih čestica, utvrđen je veći udio krupnog pijeska (1,2 %) u odnosu na Petruševac (0,6). Udio sitnog pijeska varirao je od 2,2 % (Petruševac) do 15,6 % (Mala Mlaka) u gornjim horizontima istraživanih lokacija. Također, hidraulička provodljivost uvjetovana je i kapacitetom tla za vodu i sadržajem humusa. Na istraživanoj lokaciji Mala Mlaka humoznost tla je slaba u cijelom solumu tla (2,43 %), dok je na ostalim lokacijama tlo dosta humozno u gornjim horizontima (3,44-3,96 %), ali slabo humozno u donjim horizontima (0,78-1,89 %), što je utjecalo na veću hidrauličku provodljivost.

Krivulje prikazuju da povećanje sadržaja vode u tlu dovodi do povećane hidrauličke provodljivosti u mjerenim uzorcima te se time može zaključiti da sadržaj vode u tlu utječe na hidrauličku provodljivost u tlu kao i na transport vode i tvari u tlu.

Na lokaciji istraživanog područja Petruševac  $R^2$  bio je 0,89, a na preostale dvije lokacije (Mala Mlaka i Odra) veći od 0,90, dok je RMSE na svim lokacijama istraživanog područja bio manji od 0,01 što ukazuje na primjenjivost van Genuchten Mualemovog modela na svim istraživanim lokacijama.



Slika 4.1.2. Prikaz krivulja hidrauličke provodljivost  $K(pF)$  (crna linija) dobivenih HYPROP-FIT programom na istraživanim lokacijama za površinski horizont tla i rezultata provedene analize (crveni, plavi i zeleni krugovi)



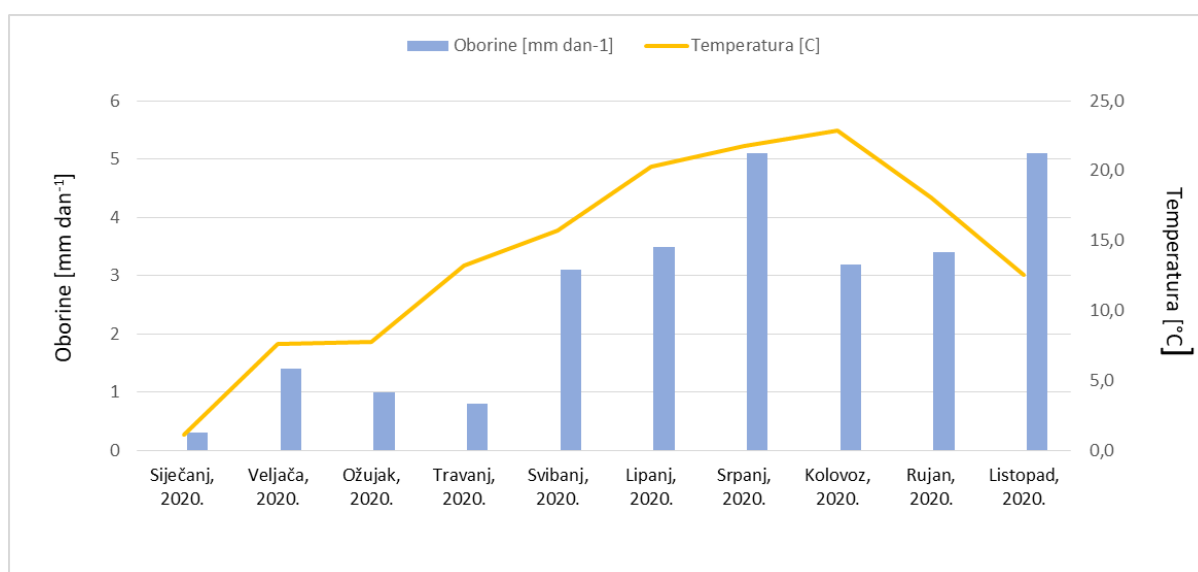
Slika 4.1.3. Prikaz krivulja hidrauličke provodljivosti  $K(\theta)$  (crna linija) dobivenih HYPROP-FIT programom na istraživanim lokacijama i rezultata provedene analize (crveni, plavi i zeleni krugovi)

## 4.2. Klimatski parametri na lokaciji istraživanja

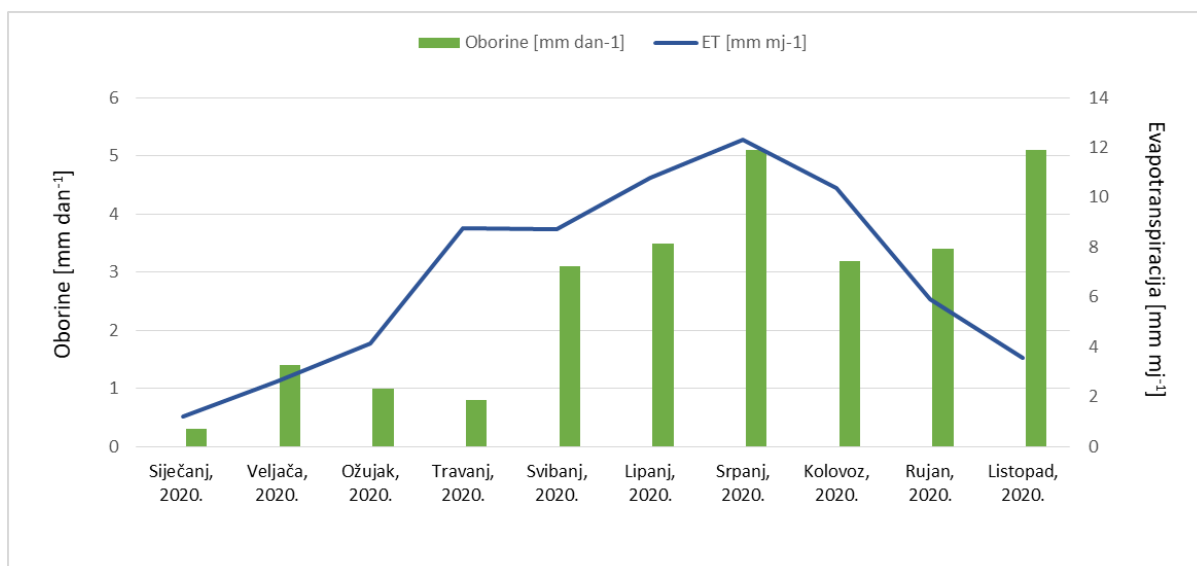
Na istraživanom području vrijednosti klimatskih parametara varirali su u ovisnosti jedni o drugima. Prilog 1. prikazuje srednje mjesečne klimatske parametre na istraživanim lokacijama (Petruševac, Mala Mlaka i Odra) tijekom istraživanog razdoblja. Slika 4.2.1. prikazuje varijacije oborina i temperatura. Promjene evapotranspiracije (ET) s obzirom na oborine prikazane su na slici 4.2.2.. Vrijednost ET u odnosu na temperaturu prikazane su na slici 4.2.3., gdje se jasno može vidjeti da su vrijednosti ET najviše pri visokim temperaturama u ljetnim mjesecima. Evapotranspiracija je izračunata prema Hargreavesovoj formuli (Jensen i sur., 1990.).

Tijekom lipnja 2020. godine, prosječna dnevna količina oborina iznosila je 3,5 mm, a u srpnju je bila nešto veća (5,1 mm) što je utjecalo na povećane vrijednosti ET tijekom ljetnih mjeseci. Tijekom zimskih mjeseci, unatoč povećanim količinama oborina, ne dolazi do povećane ET.

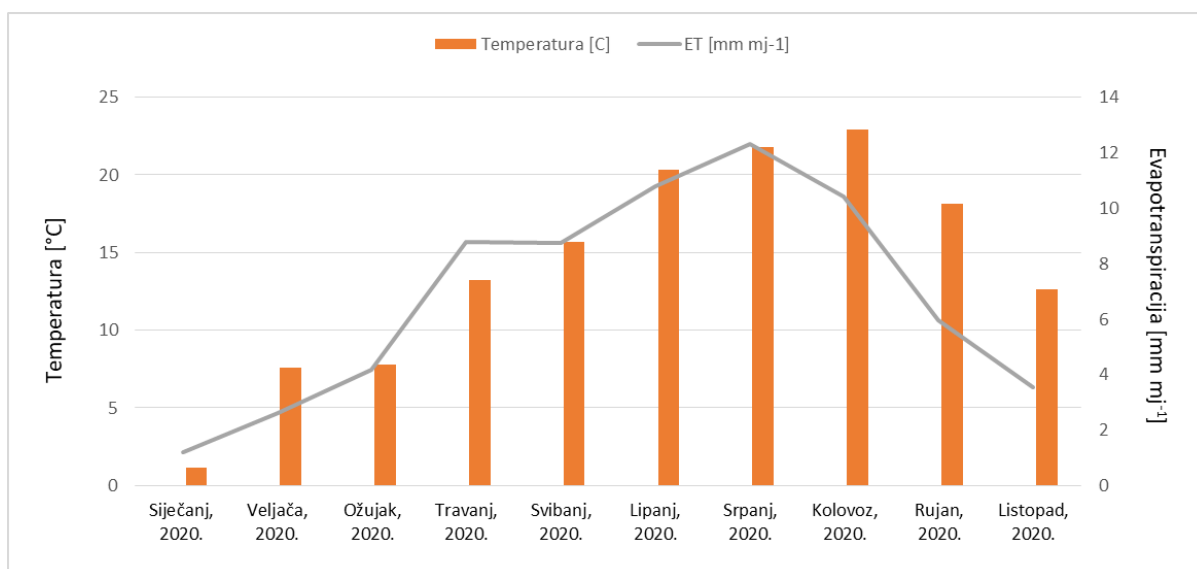
Najniže vrijednosti temperature, oborina i ET bile su u mjesecu siječnju 2020. godine te su iznosile 1,1 °C, 0,3 mm dan<sup>-1</sup> i 1,2 mm mj<sup>-1</sup>. Najveća količina oborina bila je u srpnju i listopadu (5,1 mm dan<sup>-1</sup>), a pritom je u srpnju bila i najviša vrijednost ET (12,21 mm mj<sup>-1</sup>).



Slika 4.2.1. Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja



Slika 4.2.2. Prikaz vrijednosti oborina i evapotranspiracije tijekom istraživanog razdoblja



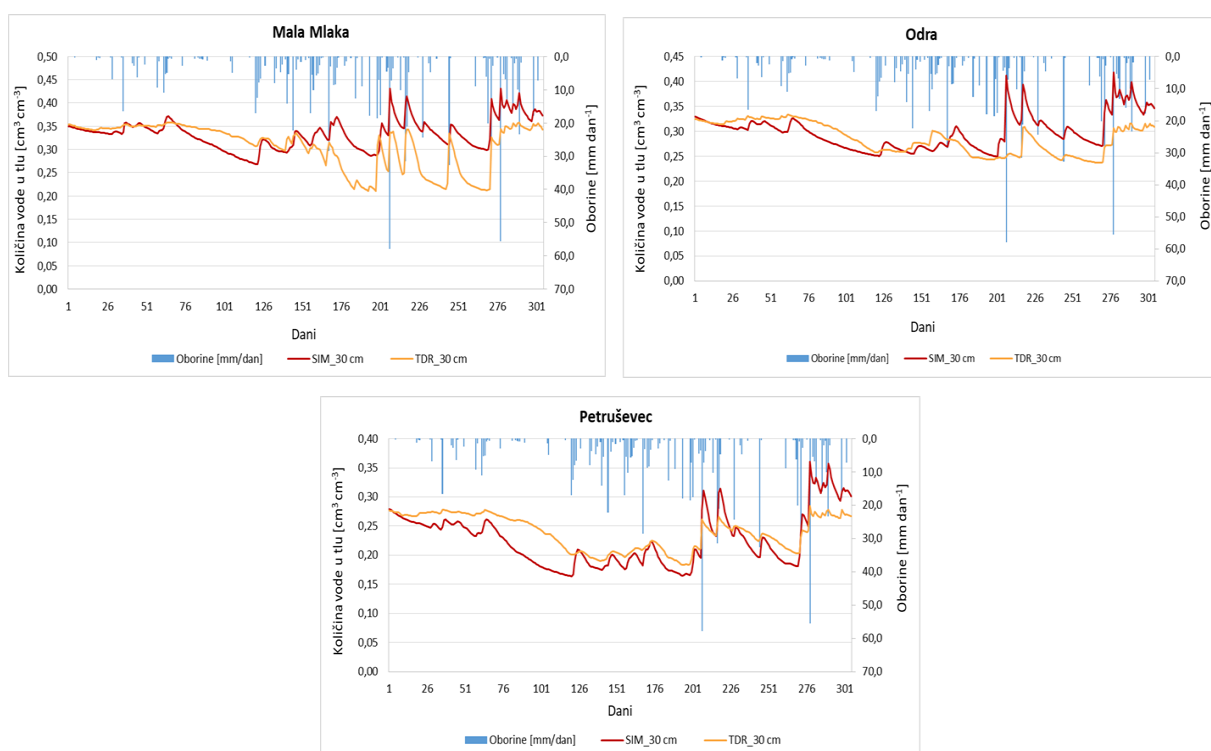
Slika 4.2.3. Prikaz vrijednosti temperature i evapotranspiracije tijekom istraživanog razdoblja

### 4.3. Kalibracija i validacija modela toka vode na temelju TDR senzora

Softverski program HYDRUS-1D korišten je za simuliranje volumne količine vode u tlu ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) i vodnog potencijala (cm) u nesaturiranoj zoni u razdoblju od 305 dana. Program rješava tok vode numerički pomoću Richardsove jednadžbe (Richards, 1931).

Pomoću TDR senzora TEROS 10 (Meter Group, 2018.a.), postavljenog na istraživanim lokacijama na 30 cm dubine, praćena je količina vode u tlu (Slika 4.3.1.). Raspon mjerenja senzora je od 0 % do 57 % volumne količine vode i rezolucijom od  $0,001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Vrijednosti izmjerene količine vode u tlu (Prilog 2.) kretale su se od  $0,269$  do  $0,431 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

(Mala Mlaka), od 0,249 do 0,419  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Odra) te od 0,164 do 0,360  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Petruševac), dok je prosječna vrijednost iznosila 0,335  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , 0,299  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , 0,266  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  na lokacijama istraživanja. Iz prikazanih grafova može se uočiti da su vrijednosti količine vode u tlu bile očekivano najviše nakon oborina. Podaci prikupljeni sensorima na istraživanim lokacijama pokazali su uglavnom niže vrijednosti količine vode u tlu na lokacijama Mala Mlaka i Odra, dok na lokaciji Petruševac podaci prikupljeni sensorima ukazuju na značajno više vrijednosti količine vode u tlu u odnosu na rezultate dobivene simulacijom (SIM). Podudarnost mjerenjih i simuliranih rezultata jasno je prikazana vrijednošću koeficijenta determinacije  $R^2$ . Dobivene vrijednosti ukazuju na slabu podudarnost mjerenjih i simuliranih rezultata na lokacijama Mala Mlaka ( $R^2 = 0,14$ ) i Odra ( $R^2 = 0,18$ ), dok je na istraživanoj lokaciji Petruševac dobra podudarnost ( $R^2 = 0,62$ ).



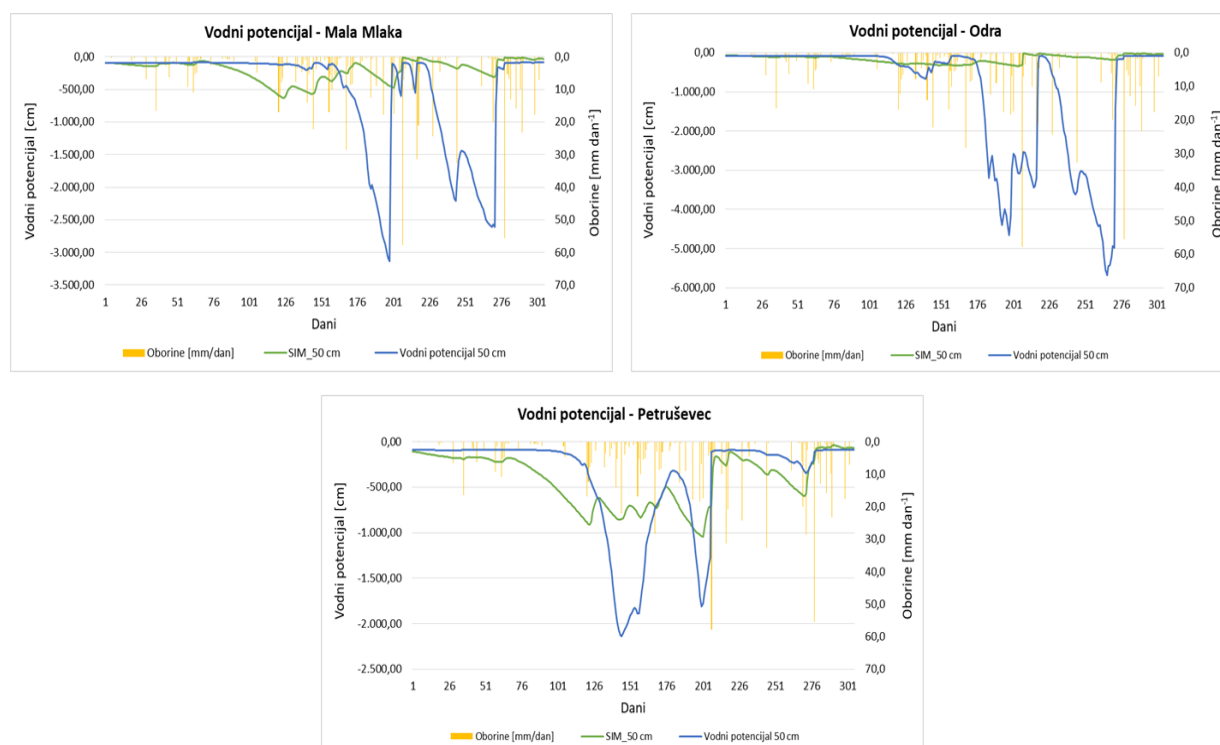
Slika 4.3.1. Prikaz dinamike količine vode u tlu mjerene TEROS 10 senzorom na istraživanom području na 30 cm dubine

Provedeno je novije istraživanje (Er-Raki i sur.,2021.) u kojem je cilj bio procijeniti sposobnost HYDRUS-1D modela za procjenu vlažnosti tla pri različitim dubinama, stvarne evapotranspiracije usjeva i njihovih komponenti (transpiracija usjeva, evapotranspiracija tla) kao i perkolacija kod navodnjavane zimske pšenice pri različitim vodnim uvjetima u Maroku.

Vodni potencijal tla (eng. *pressure head*) je kemijski potencijal vode. Hillel (2004.) ga je definirao kao potencijalnu energiju po jedinici volumena vode u uzorku tla. Predstavlja zbroj matričnog (potencijal čvrste faze tla – vezan za adsorpcijske i kapilarne sile u tlu), osmotskog (utjecaj koncentracije otopljenih tvari na vodni potencijal), gravitacijskog, tlačnog i

potencijala preopterećenosti zbog bubrenja koloida (Hillel, 1982; Sraka, 2016). Vodni potencijal tla pozitivan je ispod, a negativan iznad razine vodnog lica. Negativni predznak označuje tlak manji od atmosferskog te se javlja u nesaturiranim uvjetima.

Mjerenje vodnog potencijala na istraživanim lokacijama izvršeno je pomoću TEROS 21 senzora (METER Group, 2017.) s rasponom mjerenja od -9 do 2 000 KPa ( pF 1,96 – 4,319) te je postavljen na dubinu od 50 cm. Pomoću HYDRUS 1D simulirana je distribucija vodnog potencijala u tlu (Slika 4.3.2.). Tijekom vlažnog dijela godine, simulacija se pokazala uspješnom, no nije uspješna za dio godine sa smanjenom količinom oborina. Vrijednosti izmjenjenog vodnog potencijala u tlu (Prilog 3.) varirale su na istraživanoj lokaciji Mala Mlaka od -2.08 do -633.24 cm, Odra od -7,05 do -335,99 cm te na lokaciji Petruševac od -35,61 do -1 042,11 cm. Podaci prikupljeni sensorima na istraživanim lokacijama pokazali su značajno variranje vrijednosti vodnog potencijala na lokacijama Mala Mlaka i Odra u odnosu na podatke dobivene simulacijom. Podaci prikupljeni sensorima na lokaciji Petruševac ukazuju na povećane vrijednosti vodnog potencijala tijekom simulacija u odnosu na prethodne dvije lokacije. Podudarnost mjerenih i simuliranih rezultata prikazana je vrijednošću koeficijenta determinacije  $R^2$  koji iznosi 0,12 (Mala Mlaka), 0,02 (Odra) te 0,53 (Petruševac). Dobiveni rezultati ukazuju na nepodudarnost dobivenih i simuliranih rezultata na istraživanoj lokaciji Odra te na slabu podudarnost rezultata na lokaciji Mala Mlaka. Međutim, vrijednost  $R^2$  na istraživanoj lokaciji Petruševac ukazuje na dobru podudarnost ( $R^2 = 0,53$ ) mjerenih i simuliranih rezultata.



Slika 4.3.2. Prikaz dinamike vodnog potencijala tla mjerene TEROS 21 senzorem na istraživanim lokacijama na 50 cm dubine

#### 4.4. Rezultati inverznog modeliranja toka vode

HYDRUS-1D model optimiziran je tako da može biti uspješno pokrenut i u inverznom načinu, u svrhu kalibracije modela i određivanjem hidrauličkih parametara tla. Kako bi odredili hidrauličke karakteristike tla metodom inverznog modeliranja, korišteni su podaci dobiveni mjerenjem pomoću KSAT uređaja i HYPROP sustava. Numeričko rješenje Richardove jednadžbe, u kombinaciji s Levenberg-Marquardt nelinearnom minimizacijskom metodom, uvršteno je u HYDRUS-1D model.

Inverzno rješenje hidrauličkih parametara tla je dobiveno kombinacijom ukupne infiltracije i promatranog početnog/konačnog sadržaja vode nakon minimizacije svih mogućih varijanata. Nakon inverznog modeliranja i određivanja hidrauličkih parametara tla, direktna simulacija je provedena pomoću HYDRUS 1D programa u razdoblju od 60 dana. Prilikom simulacija korišteni su parametri dobiveni inverznim modeliranjem. Inverzno modeliranje temeljeno je na kalibraciji podataka iz TDR senzora kako bi se dodatno optimizirali hidraulički parametri ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $K_s$ ,  $\theta_s$ ) i dobila bolja pouzdanost modela. Također, tijekom inverznog modeliranja parametar povezanosti pora  $l$  je postavljen na 0,5 prema Mualem i sur. (1976.) kako bi izbjegli optimiziranje velikog broja parametara. Iz navedenih statističkih podataka (Tablica 4.4.1.) uočeno je da je, primjenom inverzne optimizacije hidrauličkih parametara pomoću HYDRUS-1D modela, postignut vrlo visok koeficijent determinacije ( $R^2$ ) što ukazuje na primjenjivost modela.

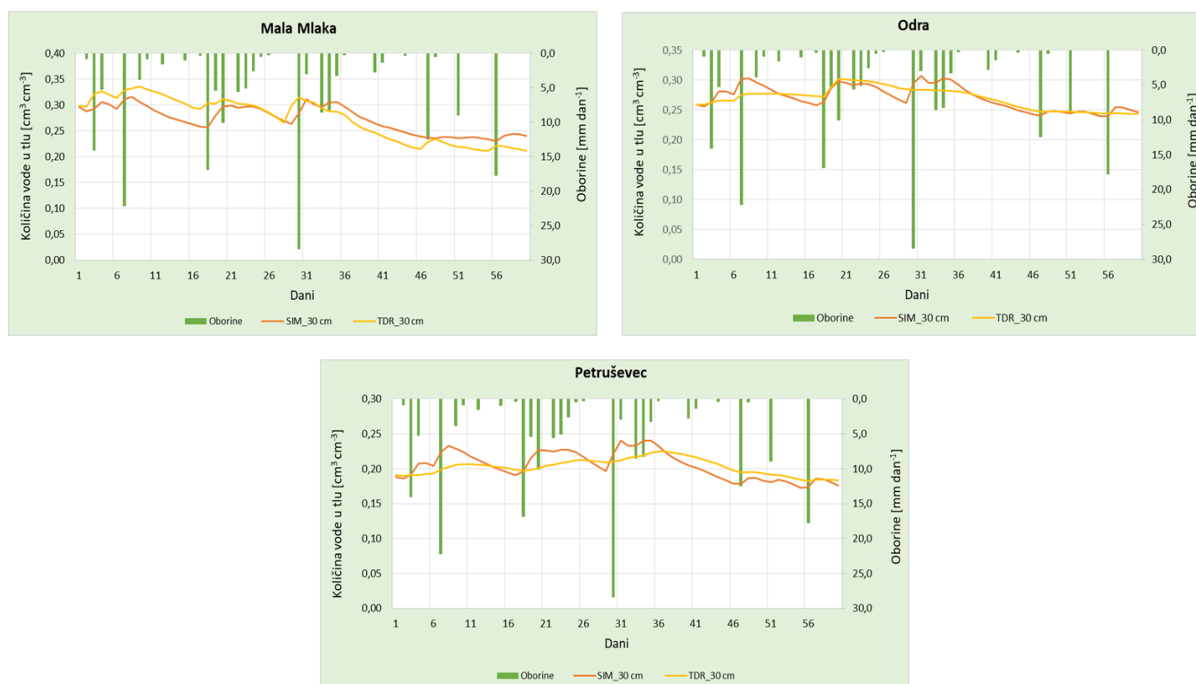
Tablica 4.4.1. Hidraulički parametri istraživanih lokacija dobiveni inverznom metodom HYDRUS-1D modela

Lokacije	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ (-)	$n$	$K_s$ ( $\text{cm d}^{-1}$ )	$l=\tau$	RMSE_TH	RMSE_K	$R^2$ Retencija	$R^2$ Hidraulička provodljivost
Petruševac	0	0,355	0,01	1,99	5,83	0,5	0,0108	0,1309	0,8905	0,9
Mala Mlaka	0	0,5	0,219	1,27	1023	0,5	0,0071	0,3593	0,9418	0,9609
Odra	0,059	0,498	0,141	1,32	1167	0,5	0,0088	0,2752	0,9385	0,9461

Slika 4.4.1. prikazuje kako simulirani sadržaj vode, pri dubini od 30 cm, pozitivno korelira s količinom oborina te također odražava povećan sadržaj vode u tlu nakon oborina. Razinu oscilacija izravno vežemo s procijenjenim hidrauličkim karakteristikama. U navedenom primjeru je vidljivo kako promjena hidrauličkih karakteristika tla ( $\alpha$ ,  $n$  i  $K_s$ ) može utjecati promjenu retencijskih karakteristika tla za vodu. Vrijednosti količine vode u tlu na istraživanim lokacijama varirale su od 0,231 do 0,316  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Mala Mlaka), od 0,240 do 0,302  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Odra) te od 0,173 do 0,431  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Petruševac). Podudarnost mjerenih i



simuliranih rezultata prikazana je vrijednošću koeficijenta determinacije  $R^2$  koji iznosi 0,77 (Mala Mlaka), 0,71 (Odra) te 0,52 (Petruševac) što ukazuje na dobru podudarnost mjerenih i simuliranih rezultata na istraživanim lokacijama (Prilog 4.).



Slika 4.4.1. Dinamika količine vode u tlu (na 30 cm dubine) dobivena inverznim modeliranjem na istraživanim lokacijama

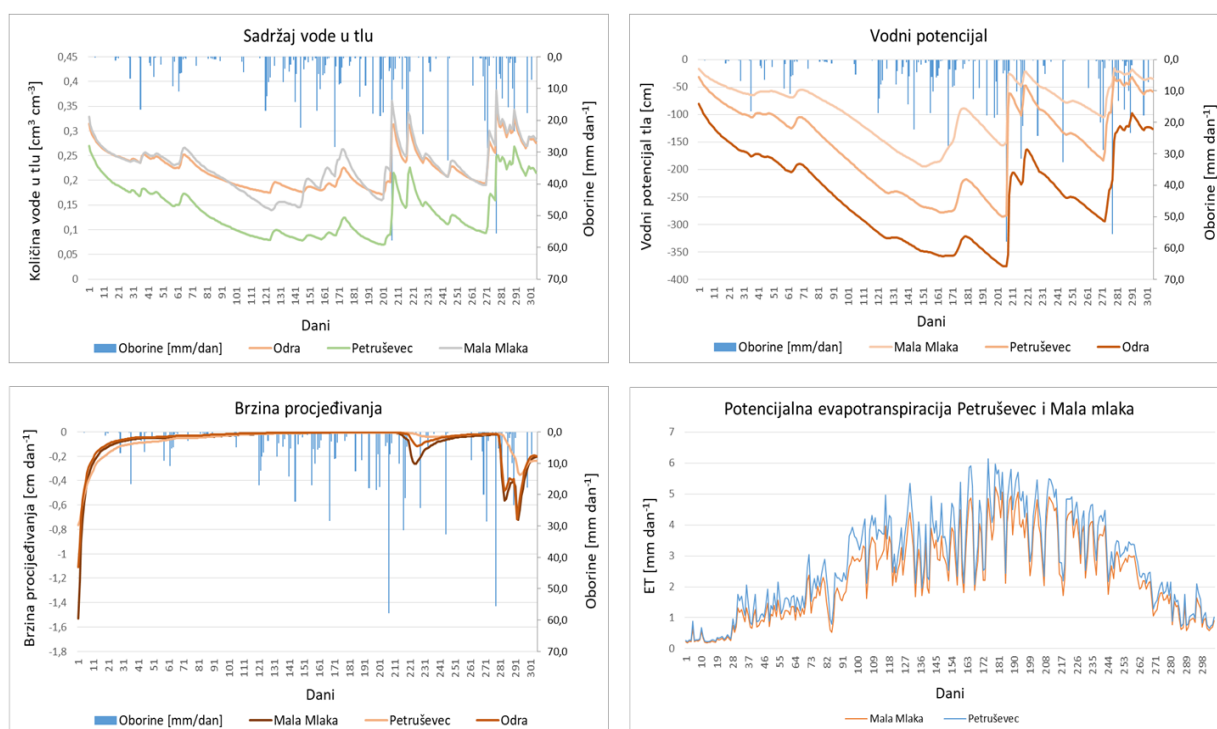
Slične rezultate su dobili i drugi istraživači. Er-Raki i sur. (2021.) ukazali su na sposobnost HYDRUS-1D modela da uspješno simulira količinu vode u tlu pri različitim dubinama te je  $R^2$  na lokacijama iznosio 0,58, 0,65, 0,85 i 0,87. Također, u nekim istraživanjima je bila potrebna dodatna optimizacija hidrauličkih parametara kako bi se uspješno validirao model. Kirkham i sur. (2019.) koristili su inverzne parametre, dobivene HYDRUS-1D programom, kako bi odredili hidraulička svojstva tla u profilima u vodoravnim kolonama te su primjenili parametre za potrebe predviđanja toka vode iz točkastog izvora. Rezultati istraživanja ukazali su da se pouzdani optimizirani parametri mogu dobiti iz HYDRUS-1D programa te da izvedeni parametri mogu točno opisati difuzno kretanje vode.

#### 4.4.1. Usporedba simulacija toka vode istraživanih lokacija primjenom inverzno dobivenih vrijednosti hidrauličkih parametara tla

Slika 4.4.1.1. prikazuje usporedbe rezultata količine vode, vodnog potencijala, brzine procjeđivanja te potencijalne evapotranspiracije istraživanih lokacija dobivenih kalibracijom modela pomoću HYDRUS-1D modela, odnosno upotrebom inverznih hidrauličkih parametara. Podaci količine vode u tlu (Prilog 5.) ukazuju da je najniža prosječna vrijednost uočena na istraživanoj lokaciji Petruševac ( $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), dok su na ostalim istraživanim

lokacijama iznosile  $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , odnosno vrijednosti su varirale od  $0,07$  do  $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  na lokaciji Petruševac,  $0,14$  do  $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  na lokaciji Mala Mlaka, a na lokaciji Odra vrijednosti su varirale od  $0,17$  do  $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Nadalje, prosječne vrijednosti vodnog potencijala na istraživanim lokacijama (Prilog 5.) značajno se međusobno razlikuju te su iznosile  $-242,69 \text{ cm}$  (Petruševac),  $-88 \text{ cm}$  (Mala Mlaka) te  $-152,35 \text{ cm}$  (Odra). Raspon vrijednosti brzine procjeđivanja (Prilog 5.) na lokacijama Mala Mlaka, Odra i Petruševac iznosile su od  $-1,53$  do  $-0,01 \text{ cm dan}^{-1}$ , od  $-1,11$  do  $-0,004 \text{ cm dan}^{-1}$  te od  $-0,76$  do  $-0,01 \text{ cm dan}^{-1}$ , do su prosječne vrijednosti brzine procjeđivanja vode iznosile  $-0,07 \text{ cm dan}^{-1}$  na istraživanim lokacijama Petruševac i Odra, a vrijednost brzine procjeđivanja vode na lokaciji Mala Mlaka bila nešto viša ( $0,10 \text{ cm dan}^{-1}$ ). Prosječne vrijednosti potencijalne ET (Prilog 5.) na lokacijama Petruševac i Odra bile su jednake ( $2,76 \text{ mm dan}^{-1}$ ), a na istraživanoj lokaciji Mala Mlaka iznosila je  $2,32 \text{ mm dan}^{-1}$ .



Slika 4.4.1.1. Usporedba simulirane dinamike sadržaja vode (na 30 cm dubine) i vodnog potencijala (na 50 cm dubine), brzine procjeđivanja na dnu simuliranog profila (na 100 cm dubine) i potencijalne evapotranspiracije na istraživanim lokacijama

## 5. Zaključak

Provedeno istraživanje obuhvaćalo je korištenje terenskih, laboratorijskih i numeričkih metode s ciljem kalibracije i validacije modela toka vode u tlu. Uporabom HYPROP i KSAT sustava određeni su hidraulički parametri tla, a TDR senzorima količina vode u tlu i vodni potencijal te su podaci korišteni za simulaciju u HYDRUS-1D programu direktnim i inverznim numeričkim metodama.

Utvrđeni rezultati istraživanja ukazuju da:

- rezultati hidrauličkih karakteristika tla ukazuje na primjenjivost van Genuchten Mualemovog modela ( $R^2$  veći od 0,9, a RMSE manji od 0,01) na svim istraživanim lokacijama dobivenom primjenom HYPROP FIT programa,
- podaci dinamike količine vode u tlu ukazuju na slabu podudarnost mjerenih i simuliranih rezultata (HYDRUS 1D) na lokacijama Mala Mlaka i Odra, dok je na istraživanoj lokaciji Petruševac dobra podudarnost, a podaci vodnog potencijala u tlu ukazuju na slabu podudarnost rezultata na lokaciji Mala Mlaka i Odra te na dobru podudarnost mjerenih i simuliranih rezultata na lokaciji Petruševac,
- rezultati inverznog modeliranja toka vode ukazuju da je, primjenom inverzne optimizacije hidrauličkih parametara pomoću HYDRUS-1D modela, postignut vrlo visok koeficijent determinacije ( $R^2$ ) što ukazuje na primjenjivost modela te da rezultati količine vode u tlu ukazuju na dobru podudarnost mjerenih i simuliranih rezultata na svim istraživanim lokacijama.

Rezultati istraživanja ukazuju da je model uspješno validiran i kalibriran što je potvrđeno statističkom analizom. Kombinacija terenskih opažanja (TDR), laboratorijskih analiza (HYPROP) te numeričkog modeliranja (HYDRUS-1D) ukazuju na pouzdanost korištenih metoda u tumačenju dinamike vode u tlu.

## 6. Literatura

1. Bačani A., Posavec K. (2014.). Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreba. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb
2. Baviskar S.M., Heimovaara T.J. (2017.). Quantification of soil water retention parameters using multi-section TDR-waveform analysis. *Journal of Hydrology*. 549: 404-415.
3. Brady N. C. (1984.). *Soil Water: Characteristics and Behavior*. U: *The Nature and Properties of Soils*. Ninth Edition. Macmillan Publishing Company. London
4. Caiqiong Y., Jun F. (2016.). Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau. *Catena* 139. 1-8. China
5. Cooper J. D. (2016.). *Soil Water Measurement: A Practical Handbook*. Wiley. UK
6. Darcy H. (1856.). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
7. Er-Raki S., Ezzahar J., Merlin O., Amazirh A., Ait Hssaine B., Kharrou M. H., Khabba S., Chehbouni A. (2021.). Performance of the HYDRUS-1D model for water balance components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco. *Agricultural Water Management* 244. 106546. Morocco
8. Ferré P. A., Topp G. C. (2002.). *Time-domain Reflectometry Techniques for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurements*. University of Arizona. USA.
9. Fields J.S., Owen Jr. J.S., Zhang L., Fonteno W.C. (2016). Use of evaporative method for determination of soilless substrate moisture characteristic curves. *Scientia Horticulturae*. 211: 102-109.
10. Filipović V. (2012.). Primjena numeričkog modeliranja u procjeni kretanja vode i koncentracije nitrata u uvjetima hidromorfni tala. Doktorska disertacija. Agronomski fakultet
11. Filipović V., Kodešova R., Petošić D. (2013.). Experimental and mathematical modeling of water regime and nitrate dynamics on zero tension plate lysimeters in soil influenced by high groundwater table. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 95:23-45
12. 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. Agronomski fakultet, Zagreb. 281-292.
13. Filipović V., Romić D., Romić M., Borošić J., Filipović L., Kochem Mallmann F. J., Robinson D. A. (2016.). Plastic mulch and nitrogen fertirigation in growing vegetables modify soil temperature, water and nitrate dynamics: Experimental results and a modeling study. *Agricultural Water Management* 176: 100-110
14. Gjetovaj G. (2006.). *Skripte iz hidraulike*. Građevinski fakultet. Sveučilište u Zagrebu. Zagreb

15. Hadas A., (1964.). Deviations from Darcy's law for the flow of water in unsaturated soils, Israel d. Agric. Res. 4 (4): 159-168
16. 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.
17. 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 Extended Evaporation and Dewpoint Methods. MDPI. Vol. 12, Issue 3
18. Hanks R. J. (1992.). Applied Soil Physics: Soil Water and Temperature Applications. Second Edition. Springer-Verlag. USA
19. Hillel D. (2004.). Introduction to environmental soil physics. Elsevier Science. USA
20. HRN ISO 11272:2004. Kakvoća tla – Određivanje volumne gustoće suhog tla (ISO 11272:1998)
21. HRN ISO 11464:2006. Kakvoća tla – Priprema uzorka za fizikalno-kemijske analize (ISO 11464:2006)
22. HRN ISO 10390:2005. Kakvoća tla – Određivanje pH-vrijednosti (ISO 10390:2005)
23. HRN ISO 11277:2011. Kvaliteta tla – Određivanje raspodjele veličine čestica (mehaničkog sastava) u mineralnom dijelu tla – Metoda prosijavanja i sedimentacije (ISO 11277:2009)
24. Husnjak S. (2014.). Sistematika tala Hrvatske. Sveučilišni udžbenik. Hrvatska sveučilišna naklada. Zagreb. 368 str.
25. Husnjak S. (2018.). Značajke tala u zonama vodozaštite izvorišta grada Zagreba. Izvješće. Zagreb.
26. Jacques D., Simunek J., Mallants D., van Genuchten M. T. (2008.). Modelling coupled water flow, solute transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil. Geoderma 2008;145:449-61
27. JDPZ (1966.). Metoda po Tjurinu. Kemijske metode istraživanja zemljišta, Beograd.
28. JDPZ (1971.). Metodika ispitivanja fizičkih svojstava zemljišta. Priručnik, Knj. X, Beograd.
29. Jensen i sur., (1990.). Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York. ASCE.
30. Jović V. (2006.). Uvod u hidromehaniku. Element, Zagreb
31. Jones S. B., Wraith J. M., Or D. (2002.). Time domain reflectometry measurement principles and applications. Hydrological processes 16, 141-153
32. Kanzari S., Nouna B. B., Mariem S. B., Rezig M. (2018.). Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. Sustainable Environment Research. Tunisia
33. Kirkham M. B. (2014.). Time Domain Reflectometry to Measure Volumetric Soil Water Content. U: Principles of Soil and Plant Water Relations, 187-205

34. Kirkham J. M., Smith C. J., Doyle R. B., Brown P. H. (2019.). Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). PeerJ 6-6002. DOI 10.7717/peerj.6002.
35. Kueneman E., Hopmans J. W., Raser E., Martin C. C. G., Fisher J. (2020.). Water-Smart Agriculture: A Biophysical-focused Introduction: Addressing Needs and Opportunities. University of California. ISBN: 978-92-9248-887-1
36. Kucharik C. J., Foley J. A., Delire C., Fisher V. A., Coe M. T., Lenters J. D., Young-Molling C., Ramankutty N. (2000.). Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water Balance, carbon balance and vegetation structure. Global Biochemical Cycles. Madison. Vol 14, No.3, 795-825
37. Kumar C. P., Sing S. (2015.). Concept and modelling of groundwater system. International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology. Vol 2.
38. Lal R., Stewart B. A. (2012.). Soil Water and Agronomic Productivity. CRC Press Taylor & Francis Group. USA
39. Marquardt D. W. (1963.). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. SIAM J., Appl Math. 11. 431-441
40. Maloić M. (2018.). Modeliranje toka vode i pronosa nitrata u nesaturiranoj zoni tla. Diplomski rad. Agronomski fakultet. Sveučilište u Zagrebu. Zagreb
41. McCarty L. M., Hubbard L. R., Quisenberry J. V. (2016.). Applied Soil Physical Properties, Drainage and Irrigation Strategies. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-24226-2
42. Mešić M. (2018.). Utjecaj repelentnosti tla opožarenih područja na infiltraciju i tok vode (Diplomski rad). Agronomski fakultet, Zagreb.
43. METER Group (2017.). TEROS 21 Soil Water Potential Sensor Operator's Manual. Meter Environment  
[http://manuals.decagon.com/Manuals/20428\\_TEROS21\\_Manual\\_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/20428_TEROS21_Manual_Web.pdf)  
pristupljeno: 07.07.2021.
44. METER Group (2018.a.). Teros 10 Simple Soil Moisture Sensing. Manual. Meter Environment  
<https://www.metergroup.com/environment/products/teros-10/>  
pristupljeno: 07.07.2021.
45. METER Group (2018.b.). ZL6 Advanced Cloud Data Logger. Manual. Meter Environment  
[http://www.misure.net/sites/default/files/20789\\_ZL6\\_Manual\\_Web.pdf](http://www.misure.net/sites/default/files/20789_ZL6_Manual_Web.pdf)  
pristupljeno: 07.07.2021.
46. Mualem Y. (1976.). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research. 12 (3): 513–522.
47. Mustačić I. (2015.). Modeliranje toka podzemne vode. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustačić I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb. 256-280.

48. Moret-Fernandez D., Vicente J., Latorre B., Lera F., Castaneda C., Lopez M. V., Herrero J. (2012.). TDR pressure cell for monitoring water content retention and bulk electrical conductivity curves in undisturbed soil samples. *Hydrological Processes* 26, 246-254
49. Ondrašek G. (2019.). Prostorna i vremenska distribucija pronosa onečišćivača (nitrati, fosfati, pesticidi, teški metali) iz poljoprivrede u različitim ekološkim uvjetima. Agronomski fakultet. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
50. Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Filipović V., Petek M., Lazarević B., Bubalo M. (2015.). Voda u agroekosustavima. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb. 281-302.
51. Persico R., Cataldo A., De Benetto E. (2019.). Time-domain reflectometry: Current uses and new possibilities. U: *Innovation in Near-Surface Geophysics*, 59-96
52. Petek i Lazarević (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.
53. Porporato A., Daly E., Rodriguez-Iturbe I. (2014.). Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Naturalist*. Chicago Vol. 164, No.5
54. Richards L.A. (1931.). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics 1*: 318- 333.
55. Robinson D. A., Hopmans J. W., Filipović V., van der Ploeg M., Lebron I., Jones S. B., Reinsch S., Jarvis N., Tuller M. (2019.). Global environmental changes impact soil hydraulic functions through biophysical feedbacks. Wiley. DOI: 10.1111/gcb.14626
56. Rockström J., Folke C., Gordon L., Hatibu N., Jewitt G., Penning de Vries F., Rwehumbiza F., Sally H., Savenije H., Schulze R. (2004.). A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through Water System Innovations; an integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 1109-1118
57. Schelle H., Heise L., Jänicke K., Durner W. (2013.). Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: A comparison of laboratory methods. *European Journal of Soil Science*. 64 (6): 814-821.
58. 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.
59. Suleiman A. A. (2008.). Modeling daily soil water dynamics during vertical drainage using the incoming flow concept. *Catena* 2008;73:312-20
60. Sraka M. (2016.). Fizika tla (interna skripta). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb.
61. SSEW (1974.). Soil Survey of England and Wales. Soil Survey laboratory methods. Technical monograph No. 7. Harpenden.

62. Šimunek J., van Genuchten M. T., Šejna M. (2005.). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media. Golden, CO: International Ground Water Modeling Center, Colorado
63. Šimunek J., van Genuchten M. Th. (2006.). Contaminant Transport in the Unsaturated Zone Theory and Modeling. U: The Handbook of Groundwater Engineering. 22-38
64. Šimunek J., Bradford S.A. (2008.). Vadose zone modeling: Introduction and importance. Vadose Zone Journal 7: (2), 581–586
65. Šimunek J., van Genuchten M.Th., Šejna M. (2008.). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone J. 7, 587–600
66. Šimunek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. (2012.a.) HYDRUS: Model Use, Calibration and Validation. ASABE. Vol 55(4). 1261-1274
67. Šimunek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. (2012.b.). The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual.
68. Šimunić I. (2013.). Uređenje voda. Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
69. Tomić F. (1988.). Navodnjavanje. Fakultet poljoprivrednih znanosti i Društvo inženjera i tehničara Hrvatske, Zagreb.
70. 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.
71. Weil R. R., Brady N. C. (2017.). The Nature and Properties of Soils.15th Edition. Pearson Education. England



## 7. Prilozi

Prilog 1. Srednji mjesečni klimatski parametri

Mjesec	Temperatura [°C]	Oborine [mm dan <sup>-1</sup> ]	ET [mm mj <sup>-1</sup> ]
Siječanj, 2020.	1,1	0,3	1,2
Veljača, 2020.	7,6	1,4	2,62
Ožujak, 2020.	7,8	1,0	4,16
Travanj, 2020.	13,2	0,8	8,76
Svibanj, 2020.	15,7	3,1	8,73
Lipanj, 2020.	20,3	3,5	10,8
Srpanj, 2020.	21,8	5,1	12,31
Kolovoz, 2020.	22,9	3,2	10,4
Rujan, 2020.	18,1	3,4	5,94
Listopad, 2020.	12,6	5,1	3,55

Prilog 2. Izmjereni i simulirani podaci količina vode u tlu [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] na 30 cm dubine

	Simulacija			TDR		
	Petruševac	Mala Mlaka	Odra	Petruševac	Mala Mlaka	Odra
Min	0,164	0,269	0,249	0,18	0,21	0,24
Max	0,360	0,431	0,419	0,28	0,36	0,33
Prosjek	0,226	0,335	0,299	0,24	0,31	0,29
R <sup>2</sup>	0,62	0,14	0,18	-	-	-

Prilog 3. Izmjereni i simulirani podaci vodnog potencijala [cm] na 50 cm dubine

	Simulacija			TDR		
	Petruševac	Mala Mlaka	Odra	Petruševac	Mala Mlaka	Odra
Min	-1042,11	-633,24	-335,99	-2141,42	-3135,29	-5681,54
Max	-35,61	-2,08	-7,05	-89	-87	-75
Prosjek	-411,61	-199,28	-157,96	-393,53	-524,77	-993,57
R <sup>2</sup>	0,53	0,12	0,02	-	-	-

Prilog 4. Izmjereni i simulirani podaci za inverzno modeliranje količine vode u tlu [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] na 30 cm dubine

	Simulacija			TDR		
	Petruševac	Mala Mlaka	Odra	Petruševac	Mala Mlaka	Odra
Min	0,173	0,231	0,240	0,183	0,211	0,244
Max	0,431	0,316	0,302	0,225	0,336	0,302
Prosjek	0,307	0,272	0,271	0,202	0,274	0,27
R <sup>2</sup>	0,52	0,77	0,71	-	-	-

Prilog 5. Minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti količine vode u tlu, vodnog potencijala, brzine procjeđivanja i potencijalne evapotranspiracije nakon inverznog modeliranja

		<b>Petruševac</b>	<b>Mala Mlaka</b>	<b>Odra</b>
<b>Količina vode</b> [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	<b>Min</b>	0,07	0,14	0,17
	<b>Max</b>	0,27	0,38	0,36
	<b>Prosjek</b>	0,14	0,23	0,23
<b>Vodni potencijal</b> [cm]	<b>Min</b>	-376,13	-194,35	-285,71
	<b>Max</b>	-81,05	-15,65	-31,27
	<b>Prosjek</b>	-242,69	-88	-152,35
<b>Brzina procjeđivanja</b> [cm dan <sup>-1</sup> ]	<b>Min</b>	-0,76	-1,53	-1,11
	<b>Max</b>	-0,01	-0,01	-0,004
	<b>Prosjek</b>	-0,07	0,10	-0,07
<b>Potencijalna evapotranspiracija</b> [mm dan <sup>-1</sup> ]	<b>Min</b>	0,22	0,19	0,22
	<b>Max</b>	6,15	5,24	6,15
	<b>Prosjek</b>	2,76	2,32	2,76

## Životopis

Stjepan Mikičić rođen je 06. prosinca 1995. godine u Zagrebu. Od 2010. do 2014. pohađao je srednju školu Ivana Trnskoga u Hrvatskoj Kostajnici. Preddiplomski studij na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Agroekologija upisuje u akademskoj godini 2014./2015., a završava u akademskoj godini 2017./2018. Iste godine upisuje Diplomski studij na istom Fakultetu, smjer Agroekologija te završava u akademskoj godini 2020./2021.

Govori engleski jezik u govoru i pismu. Služi se Microsoft Office paketom te Geografskim informacijskim sustavom (GIS), Autocad programom te raznim alatima za uređivanje baza.

Tijekom studija radio je nekoliko poslova preko Student servisa. Od 2017. do 2020. god. radio je za Hrvatski Telekom na poslovima migracije i unosa podataka u DDS te na uređenju baza, a od 2020. god. je zaposlenik Hrvatskog Telekoma na projektu legalizacije linijske i točkaste infrastrukture.