# Utjecaj repelentnosti tla opožarenih područja na infiltraciju i tok vode

**Mešić, Mirel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:204:521652

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

*Repository / Repozitorij:*

Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**AGRONOMSKI FAKULTET**

# UTJECAJ REPELENTNOSTI TLA OPOŽARENIH PODRUČJA NA INFILTRACIJU I TOK VODE

DIPLOMSKI RAD

Mirel Mešić

Zagreb, rujan, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**AGRONOMSKI FAKULTET**

Diplomski studij:
Melioracije

# UTJECAJ REPELENTNOSTI TLA OPOŽARENIH PODRUČJA NA INFLITRACIJU I TOK VODE

Impact of soil water repellency on water flow and infiltration in fire affected area

DIPLOMSKI RAD

Mirel Mešić

Mentor: Doc. dr. sc. Vilim Filipović

Neposredni voditelj: Dr. sc. Lana Filipović

Zagreb, rujan, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**AGRONOMSKI FAKULTET**

## IZJAVA STUDENTA

O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Mirel Mešić**, JMBAG 0178089257, rođen dana 19.05.1992. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

**UTJECAJ REPELENTNOSTI TLA OPOŽARENIH PODRUČJA NA INFILTRACIJU I TOK VODE**

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 5. rujna 2018.

_____

*Potpis studenta*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZVJEŠĆE**

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Mirel Mešić**, JMBAG 0178089257, naslova

**UTJECAJ REPELENTNOSTI TLA OPOŽARENIH PODRUČJA NA INFILTRACIJU I TOK VODE**

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____ , dana _____ .

| Povjerenstvo: | | | potpisi: |
|---|---|---|---|
| 1. | Doc. dr. sc. Vilim Filipović | mentor | _____ |
| 2. | Dr. sc. Lana Filipović | neposredni voditelj | _____ |
| 3. | Doc. dr. sc. Ivan Mustać | član | _____ |
| 4. | Doc. dr. sc. Vedran Rubinić | član | _____ |

*Ovaj rad, kao i sva dosadašnja životna postignuća, posvećujem majci Aidi i djevojci Roberti u znak zahvale za bezuvjetnu ljubav i podršku u životu.*

# Sažetak

Diplomskog rada studenta **Mirel Mešić**, naslova

**UTJECAJ REPELENTNOSTI TLA OPOŽARENIH PODRUČJA NA INFILTRACIJU I TOK VODE**

Nadolazeće klimatske promjene predviđaju izrazitije i duže pojave sušnih razdoblja s povećanjem rizika od požara u Hrvatskoj i značajnom redistribucijom godišnjih oborina. Kao posljedica se očekuje povećanje repelentnosti tla za vodu (RTV). Cilj rada je utvrditi utjecaj požara na hidrauličke karakteristike tla, moguću pojavu hidrofobnosti tla i njezin utjecaj na infiltraciju i tok vode u nesaturiranoj zoni tla. Infiltracijski pokusi s vodom i etanolom na jako opožarenom (A), opožarenom (B) i kontrolnom (C) tlu korišteni su kao osnova za inverzno određivanje hidrauličkih parametara potrebnih za kalibraciju računalnog modela (HYDRUS 2D/3D). Jednogodišnji klimatski scenarij uz primjenu stvarnih meteoroloških podataka je nakon toga simuliran pomoću softverskog programa HYDRUS-1D. Rezultati velikog smanjenja hidrauličke provodljivosti tla ($K_s$) u područjima A i B ukazuju na RTV. Jednogodišnja simulacija nije pokazala značajan utjecaj RTV na bilancu vode. S druge strane, simulacijom razdoblja intenzivnih oborina, rezultati ukazuju da RTV nastala uslijed dužih sušnih perioda i kratkih intenzivnih oborina povećava mogućnost pojave površinskog otjecanja i smanjenje infiltracijske sposobnosti tla.

**Ključne riječi**: repelentnost tla za vodu (RTV), tok vode, matematički modeli, HYDRUS, površinsko otjecanje

# Summary

Of the master's thesis – student **Mirel Mešić,** entitled

**IMPACT OF SOIL WATER REPELLENCY ON WATER FLOW AND INFILTRATION IN FIRE AFFECTED AREA**

Expected climate change predictions are suggesting that the occurrence of more pronounced and longer dry periods with an increased fire risk and significant redistribution of annual precipitation may be expected in Croatia. Consequently, an increase of soil water repellency (SWR) is expected. The aim of this thesis is to determine the impact of the fire on the hydraulic characteristics of the soil, the possible appearance of soil hydrophobicity and its influence on infiltration and water flow in the unsaturated soil (vadose) zone. Infiltration experiments with water and ethanol on highly affected (A), affected (B) and control (C) site (non-affected), were used as a basis for the inverse determination of hydraulic parameters required for calibration of a computer model (HYDRUS 2D/3D). The one-year climatic scenario with the application of real meteorological data is then simulated using the HYDRUS-1D software program. The results of a large reduction in soil hydraulic conductivity of the soil ($K_s$) in sites A and B indicate SWR. Seasonal (one year) simulation did not show a significant impact of SWR on the water balance. On the other hand, by simulating the period of intensive precipitation, the results indicated that SWR caused by longer dry periods and short intensive precipitation increases surface runoff and reduces the infiltration capacity of the soil.

**Keywords**: soil water repellency (SWR), mathematical models, water flow, HYDRUS, surface runoff

# Sadržaj

Sažetak ..... 1

Summary ..... 2

Sadržaj ..... 3

1. Uvod ..... 5

1.1. Cilj rada i istraživanja ..... 5
1.2. Pregled literature ..... 6

1.2.1. Infiltracija i tok vode u tlu ..... 6

1.2.2. Hidrauličke karakteristike tla ..... 9

1.2.3. Repelentnost tla za vodu ..... 12

1.2.4. Modeliranje na temelju infiltracijskih mjerenja i inverzno modeliranje ..... 17

2. Materijali i metode ..... 21

3. Rezultati i rasprava ..... 30

4. Zaključak ..... 38

5. Popis literature ..... 39

Životopis ..... 44

# 1. Uvod

Zemlja i njen sustav atmosfera-tlo-voda-biljka u posljednjih desetak godina trpe veliku degradaciju uzrokovanu globalnim klimatskim promjenama (globalno zatopljenje), a kojoj najviše pridonosi rastuća ljudska populacija. Predviđanja su da će se klima u svijetu značajno izmijeniti. Kako navode Giannakopoulos i sur. (2009.) u projekciji rizika povećanja požara, pri globalnom zatopljenju od samo 2 ˚C, za period od 2030. do 2060. godine usporedno s periodom od 1961. do 1990. godine, regije Balkana, Maghreba, sjevernog Jadrana, centralne Španjolske i Turske su najrizičnije. U tim regijama opasnost od požara je najveća. Prilikom požara javlja se povećana repelentnost tla za vodu (RTV) (eng. Soil Water Repellency - SWR). RTV je smanjenje stope infiltracije i zadržavanja vode u tlu uzrokovano sušenjem tla i prisutnošću raznih hidrofobnih slojeva na česticama tla koji sprečavaju upijanje vode u tlo. Iako ovu pojavu prvi otkrivaju i opisuju Schreiner i Shorey (1910.), te je do danas proučavana u mnogim istraživanjima, i dalje se smatra nedovoljno istraženom. Kao što navode Jordán i sur. (2013.), istraživanja su fokusirana na odnos RTV i različitih svojstava tla (tekstura, sadržaj organskih čestica, kemijske karakteristike tla) ili mikrobiološku aktivnost tla. Međutim, RTV je promjenljivo (dinamično) svojstvo u vremenu i prostoru. S obzirom na kompleksnost i veliki broj različitih fizikalnih i kemijskih parametara koji utječu na RTV, vrlo se teško može predvidjeti ili procijeniti (Doerr i sur. 2000.). Poznato je da RTV mijenja hidraulička svojstva tla, odnosno da utječe na infiltraciju vode u tlu kao i na hidrauličku vodljivost, posebice u nesaturiranoj zoni tla (Filipović i sur. 2018.). Također, pojava RTV dovodi do značajnih hidroloških i geomorfoloških posljedica u tlu, primjerice, erozije, brzog površinskog otjecanja i ispiranja apliciranih agrokemikalija putem preferencijalnih tokova, gubitka vode i nutrijenata (Doerr i sur. 2000.). Nadalje, u dosadašnjim istraživanjima dokazano je da požari djeluju kao svojevrsni okidač pojavnosti i stupnja RTV (DeBano, L.F. 2000., Stoof i sur. 2011., Tessler i sur. 2008.). Iz navedenog je vidljivo da RTV ima važan utjecaj na hidrologiju područja te je potrebno istražiti razloge njezine pojavnosti i intenziteta na opožarenim područjima zbog boljeg shvaćanja uzroka i posljedica koje se odvijaju u tlu.

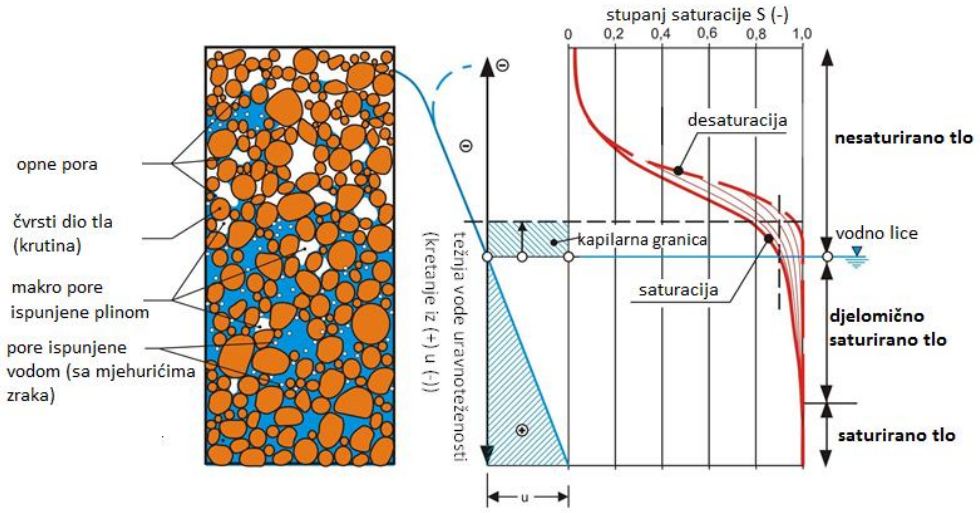
## 1.1. Cilj rada i istraživanja

Nadolazeće klimatske promjene, predviđaju izrazitije i duže pojave sušnih razdoblja s povećanjem rizika od šumskih požara, stoga kao posljedicu toga možemo očekivati povećanje pojave repelentnosti tla za vodu (RTV). Također, poznato je da RTV može imati značajan utjecaj na hidrauličke karakteristike tla. Uzimajući u obzir navedeno, cilj ovog rada je (i) koristeći pristup inverznog modeliranja pomoću HYDRUS 2D/3D softverskog programa procijeniti utjecaj RTV na hidrauličke karakteristike tla dobivene infiltracijskim pokusom provedenim s vodom i etanolom, te (ii) koristeći HYDRUS-1D softverski program, predvidjeti utjecaj različitog intenziteta oborina na infiltraciju i tok vode u tlu pri povećanoj RTV.

## 1.2. Pregled literature

### 1.2.1. Infiltracija i tok vode u tlu

Tlo možemo definirati kao medij koji se sastoji od čvrste (čestice tla), tekuće (voda) i plinovite faze (zraka) (Hillel 2013.). Između čestica tla je porozni prostor (pore tla) različitog oblika i dimenzija u kojem se nalazi voda, zrak (plin). Porozni prostor ovisi o tipu tla i njegovim fizikalnim značajkama, može biti vrlo različit te predstavlja prirodnu zalihu za vodu i zrak. Pore tla se dijele na mikropore (kapilarne pore) u kojima se zadržava voda i makropore (ne-kapilarne pore) u kojima se nalazi zrak, dok voda u njima može biti samo kraće vrijeme (prilikom potpune saturacije tla; Jury i Horton 2014.). Infiltracija je proces ulaska vode kroz površinu tla (Or i Wraith 1997.). Infiltracijom se tlo vlaži od površine prema dubljim slojevima djelovanjem sile gravitacije i kapilarnih sila. S obzirom na to da se voda u tlu skladišti (nalazi) u porama, najveća infiltracija je u početku procesa kada je tlo suho i pore su prazne (u njima je samo zrak), a s vremenom se smanjuje. Infiltracija ovisi o fizikalnim značajkama tla i trenutnom stanju vlažnosti tla. Čim voda dospije u tlo podliježe određenim zakonitostima u pogledu kretanja i zadržavanja (Slika 1.). Kada voda potpuno ispunjava pore (mikro i makro), kažemo da je tlo vodom saturirano (zasićeno); kada ne ispunjava potpuno kažemo da je tlo djelomično saturirano.




Slika 1. Struktura tla s obzirom na sustav pora (lijevo); presjek profila tla te stupnjevi saturacije vodom (zasićenosti)(desno)
Izvor: prilagođeno prema http://blog.hj-koehler.de/boden-unter-wasser/

Dakle, kretanje vode može biti u saturiranim ili nesaturiranim uvjetima u tlu. Na slici 1. prikazan je presjek tla s vodom u ravnotežnom stanju na koji djeluje atmosferski tlak, a granica na kojoj se dijeli nesaturirana i saturirana zona se zove vodno lice (Mustać 2015.). Ispod te razine sve pore u tlu su ispunjene vodom (saturiranost iznosi 100%). To područje nazivamo područjem potpunog zasićenja (saturirana zona tla) te također područje vode

temeljnice odnosno gravitacijske vode jer se u njemu gibanje (tok) vode odvija pod utjecajem gravitacije. Iznad granice vodnog lica nalaze se pore koje mogu biti ispunjene vodom u potpunosti ili djelomično, pa se u toj zoni stupanj saturiranosti kreće između 0 i 100 %. To područje tla nazivamo kapilarnom zonom. Iznad kapilarne zone nalazi se područje adhezijske vode gdje se voda veže za čvrste čestice tla u tankom sloju, a dijelimo ga na područje membranske vode i hidroskopne vlage. U području adhezijske vode pore tla ispunjene su mješavinom zraka i vodene pare pa područje iznad kapilarnog područja nazivamo i nesaturiranom zonom tla (Mustać 2015.). Također, crvena isprekidana krivulja prikazuje oblik retencijske krivulje prilikom saturacije tla dok puna linija prikazuje desaturaciju tla, različiti oblik krivulja poznat je i pod pojmom „histereze“ (eng. Hysteresis; Dirksen 1999.). Voda u tlu, kao i sve tvari, sadrži različitu količinu i oblike energije. Pritom primarno mislimo na kinetičku i potencijalnu energiju. Iako se voda u tlu kreće relativno sporo, njena kinetička energija je zanemariva. Potencijalna energija, koja se određuje prema položaju samog tijela u polju sila te unutarnjem stanju tvari, najbitnija je pri karakteriziranju stanja vode u tlu. Voda u tlu kreće se radi nastojanja da prijeđe iz područja gdje je njena potencijalna energija veća u ono gdje je manja, te teži uravnoteženosti (Slika 1.; Or i Wraith 1997.). Vodni potencijal tla iskazujemo kao potencijalnu energiju po jedinici volumena vode u uzorku tla. Ukupni vodni potencijal nekog tla je zbroj četiriju potencijala: gravitacijskog (koji je posljedica gravitacijskoga polja), matričnog (čvrsta faza tla – koji se odnosi na kapilarne i adsorpcijske sile u tlu), osmotskog i tlačnog (Dirksen 1999.). Tok vode u tlu može biti stacionaran (bez promjene karakteristika toka s vremenom, ujednačeno tečenje), nestacionaran ali saturiran, te ono najčešće u prirodnim uvjetima – nesaturiran i nestacionaran. Razlog tomu je što su kod takvog oblika toka vode u tlu, sadržaj vode, vodni potencijal i tok promjenljivi u vremenu. Najčešće korišteni modeli za opisivanje toka vode u nesaturiranoj zoni tla baziraju se na Richardsovoj jednadžbi toka vode (jednodimenzionalni tok u vertikalnom smjeru; Filipović 2015., Farthing i Ogden 2018.):

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

gdje je: $\theta$ – relativna količina vode u tlu, $[\mathrm{L}^3\ \mathrm{L}^{-3}]$*,
$h$ – vodni potencijal tla (pressure head), $[\mathrm{L}]$*,
$K$ – hidraulička vodljivost nesaturiranoga tla, $[\mathrm{LT}^{-1}]$*,
$z$ – vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore), $[\mathrm{L}]$*,
$t$ – vrijeme, $[\mathrm{T}]$*,
$S$ – voda koju biljka usvaja korijenom, $[\mathrm{T}^{-1}]$*.

** M – mass (g, kg itd.), L – length (mm, cm itd.) i T – time (s, min itd.). Naveden je uobičajen opis formula zbog mogućnosti variranja jedinica; kako u ovom primjeru tako i dalje kroz rad.*

Richardsova jednadžba bazira se na jednadžbi kontinuiteta i Darcyevom zakonu. Jednadžba kontinuiteta izražava promjenu u relativnoj količini vode u zadanom volumenu tla, kao posljedici prostorne promjene toka vode, a izražava se sljedećom jednadžbom:

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

dok Darcyjev zakon primijenjen na djelomično saturirani tok opisuje hidrauličku vodljivost kao funkciju relativne količine vode u tlu *K=K(θ)*, što znači da će malo smanjenje količine vode u tlu dovesti do signifikantnog smanjenja hidrauličke vodljivosti *K*, i opisuje se jednadžbom:

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

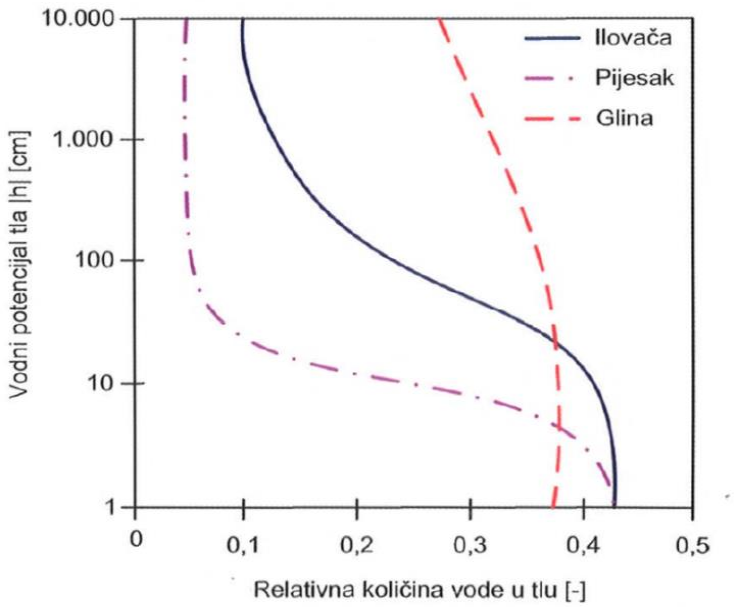
gdje je: $H$ – suma vodnoga potencijala tla (h) i gravitacijskog potencijala tla (od referentne razine – npr. razine podzemne vode) (z),
$q_z$ – specifični protok (eng. flux density), [$LT^{-1}$].

Richardsova jednadžba parcijalno je diferencijalna i nelineralna zbog *θ-H-K* odnosa koji se javlja u prirodi odnosno u tlu. U takvom kompleksnom sustavu rubni uvjeti podložni su neregularnim promjenama. Ako poznajemo odnos između *θ-H-K* parametara, numeričkim modelom možemo riješiti jednadžbu za različite površinske rubne uvjete (Filipović 2015.).

Proučavanje infiltracije vode u tlu važna je tema u područjima hidrologije i poljoprivrede s obzirom na to da taj proces upravlja zalihom dostupne vode za biljku kao i procesima obnove podzemne vode te također kontrolira površinsko otjecanje vode i eroziju tla (Green i sur. 2003.). Znanstvena shvaćanja procesa infiltracije kao i novi uvidi u modeliranju toka vode u nesaturiranim uvjetima unatrag 30-ak godina znatno su proširena (Gerke 2006., Jarvis 2007.). Strukturna poroznost i smanjeno vlaženje tla (npr. uslijed RTV) može dovesti do značajne redistribucije vode uključujući i transport onečišćivača koji se ne mogu opisati Darcy-Richardsovom jednadžbom. S obzirom na temporalno-prostornu heterogenost infiltracije vode u tlo, provođenje samih pokusa iznimno je osjetljivo za nesaturiranu zonu tla. Kako bi kasnije mogli uspješno modelirati tok vode upravo je određivanje karakteristika kretanja vode u tlu iznimno važno. Konkretnije, prilikom određivanja preferencijalnih tokova moramo koristiti eksperimentalni i numerički (modeliranje) pristup koji je raširen kroz različita prostorna mjerila (Clothier i sur. 2008.). Do sada je mnogo pažnje usmjereno na istraživanja infiltracijskog procesa vode u tlu (Iovino i sur. 2017.), kao i pojave preferencijalnih tokova uslijed utjecaja različitih čimbenika (detaljnije objašnjeno u poglavlju 1.2.4.).

### 1.2.2. Hidrauličke karakteristike tla

Nesaturirana tla sadrže tekuću i plinovitu fazu (voda i zrak u tlu) u svojoj strukturi. Općenito, za hidrauličke karakteristike tla možemo reći da opisuju makroskopske odnose između kemijskog (vodnog) potencijala, faze koncentracije i ponašanja pronosa (kretanja) vode i plinova u tlu (Durner i Flühler 2005.). Navedeni odnosi ovise o mnogo faktora, npr. temperaturi, (geometrijskoj) strukturi pora u tlu, karakteristikama površine matriksa tla, te o karakteristikama vlažećih i ne-vlažećih tekućina koje se nalaze u prostoru pora. Uzmemo li u obzir da hidrauličke karakteristike direktno utječu na sadržaj vode u tlu, prilikom modeliranja određenih procesa u tlu (kao što su pronos tvari i tok vode), važno je odrediti hidrauličke karakteristike istraživanog tla (Šimůnek i sur. 1998., Durner i Flühler 2005.). Retencijske krivulje tla definiraju odnos između relativne količine vode u tlu $\theta$ (omjer mase vode u tlu i mase osušenog tla) i vodnog potencijala tla *h*. Također, imaju karakterističan odnos za različite tipove tla (Slika 2.). Pri potencijalu blizu vrijednosti 0, tlo je gotovo potpuno saturirano i voda u matrixu tla vezana je kapilarnim silama. 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 (Filipović 2015.).




Slika 2. Glavne karakteristike retencijske krivulje tla gdje je na osi x prikazana relativna količina vode u tlu θ, a na osi y prikazan je vodni potencijal tla h; primjeri za teksturno raličita tla
Izvor: Ondrašek i sur. (2015.)

Teksturno lakša tla (pjeskovita) gube vodu mnogo brže od teksturno težih tala (glina) kao izravan odraz distribucije veličine pora u tlu pri određenoj teksturnoj jedinici tla. Budući 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 vrlo velikim vrijednostima negativnog vodnog potencijala. Za upotrebu u modeliranju toka vode u nesaturiranoj zoni, gore navedeni odnos moramo izraziti u kontinuiranom obliku tijekom cijelog raspona vlažnosti tla, od nesaturiranog do potpune saturacije. Oblik retencijske krivulje tla može se opisati primjenom različitih modela, od kojih je najčešće primjenjivan van Genuchten – Mualem model:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \; za \; h < 0 \tag{4}$$

$$\theta(h) = \theta_s \; za \; h \geq 0$$

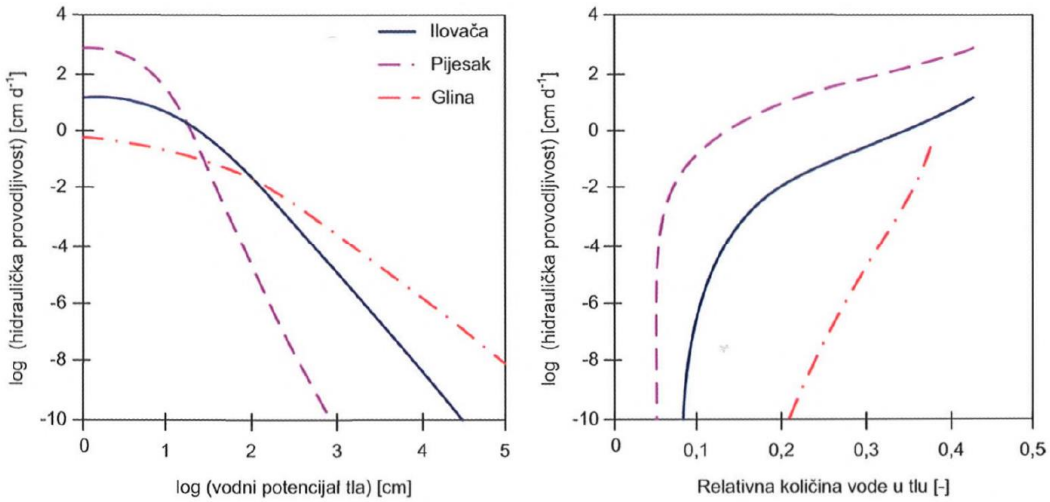
$$K(h) = K_S S_e^l \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right)^2 \tag{5}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{6}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}; n > 1 \tag{7}$$

gdje je: $\theta_r \; i \; \theta_s$ – rezidualna i saturacijska relativna količina vode u tlu, $[L^3 \; L^{-3}]$,
$K_S$ – hidraulička provodljivost saturiranog tla, $[L \; T^1]$,
$S_e$ – efektivna saturacija tla, $[-]$,
$\alpha$ – inverzna vrijednost ulaza tlaka zraka, $[L^{-1}]$,
$n$ – mjerna distribucija pora u tlu, $[-]$,
$l$ – parameter povezanosti pora u tlu (najčešće se uzima vrijednost 0,5 za većinu tipova tala).

Hidraulička provodljivost može se opisati kao sposobnost tla za prijenos (transport) vode i kao takva je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu (Slika 3., Or i Wraith 1997.). Kao takva hidraulička provodljivost se smanjuje tijekom sušenja tla i sa smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom. Hidraulička provodljivost u saturiranom tlu mnogo je veća u teksturno lakšim tlima (pijesak) nego u tlima glinovite ili ilovaste teksture. Također, hidraulička provodljivost drastično se smanjuje kako tlo prelazi iz saturirane u nesaturiranu fazu. Navedeno smanjenje, kada je izraženo kao funkcija vodnog potencijala tla, mnogo je izraženije u pjeskovitim nego u ilovastim ili glinovitim tlima (Dirksen 1998., Ondrašek i sur. 2015.).




Slika 3. Primjer odnosa hidrauličke provodljivosti i vodnog potencijala tla te odnos hidrauličke provodljivosti I relativne količine vode u tlu za teksturno različita tla
Izvor: Ondrašek i sur. (2015.)

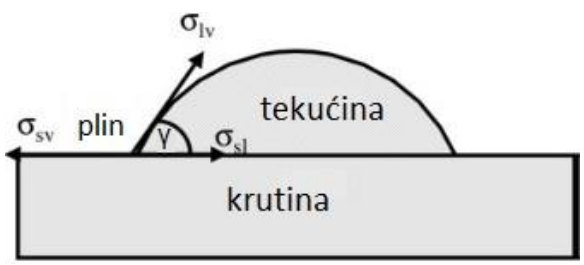
Za određivanje hidrauličkih karakteristika tla koriste se razne metode koje uključuju infiltraciju vode u kontroliranim uvjetima (npr. poznati vodni potencijal i početni sadržaj vode u tlu) kao i razni uređaji (npr. tlačni infiltrometri, infiltracijski cilindri). Takve metode nam omogućuju određivanje hidrauličkih karakteristika izravno na terenu i rezultiraju boljim predviđanjima toka vode i transporta tvari u nesaturaranoj zoni tla. Prilikom određivanja hidrauličkih karakteristika u nesaturiranim tlima najčešće se koristi tlačni infiltrometar.

U radu Šimůnek i sur. (1998.) korištena su dva seta podataka terenskog pokusa infiltracije kako bi se odredile hidrauličke karakteristike tla pomoću inverznog određivanja parametara tla. Korištena je inverzna numerička procedura, koja se sastojala od kombinacije Levenberg-Marquardt minimizacijske metode i numeričkog rješenja jednadžbe za asimetrični promjenljivo-saturirani tok. Cilj rada bio je utvrditi preciznu metodu određivanja hidrauličkih karakteristika. Tlačni infiltrometar (Soil Measurement Systems, Arizona, SAD) s odvojenim diskom infiltrometra od opskrbne i kontrolne cijevi je korišten za infiltracijska mjerenja. Između membrane diska i uglađene površine tla stavljen je sloj od 1mm pijeska kako bi se osigurao dobar hidraulički kontakt. Mjerenja su provedena s radijusom diska od 10 cm pri različitim tlakovima. Tlakom od 20 cm su započeta mjerenja, otprilike u trajanju od 60 min, te postepeno smanjivana na tlakove od 10 i 3 cm. Bilježen je volumen infiltracije kroz vrijeme. Prvo su korišteni ukupni infiltracijski volumeni na kraju svakog pokusa, pri različitim tlakovima opskrbe zasebno, u kombinaciji s Woodingovom analizom. Time je određena hidraulička provodljivost i količina infiltracije pri svakom tlaku. Potom je provedeno inverzno numeričko modeliranje pomoću HYDRUS programa koristeći izmjerenu infiltracijsku krivulju i sadržaj vode u tlu. U drugom setu optimizacije uz prethodne podatke o ukupnoj infiltraciji i konačnom sadržaju vode, uključene su i dvije vrijednosti nesaturirane hidrauličke provodljivosti dobivene Woodingovom analizom. Rezultati su pokazali poklapanje između izmjerenih i optimiziranih ukupnih infiltracijskih krivulja dobivenih terenskim pokusom. Pokus s tlačnim infiltrometrom omogućuje dovoljno precizne podatke s kojima možemo

kvalitetno odrediti funkciju hidrauličke provodljivosti *K(h)*, te također donekle i retencijsku $\theta(h)$. S obzirom na to da tlačni infiltrometar koristimo većinom za određivanje hidrauličke provodljivosti, dobivene podatke nužno je upotpuniti podacima ostalih parametara tla kako bi dobili potpuni opis hidrauličkih svojstava tla.

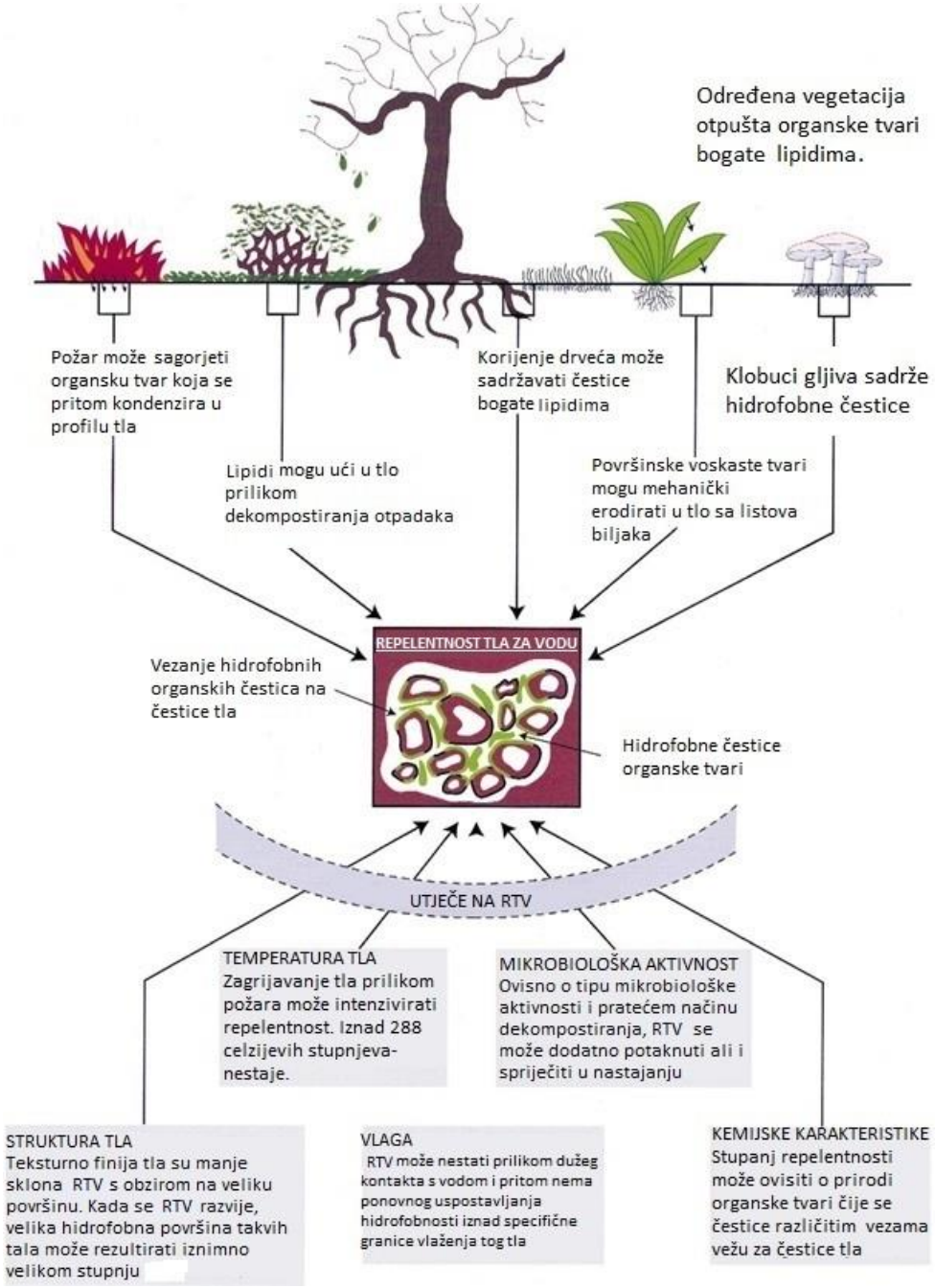
### 1.2.3. Repelentnost tla za vodu

Repelentnost tla za vodu (RTV) (eng. Soil Water Repellency – SWR) smanjuje mogućnost infiltracije i zadržavanja vode u tlu. Uzrokovana je isušivanjem tla i prisutnošću raznih hidrofobnih slojeva na česticama tla. Schreiner i Shorey (1910.) su prvi otkrili i opisali da se određena tla u Kaliforniji – iako se nalaze u suhom stanju – ne mogu vlažiti, dok su Letey i suradnici (1962.) bili prvi znanstvenici koji su ukazali da je uzrok pojave RTV povezan s organskim česticama koje su prisutne u tlu. Poznavanje i razumijevanje RTV gledajući na razini svih tala u svijetu, i dalje je relativno oskudno. Iako se svi znanstvenici slažu da se postanak i stupanj RTV u tlu veže uz organske čestice tla, zbog lošeg shvaćanja točnog kemijskog sastava čestica koje uzrokuju hidrofobnost te njihovog mehanizma spajanja s česticama tla, i dalje se ne mogu utvrditi točni uzroci i same karakteristike RTV (DeBano 1982., Doerr 2000.). Najveći razlog nedostatka znanja o RTV je sama priroda ponašanja takve pojave u tlu. RTV je iznimno promjenljivo, a nikako stalno stanje tla. Prihvaćena je činjenica da se javlja zbog stalnog promjenjivog stanja vlažnosti tla (izmjena mokre i suhe faze tla). Mnoge studije (Jordán i sur. 2013., Schwen i sur. 2015.), dokazuju da se RTV povećava sa smanjenjem sadržaja vode u tlu. Međutim, točne karakteristike tla i potrebni uvjeti da se tlo promjeni iz hidrofobnog stanja u hidrofilno, i obratno, također su do sada slabo objašnjeni. RTV može nestati zbog dugotrajnog kontakta s vodom, vrijeme trajanja te dugotrajnosti nazivamo postojanost hidrofobnosti. Iako sva tla imaju određen stupanj RTV, postoji određena klasifikacija stupnja odnosno jačine RTV (Doerr 1998.). Stupanj RTV je opisan kao dodirni kut između čestica površine tla i vode koja infiltrira u tlo. Kakav će dodirni kut imati voda s površinom tla ovisi između slobodne energije od tri uključene površine. Kut koji se razvije prilikom dodira te tri površine nazivamo dodirni kut ili kut vlaženja *γ* (DK). On ovisi o odnosu između triju graničnih energija ($\sigma$); tekućina-plin ($\sigma_{lv}$), krutina-plin ($\sigma_{sv}$), i krutina-tekućina ($\sigma_{sl}$) (Slika 4.).




Slika 4. Oblik kapljice i vizualizacija dodirnog kuta (kuta vlaženja) na homogenoj površini sa srednje hidrofobnom površinom
Izvor: prilagođeno prema Bachmann i sur. (2000.)

Naime, ako spustimo kapljicu vode na površinu tla i ona ne infiltrira u tlo spontano, možemo reći da je njen dodirni kut s površinom tla veći od 90°, stoga takva tla klasificiramo kao hidrofobna. S druge strane, za hidrofilna tla možemo reći da imaju dodirni kut jednak 0. Međutim, većina tala nisu u potpunosti hidrofilna (vlažeća) ili hidrofobna (repelentna) već pokazuju određeni stupanj RTV ($0 < \theta < 90°$) (Letey i sur. 2000.) koji također može imati značajan utjecaj na infiltraciju i tok vode i ostalih tvari u tlu. Kvantitativna karakterizacija RTV određuje se pomoću *Water Drop Penetration Time* (WDPT) metode (Doerr 1998.).




Slika 5. Kompleksnost RTV prema porijeklu i čimbenicima koji utječu na njegovu postojanost
Izvor: prilagođeno prema Doerr i sur. (2000.)

WDPT test mjeri postojanost hidrofobnosti na poroznoj površini te se stoga odnosi na hidrološke implikacije hidrofobnosti, zbog toga što je količina površinskog otjecanja uzrokovana vremenom potrebnim za infiltraciju kapi oborina. *Molarity of an Ethanol Droplet* (MED; također poznat i kao „Percentage Alcohol Test“) test je neizravno mjerenje površinske napetosti površine tla i kazuje koliko snažno je kapljica vode repelentna od tla u vrijeme aplikacije (King 1981.) te omogućuje klasifikaciju tala u grupe repelentnosti (Bisdom i sur. 1993.).

DeBano i Krammes (1966.) su utvrdili da se RTV značajno mijenja zagrijavanjem tla odnosno isušivanjem. Uzorci tla slabijeg stupnja RTV, koji su sadržavali organsku tvar stavljani su u peći i zagrijavani. RTV se znatno povećava prilikom zagrijavanja (i isušivanja) tla, stoga se smatra da su požari svojevrsni „okidači“ same pojavnosti i stupnja RTV. Iako je dokazano da se RTV pojavljuje u tlu prilikom zagrijavanja iznad 176 ˚C, također počinje nestajati kada temperature dosegnu >288 ˚C (DeBano 1981.). Struktura tla kao i pH su također faktori koji utječu na stupanj RTV (Jarvis i sur. 2008.). Utjecaj na infiltraciju i tok vode ima i vrijeme postojanosti RTV (intenzitet, stupanj), koje može biti tek nekoliko sekundi pa sve do nekoliko dana ili tjedana (dinamično kroz vrijeme), te sadržaj vode u tlu. Prostorno i vremenski varijabilna dinamika RTV istraživana je u studiji Lemmnitz i sur. (2008.). Pokus je postavljen na dva pjeskovita supstrata (*Tertiary* i *Quaternary*) s osiguranim jednakim terenskim karakteristikama, meteorološkim i vegetacijskim uvjetima na obje lokacije, što je omogućilo istraživanje veze između RTV i nastanka otjecanja. Provedena su WDPT mjerenja kao i mjerenja dodirnog kuta vode i površine tla. Rezultati su pokazali područje s *Quaternary* supstratom kao hidrofilno dok je s druge strane područje s *Tertiary* supstratom pokazalo određene stupnjeve hidrofobnosti. Prostorna različitost (varijabilnost) stvarne RTV je povezana s heterogenosti supstrata i geomorfoloških jedinica, dok je različitost kroz vrijeme smatrana zbog sezonskih klimatskih uvjeta. Kako bi povezali različite stupnjeve RTV s površinskim otjecanjem, obje varijable su mjerene paralelno na uzorcima tla (1m x 1m) i na različitim pozicijama nagiba. RTV se pokazala kao privremeno promjenjivo svojstvo ovisno o sezoni, s najvećim stupnjem u vremenskom razdoblju tijekom ljeta i jeseni. Razlike hidrofobnosti između sezona uzrokovale su veće koeficijente otjecanja u tim godišnjim dobima. Hidrofobno područje (*Tertiary*) imalo je veće koeficijente otjecanja naspram hidrofilnog odnosno bez prisutnosti repelentnosti (*Quaternary*). Mjereni koeficijenti smanjivali su se ovisno o poziciji na nagibu zbog infiltracije u hidrofilne zone tla na brdskom području. Prosječni koeficijent na lokacijama iznosio je 0,46 za *Tertiary* i 0,10 za *Quaternary* tip tla. Tijekom pokusa, utvrđeno je 83 događaja oborina: 70 tijekom hidrofobnih uvjeta i 13 prilikom hidrofilnih. Samo 34 događaja su evidentirana na oba prostorna raspona (mikro lokacije i cijeli obronak). Hidrofilni supstrat, generirao je malo površinsko otjecanje, kao i neznatnu eroziju površinskim ispiranjem. Nasuprot, hidrofobni supstrat je erodiran površinskim ispiranjem i erozijom vodom zbog učestalijeg i intenzivnijeg površinskog otjecanja. Također promjena iz hidrofilnih uvjeta zimi do iznimno hidrofobnih tijekom ljeta, uzrokovala je povećanje koeficijenata otjecanja s maksimalnih vrijednosti 0,2 zimi do 1,0

ljeti, za *Tertiary* supstrat. U konačnici, studija je pokazala da je RTV dinamično svojstvo, promjenjivo u prostoru i vremenu.

Slika 5. sažima istraživanja raznih studija (Bisdom i sur. 1993., DeBano 2000., Riling 2005.) da je RTV uzrokovana različitim hidrofobnim organskim česticama u tlu, koje imaju različito podrijetlo postanka te mnogobrojne čimbenike utjecaja. Također, repelentnost tla za vodu ima mnogobrojne učinke na razne procese koji se odvijaju u tlu. Posljednjih godina provedena su mnoga istraživanja s ciljem što boljeg shvaćanja RTV. Primjerice, utjecaj RTV na površinsko otjecanje i gubitak hranjiva istraživan je u radu Müller i sur. (2018.). Na neporušenim uzorcima, prikupljenim s RTV tala, korišteni su prijenosni simulatori oborina. Jedan dan prije jednosatne simulacije s obrokom oborina od 60 mm/h, aplicirana je količina od 45 kg P/ha superfosfata. Utjecaj RTV je izmjeren tako da su uspoređivani volumeni otjecanja i gubitaka hranjiva prilikom apliciranja obroka. Aplicirane tekućine bile su voda i mješavina tekućina (etanol i voda). To je učinjeno radi usporedbe s obzirom na to da je etanol potpuno vlažeća tekućina. Također, istraživana je pretpostavka da će se hidrofobne čestice prilikom uzastopne aplikacije obroka na isti uzorak tla isprati i samim time smanjiti ili u potpunosti uništiti RTV. Dinamika otjecanja je prikazana jednostavnim dodavanjem bojila prilikom aplikacije vode. Prilikom prvog pokusa, 88% aplicirane vode se pokazalo kao otjecanje, suprotno od mješavine etanola s vodom gdje nije bilo otjecanja, što je jasno ukazivalo da je RTV odgovorno za otjecanje vode u uzorku tog tla. Uzastopnim simulacijama, otprilike 23% apliciranog fosfora je uočeno u otjecanju prilikom prvog obroka, dok je ukupan gubitak fosfora nakon 10 uzastopnih obroka, iznosio otprilike 30% primijenjenog fosfora. To potvrđuje da se gubitak hranjiva može povezati s RTV i pojavnosti otjecanja. Nakon 10 uzastopnih obroka, aktualna i potencijalna postojanost hidrofobnih materijala u uzorcima tla koji su vlaženi je značajno smanjena ($p<0,5$). Međutim, postojanost potencijalne RTV je i dalje okarakterizirana kao velika, sugerirajući samo neznačajne gubitke hidrofobnog materijala s površine tla. Zaključeno je da je RTV nužno uključiti kao važan faktor prilikom hidrauličkog modeliranja te također u modele pronosa tvari kako bi se naglasio rizik kontaminacije površinske vode s vanjski apliciranim tvarima u tla repelentima za vodu.

Nadalje, ovisnost između RTV i sadržaja vode u tlu uzrokovana je vezanjem djelomično hidrofobnih čestica organske tvari tla s mineralnim česticama u tlu (DeBano 1981.). Prema Chau i sur. (2014.) RTV uzrokuje smanjenje sadržaja vode u tlu kao i veće površinsko otjecanje i smanjenu produktivnost eko-sustava. Istraživana je veza između intenziteta RTV i njezine postojanosti uz određivanje kritičnog sadržaja vode. Mjerenja su provedena na uzorcima 13 tala na području Kanade. Intenzitet RTV je određen mjerenjem promjene dodirnih kuteva vode i tla kroz vrijeme korištenjem WDPT metode (Slika 6.). Kritični sadržaji vode za tla određeni su tako što su mjereni dodirni kutevi vode i tala (s prethodno određenim sadržajem vode, 20% kg $kg^{-1}$ - dobiven sušenjem u pećnici). Kritični sadržaj vode omogućio je određivanje postojanosti RTV prilikom različitih sadržaja vode u tlu. To je iznimno važno prilikom predviđanja scenarija otjecanja prilikom različito učestalih i

intenzivnih događaja oborina u tlima repelentnima za vodu. Rezultati su pokazali da je 8 uzoraka tla imalo određeni stupanj (intenzitet) RTV, od kojih se 6 pokazalo kao jako repelentima. Kritični sadržaj vode varirao je od 0% do više od 19%. Četiri razvojna pravca su promatrana prilikom određivanja kritičnog sadržaja vode prilikom promjene dodirnog kuta kao funkcije sadržaja vode. Primjerice, kada bi se sadržaj vode na uzorcima tala gdje je početni kritični sadržaj vode bio 0% povećao, stupanj repelentnosti (ili dodirni kut vode s površinom tla) drastično bi pao do 0°. To pokazuje da je repelentnost vrlo reverzibilna, te kada je tlo vlažno svojstvo repelentnosti brzo nestaje. Utvrđeno je da veliki intenzitet (dodirni kut) RTV ne znači nužno i dugotrajnu postojanost ili veliki kritični sadržaj vode u tlu.



Slika 6. Foto prikaz kapljice vode zadržane na površini neporušenog hidrofobnog uzorka prilikom WDPT testa (lijevo) i MED (prilagođeni) test na porušenom uzorku (desno)

Schwen i sur. (2015.) su dokazali veliki utjecaj klimatskih čimbenika na RTV odnosno na hidrauličke parametre tla (HPT). Proveli su pokus u šumi bukve (*Fagus silvatica L.*) i smreke (*Picea abies L.*), na pokusnim varijantama koje su zaštitili od oborina (pomoću konstruiranih krovova) te su ih umjetno navodnjavali – s ciljem simuliranja različitih klimatskih scenarija. Dvije varijante su bile pod različitom redistribucijom oborina (umjerene i jake oborine) koje su usporedili s kontrolnom varijantom. Simulirani su duži sušni periodi (bez oborina) te potom kratki periodi s intenzivnim oborinama. Potencijalna RTV je određena pomoću dodirnih kuteva vode i tla (WDPT), a stvarni stupanj repelentnosti je dobiven neposrednim određivanjem pomoću infiltracijskih pokusa izvedenih s vodom i etanolom. Rezultati su pokazali da se RTV povećavao prilikom redistribucije oborina. Stupanj dodirnih kuteva je pozitivno korelirao sa sadržajem organskog ugljika i dušika kao i relativne količine hidrofobnih grupa u organskom sadržaju, a negativno sa C/N omjerom. Razlike između internih i stvarnih HPT su se povećale prilikom produžavanja sušnog perioda (bez oborina). Dodirni kut vode i tla odgovarao je ulaznoj vrijednost zraka (inverzno od Van Genuchtenovog parametra $\alpha$).

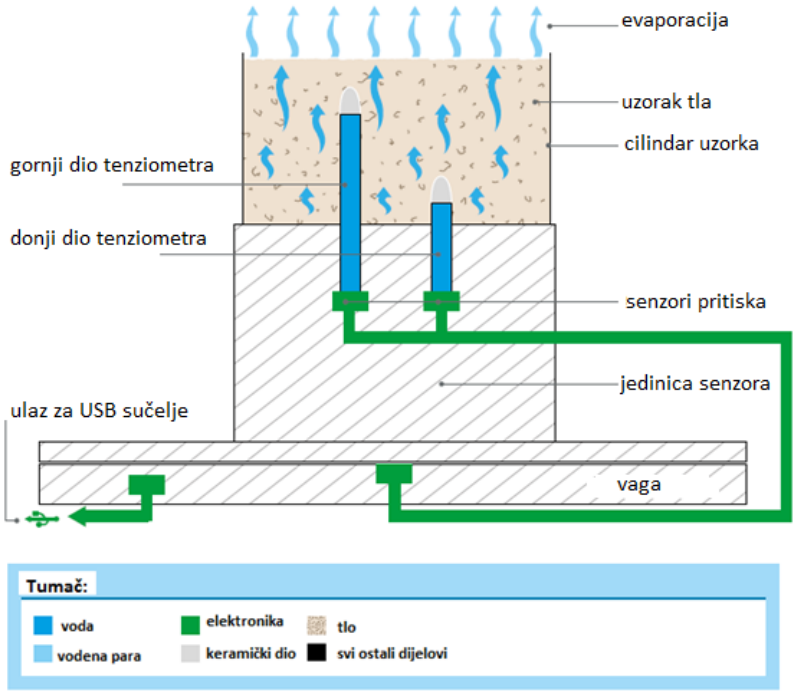
Jarvis i sur. (2008.) su proveli istraživanje utjecaja RTV na preferencijalni tok vode i transport tvari kroz makropore prisutne u tlima s izraženom strukturom. Provedena su mjerenja

infiltracije i transporta tvari u glinovitom tlu prilikom gotovo potpune saturiranosti tla vodom. Korišten je tlačni infiltrometar na terenu, i u laboratoriju na neporušenim uzorcima kolona s tlom. Mjerenja su provedena na tlima sa zatravljenom površinom i oraničnim tlima bez vegetacije. Terenska mjerenja brzine infiltracije s vodom i etanolom (infiltracijske tekućine) pokazala su da je makroporoznost kod zatravljenog tla bolje razvijena, međutim struktura pora u tlu nije imala utjecaja zbog RTV. S druge strane, RTV nije bila prisutna na oraničnom tlu. Pokus poroznosti tla s primjenom bojila (eng. tracera) pokazao je da se vodljivost bila najveća u porama nastalih djelovanjem glista na travnatom tlu odnosno šupljinama nastalim obradom na oraničnom tipu tla. Krivulje provodljivosti mjerene prilikom suhih uvjeta tla ukazuju na ubrzan transport u makroporama tala uzetim s oba područja ispitivanja, iako se stupanj prilikom preferencijalnog transporta pokazao većim na travnatom području. Rezultat se objašnjava utjecajem RTV prisutnog kod zatravljenog tla, a također je u skladu s terenskim infiltracijskim rezultatima. Zaključno, RTV u strukturnim glinovitim tlima može imati značajan utjecaj na pojavu preferencijalnog transporta vode i tvari u makroporama.

### 1.2.4. Modeliranje na temelju infiltracijskih mjerenja i inverzno modeliranje

Danas, za numeričke modele možemo reći da su postali standardni „alati“ za analizu problema toka vode (i transporta različitih tvari, npr. onečišćivača) u tlu. Uslijed različitih terenskih uvjeta, novija istraživanja su dokazala da se modeliranje pokazalo kao dobar „alat“ prilikom analize ali i predviđanja određenih klimatskih i okolišnih scenarija (Šimůnek i sur. 2016., Filipović i sur. 2018.). HYDRUS-1D i HYDRUS (2D/3D) su kompjuterski softverski programi koji omogućuju modeliranje jedno-, dvo- ili tri-dimenzionalnog kretanja vode, topline i raznih tvari u promjenljivo saturiranom mediju (tlu). U radu Šimůnek i sur. (2016.) opisana je cijela povijest razvoja programa kao i pripadajućih alata kao što su STANMOD, RETC, ROSETTA, UNSODA, UNSATCHEM, HP1 i drugi. Navedeni programi su tijekom godina korišteni u više od 850 (HYDRUS-1D) odnosno 550 (HYDRUS 2D/3D) znanstvenih radova, a razlog tomu je mogućnost njihove primjene u širokom području (Šimůnek i sur. 2016.). Primjerice, možemo ih primijeniti u agrotehničkim mjerama kao što su optimizacija različitih shema navodnjavanja, utjecaja biljaka na sadržaj vode u tlu (ili modeliranje oscilacija podzemne vode, nadalje, za razne primjene u okolišu simulirajući transport raznih tvari (salinizacija, pronos nitrata, teških metala, pesticida itd.), kao i za određivanje utjecaja korištenja zemljišnih resursa i okolišnih promjena (detaljnije na https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-3d#k2). 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. Matematički modeli su konceptualni opisi ili aproksimacije koje opisuju fizički sustav koristeći

matematičke jednadžbe te kao takvi nisu egzaktni opisi nekog fizičkoga sustava ili procesa (Mustać 2015.). Koliko će te predikcije biti točne odnosno primjenjive u realnim uvjetima ovisi o tome koliko matematičke formule mogu aproksimirati fizički sustav koji se modelira. Specifični procesi u djelomično saturirano i saturiranoj zoni tla se mogu predvidjeti i opisati pomoću modela toka vode. Prema Filipoviću (2015.) dva hidraulička parametra moraju biti poznata za rješavanje jednadžbe odnosno simuliranje toka vode u nesaturiranom tlu: relativna količina vode u tlu (parametri retencijskih krivulja tla) i hidraulička provodljivost tla (parametri krivulje hidrauličke provodljivosti). Za određivanje hidrauličkih parametara tla u novije vrijeme koristi se potpuno automatizirani sustav HYPROP (HYdraulic PROPerty analyser) Ukratko, HYPROP mjeri vodni potencijal tla u ovisnosti sa sadržajem vode („retencijska krivulja“/“pF/WC krivulja“) uzorka tla (UMS 2015., Slika 7.).




Slika 7. Shema HYPROP sustava za mjerenje retencijskih krivulja i određivanje hidrauličkih parametara tla
Izvor: prilagođeno prema Hyprop manual (UMS 2015.)

Ovaj sustav mjerenja koristi se Schindlerovom metodom, koja se bazira na mjerenju razlike u težini uzorka i matričnog (vodnog) potencijala u uzorku tla tijekom procesa sušenja evaporacijom. Izmjereni podaci potom se unose i analiziraju pomoću HYPROP-FIT softvera. Navedeni softver omogućuje analizu podataka dobivenih evaporacijskim eksperimentom i podešavanje hidrauličkih karakteristika u nesaturiranim tlima (Peters i Durner 2006., Peters i sur. 2015., HYPROP-FIT 2016.). HYPROP je korišten u istraživanju Schindler i sur. (2010.). Bazirano na izmjerenim podacima vodnog potencijala, sadržaja vode i toka odredili su funkciju retencije vode i hidrauličke (nesaturirane) provodljivosti. Unaprijeđenim tenziometrima (HYPROP), koji su otporniji na kavitaciju, uspjeli su izmjeriti puno veće

vrijednosti vodnog potencijala tla nego li je to bilo moguće konvencionalnim tenziometrima (90kPa kod konvencionalnih nasuprot maksimalnih 435 kPa kod poboljšanih). Eksperimentalni rezultati i simulacija kretanja vode u tlu potvrdili su ispravnost pretpostavke linearizacije, čak i na suhom kraju gdje se pojavljuju nelinearni profili napetost – dubina. Također, primjena evaporacijske funkcije kao dodatak uz često vaganje smanjuje troškove opreme i povećava efikasnost metode.

S obzirom na to da RTV utječe na hidrauličke karakteristike tla kao i na pojavu preferencijalnih tokova, površinskog otjecanja i mnogih drugih pojava u tlu, te također da su tla sa smanjenom mogućnošću vlaženja više pravilo nego iznimka, do sada su mnoga istraživanja posvećena određivanju HPT u tlima repelentnima za vodu s ciljem dobivanja što boljih modela opisivanja i simulacija navedenog. Primjerice, Diamantopoulos i sur. (2013.) su proveli istraživanje utjecaja RTV na hidrauličke parametre tla (HPT) koje je uključivalo nekoliko pokusa infiltracije/otjecanja vode i etanola u 4 različita supstrata, od kojih su 2 bila izrazito hidrofobna (mješavine tla i različite količine hidrofobnog materijala). Pokusi su provedeni prilikom početno saturiranih ili početno suhih uvjeta, kako bi uzeli u obzir efekt histereze. Za dobivanje HPT korišteno je inverzno određivanje parametra. Rezultati su pokazali da RTV utječe na HPT prilikom vlaženja, doprinoseći efektu histereze, te da su mješavine tla s većim udjelom hidrofobnog materijala imale veći utjecaj RTV na HPT usporedno s ostalim supstratima (uzorcima tla) koji su korišteni u istraživanju, a imali su određeni stupanj hidrofobnosti.

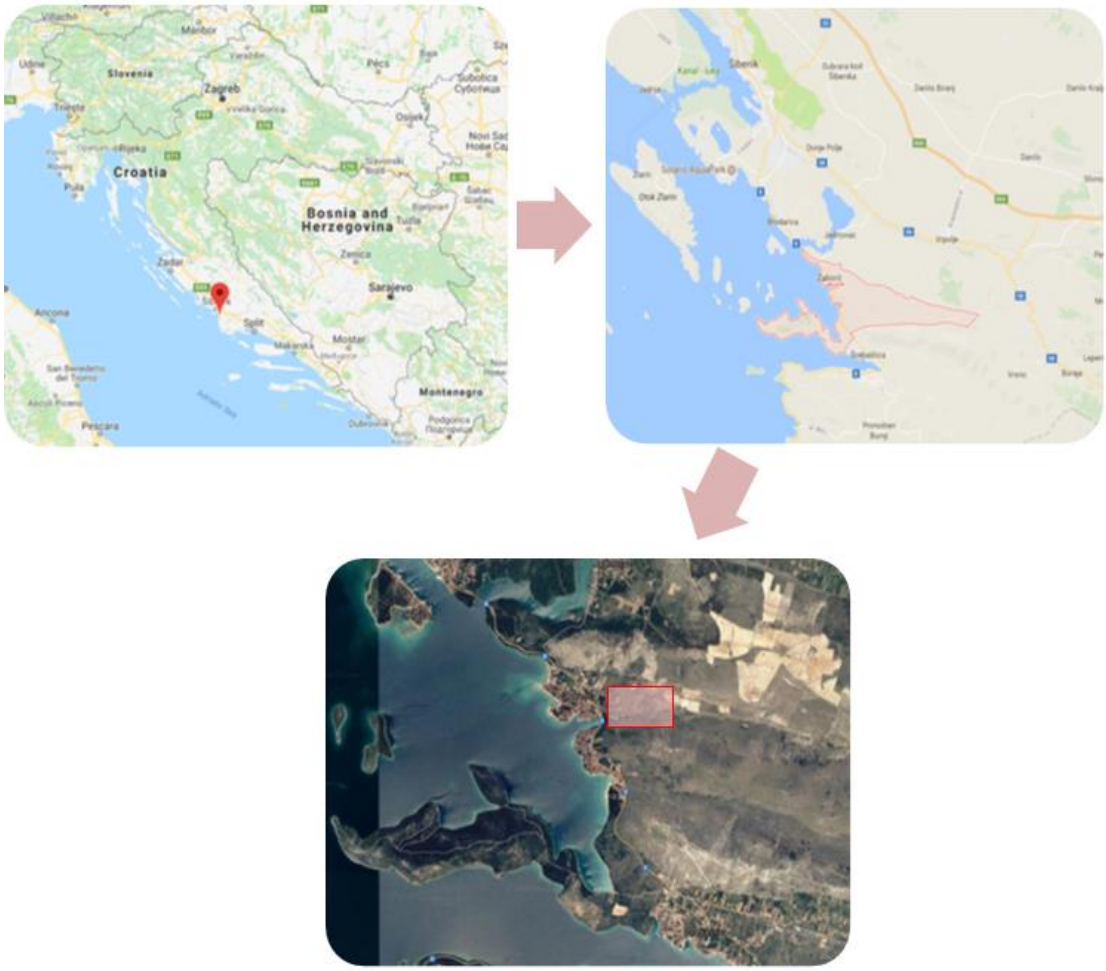
Nadalje, numeričke simulacije i modeliranje koristimo zato što je: (a) provedba nekih eksperimenata nemoguća (životni ciklus zvijezda, vremenske prognoze itd.), (b) provedba nepoželjna (lavine, nuklearni testovi, medicina), (c) provedba skupa i vremenski zahtjevna (svojstva novih materijala, biomolekularne simulacije) i (d) provedba eksperimenata često je skuplja negoli simulacija (aerodinamika, testovi auto sudara). S obzirom na to da kvalitetan model transporta u tlu uzima u obzir jako veliki broj parametara tla (klimatski podaci, hidrauličke karakteristike tla, rubni uvjeti i prostorne domene) mnogobrojna istraživanja su provedena u svrhu kalibracije novih modela. U istraživanju Bachman i sur. (2007a) predložen je novi model, koji se bazirao na pretpostavci o ovisnosti dodirnog kuta vode i površine tla sa sadržajem vode u tlu i temporalnim promjenama, a korišten je kao nadogradnja na van Genuchtenovu jednadžbu (jed. 4.) za opis kapilarno saturacijskih odnosa u tlu. Model za nesaturirana hidrofobna tla uzimao je u obzir vlagu u ovisnosti o svojstvima vlaženja, pozitivni tlak ulaska vode za hidrofobno područje tla, i dodirni kut koji je ovisan o vremenu, često nazivan i postojanost RTV. Usporedno s konvencionalnim modelima, još nekoliko parametara je uzeto u obzir za opisivanje nadograđenog modela vlaženja: srednja maksimalna i minimalna vrijednost dodirnog kuta (DK) i njihov međusobni odnos. Također, kvantifikacija vremena ponovnog vlaženja tla i funkcija promjene vodnog potencijala tla potrebni su za potpuni opis hidrauličkih svojstava tla. Potom, koristeći prethodni model, simuliralan je jedan ciklus sušenja-vlaženja u profilu tla (šumsko područje) (Bachman i sur.

2007b.) Cilj takve simulacije bio je opisati kretanje vode u hidrofobnim uvjetima tla koristeći jednostavne tehnike parametriziranja opisa strukture tla. Korišteni su pojednostavljeni klimatski scenarij koji je uključivao produženi sušni period te potom intenzivni period vlaženja. Infiltracija vode u takvom pokusu pokazala je zone distribucije, preferencijalnih tokova i redistribucije. Prilikom ponovnog vlaženja, tok vode putem preferencijalnih puteva se širio na matriks tla. Također, analizirana je osjetljivost simuliranog toka vode prema različitim parametrima vlaženja. Preferencijalni tokovi su se formirali gdje je prosječni maksimalni DK bio velik (≥ 90°). Raspon kritičnog sadržaja vode i stupanj heterogenosti pora također utječe na poticanje i stabilnost preferencijalnih tokova vode u tlu. Infiltracija u zonu korijena biljke kao i procjeđivanje izvan profila tla su iznimno osjetljivi s obzirom na stupanj i postojanost RTV. Rezultati su pokazali da veći stupanj RTV dovodi do manje infiltracijske brzine u zonu korijena kao i samo zaobilaženje vode kraj zone korijena. Iako se ovaj model pokazao dobar za kvalitetno prikazivanje dinamike vode koja je promatrana, autori naglašavaju da su potrebna dodatna istraživanja, primjerice, ovisnost sadržaja vode prema repelentnosti tla za vodu da bi model bio kvantitativno učinkovit.

Najnovije istraživanje na području modeliranja dinamike vode u tlu uzima u obzir pojavu preferencijalnog toka u hidrofobnim tlima. Brown i sur. (2018.) razvili su model odnosa vode i tla baziran na fizikalnim načelima, s ciljem jednostavne funkcionalne metode prilikom parametrizacije kako bi se odredila dinamika u strukturnim tlima i prikazalo vremenski promjenljive stupnjeve hidrofobnosti. Model, WEIRDO (Water Evapotranspiration Infiltration Redistribution Drainage runOff), je razvijen na APSIM platformi novije generacije (Agricultural Production Systems sIMulation) koji radi na vremenskim razmacima mjerenim u satima. Baza podataka koda je otvorenog tipa i nalazi se na sljedećem linku https://github.com/APSIMInitiative/ApsimX. Model omogućuje jednostavno uklapanje s modelima prinosa kultura, okolišnog upravljanja kao i klimatskim modelima te osigurava sučelje za jednostavno postavljanje, izvođenje i vizualizaciju simulacija. Radi se o slojevitom modelu odnosa vode i tla osmišljenog za bilježenje fenomena preferencijalnih tokova i utjecaja hidrofobnost, koji su često promatrani ali ne i zabilježeni u mnogim sličnim modelima. Detaljni testovi su provedeni kako bi se prikazale simulacije infiltracije, drenaže, redistribucije, transpiracije i evaporacije izvedene WEIRDO modelom na tri izrazito teksturno različitim tlima prikazujući različite hidrauličke karakteristike. Prikazano je kako procesi preferencijalnih tokova i hidrofobnost određuju prostorno-privremene uzorke dinamike vode u tlu. WEIRDO model je provjeren tako da su uspoređivali predviđanja dobivena tim modelom s trogodišnjim mjerenjima sadržaja vode na navodnjavanom pokusnom području. Tri različita scenarija su provedena: bez navodnjavanja, navodnjavanje dva puta tjedno kao zamjena za evapotranspiracijske gubitke, i navodnjavanje svaka tri tjedna. Pokus je detaljnije objašnjen u radu Michel i sur. (2014). Rezultati su pokazali dobru učinkovitost modela prilikom predviđanja dinamike vode u tlu za strukturna tla.

# 2. Materijali i metode

Infiltracijski pokus je proveden na lokaciji Žaborić u blizini Šibenika tijekom mjeseca rujna 2016. (Slika 8.), nakon šumskih požara koji su se javili u srpnju 2016. godine. Zemljopisne koordinate lokacije pokusa su: 43° 39’ 39.6” N, 15° 56’ 49.2” E. Lokacija istraživanja je izabrana zbog intenziteta požara i blizine meteoroloških podataka koji su prikupljeni s pokusnog polja Jadrtovac.

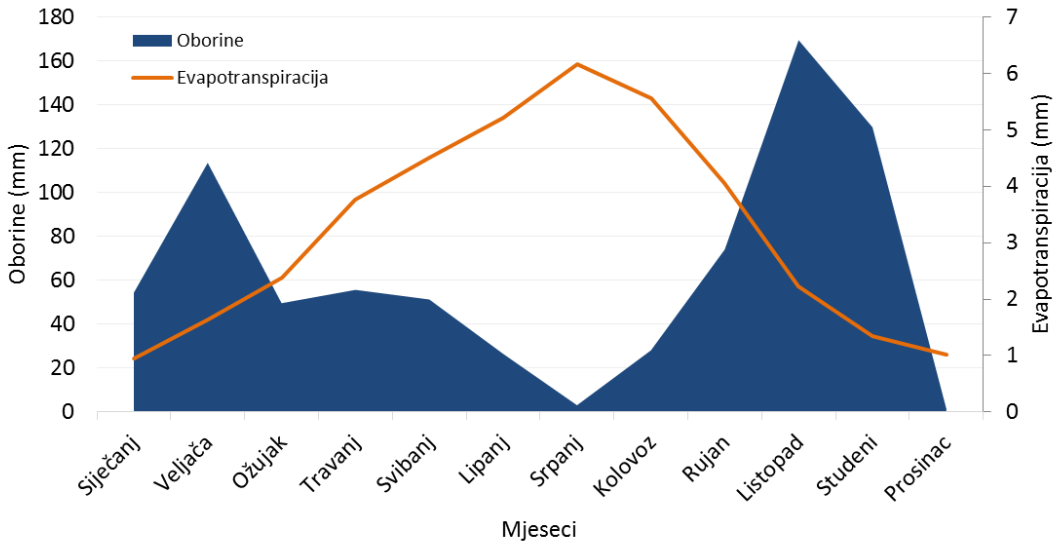



Slika 8. Prikaz lokacije uzorkovanja - Žaborić u blizini Šibenika
Izvor:https://www.google.at/maps?q=croatia&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=0ahUKEwj79eHutNDaAhXLF5oKHdKLCeoQ_AUIDCgD

Mjerenja klimatskih podataka, kao što su: temperatura (°C), vlaga zraka (%), brzina vjetra (m/s), vlaga lista (%), rosište (°C) i oborine (mm) (Tablica 1. i slika 9.), provedena su pomoću Pinova meteo stanice (detaljnije na: http://pinova.hr/hr_HR/). Navedeni parametri su mjereni na dnevnoj bazi i kasnije korišteni prilikom jednogodišnje simulacije (HYDRUS-1D).

Tablica 1. Korišteni klimatski parametri prilikom simulacije u HYDRUS 1D softverskom programu - prikazani na mjesečnoj i godišnjoj prosječnoj razini osim za parametar oborina gdje je prikazana kumulativna mjesečna vrijednost

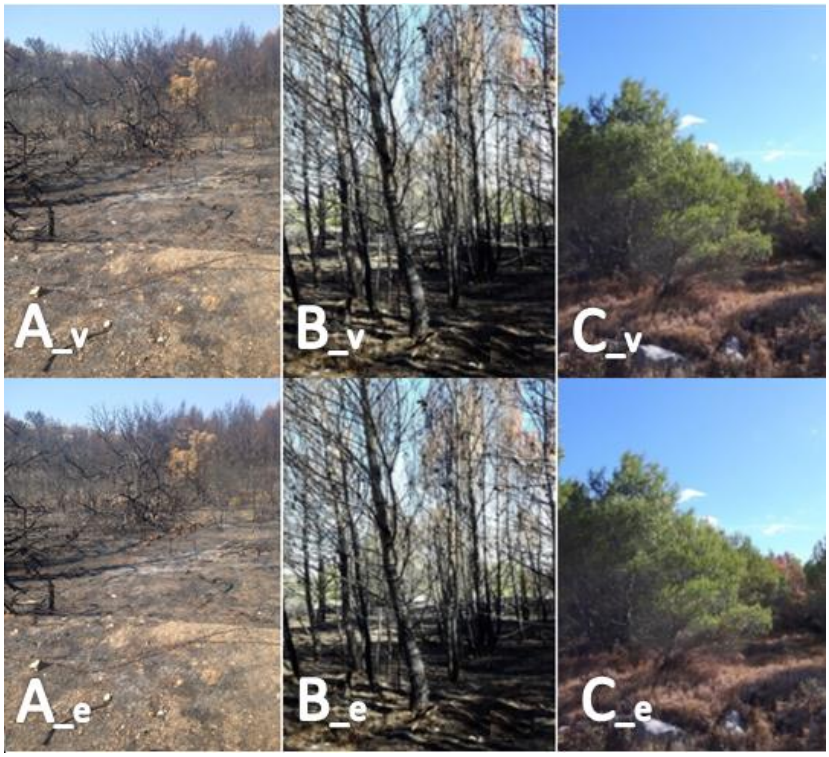
| Mjesec | Oborine (mm) | Temperatura zraka (°C) | Temperatura tla (°C) | Vlaga zraka (%) |
|---|---|---|---|---|
| Siječanj | 54.4 | 7.4 | 6.7 | 74.1 |
| Veljača | 113.6 | 10.9 | 9.7 | 76.7 |
| Ožujak | 49.6 | 10.7 | 10.3 | 70.9 |
| Travanj | 55.7 | 15.6 | 15.3 | 63.1 |
| Svibanj | 51.3 | 17.9 | 17.9 | 67.2 |
| Lipanj | 26.5 | 22.8 | 23.3 | 69.1 |
| Srpanj | 3.1 | 26.3 | 26.9 | 57.3 |
| Kolovoz | 28.1 | 24.2 | 25.4 | 61.7 |
| Rujan | 74.1 | 20.8 | 22.1 | 66.7 |
| Listopad | 169.5 | 15 | 15.7 | 72.6 |
| Studeni | 129.8 | 11.6 | 11.8 | 75.4 |
| Prosinac | 1.4 | 6.9 | 7.1 | 63.7 |
| Godišnji prosjek | 63.1 | 15.8 | 16.0 | 68.2 |




Slika 9. Kumulativne mjesečne vrijednosti oborina (mm) kroz 2016. godinu za pokusno područje Žaborić preuzeto s klimatske stanice postaje Pinova (Jadrtovac) prikazane tamnoplavom bojom te mjesečne vrijednosti evapotranspiracije (mm) za područje Žaborić izračunato pomoću kompjuterskog softvera CROPWAT 8.0 (Monteith J.L. 1981., CROPWAT) prikazane narančastom krivuljom

Prilikom istraživanja izabrane su tri lokacije (Slika 10.): jako opožareno tlo (A), opožareno tlo (B), kontrolno tlo (C). A lokacija je odabrana radi neposrednog jakog požara, na B lokaciji su bili vidljivi tragovi karbonizacije nasuprot C lokacije gdje nije bilo požara. Na odabranim lokacijama uočene su manje pedološke varijacije s obzirom na elevaciju terena i prijelaz između šumskog/poljoprivrednog zemljišta. Kako bi usporedivost rezultata bila osigurana lokacije su bile udaljene svega nekoliko metara na približno istoj elevaciji (koliko je to bilo moguće s obzirom na pojavnost požara). Prilikom same provedbe su uzeti uzorci u neporušenom stanju – u cilindrima od 250 $cm^3$ u dva ponavljanja za procjenu hidrauličkih

parametara u laboratoriju. Hidraulički parametri tla (retencijske krivulje tla)su izmjereni pomoću HYPROP sustava na temelju evaporacijske metode (poglavlje 1.2.4). Dobiveni podaci kasnije su obrađeni u HYPROP-FIT i Microsoft Excell programima.




Slika 10. Foto prikaz lokacija izvođenja infiltracijskog pokusa na tri različite lokacije gdje je A - jako opožareno tlo, B - opožareno tlo i C - kontrola odnosno bez požara; index - _v označuje infiltracijski pokus s vodom dok se - _e odnosi na pokus izveden s etanolom kao infiltracijskom tekućinom
Foto: Filipović Vilim, Žaborić, 2016.

Lokacija istraživanja bila je udaljena 500 metara od lokacije profila tla uslijed ovisnosti lokacije istraživanja o požarima. Stoga, karakteristike profila tla na tom području uzete su samo radi procjene hidrauličkih parametara dubljih horizonata tla. Tlo se može prema klasifikaciji tala Hrvatske svrstati u razred Rezidualna kambična tla uz građu profila A-(B)r-R. Obilježava ga visoki udio skeleta, izražena stjenovitost i plitka dubina. Ispod rezidualnog kambičnog horizonta nalazi se slabo razdrobljena ili/i kompaktna stijena, kao i krupno kamenje. Općenito se može ustvrditi da su ova tla izrazito skeletoidna do skeletna, te pretežno plitka. Od pojedinih frakcija skeleta i kod ovih tala dominira frakcija čestica preko 25 mm. Tekstura sitnice je praškasto glinasto ilovasta a stabilnost strukturnih agregata je povoljna. Reakcija tla (pH) sitnice je neutralna (osim sitnih ulomaka skeleta koji je naravno karbonatan) s povoljnim sadržajem humusa i opskrbljenošću fiziološki aktivnim kalijem, te s neznatnim sadržajem fiziološki aktivnog fosfora. Ova tla obilježava izražena vodopropusnost te zbog velikog sadržaja skeleta mali kapacitet tla za vodu kao i vrlo mali kapacitet fiziološki aktivne vode. Važnije karakteristike uzorkovanog tla prikazane se u tablici 2. (Romić i sur. 2015.).

Tablica 2. Osnovne karakteristike uzorkovanog tla na lokaciji Žaborić - Smeđe tlo na vapnencu, tipično, plitko, skeletno do pretežno skeletno u dubljoj zoni, stjenovito; *PrGl=praškasto-glinovita ilovača; $r_v$=volumna gustoća tla; $r_č$=gustoća čvrste faze tla; P=ukupan sadržaj pora u tlu; Kv=retencijski kapacitet tla za vodu; Kz=retencijski kapacitet tla za zrak; Hidroped.konstante: Kv=kapacitet tla za vodu; Tv=točka venuća; FAv=fiziološki aktivna vlaga;
Izvor: Romić i sur. 2015.

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ukupan sadržaj skeleta i sitnice | Dubina cm | % udio skeleta, promjera u mm | | | | | | Ukupni skelet % | Ukupna sitnica % |
| | | >25 | 18-25 | 12,5-18 | 8-12,5 | 4-8 | 2-4 | | |
| | 0-12 | 79,1 | 10,0 | 7,8 | 2,6 | 0,5 | 0,0 | 53,6 | 46,4 |
| | 12-50 | 91,0 | 2,0 | 1,0 | 1,0 | 3,0 | 2,0 | 95,5 | 4,5 |
| Mehanički sastav tla u sitnici | | Mehanički sastav tla u Na-pirofosfatu, %-ni sadržaj čestica,promjera u mm | | | | | | Teksturna oznaka* | |
| | | Krupni pijesak | Sitni pijesak | Krupni prah | Sitni prah | Glina | | | |
| | | 2,0-0,2 | 0,2-0,063 | 0,063-0,02 | 0,02-0,002 | <0,002 | | | |
| | 0-12 | 2,0 | 2,5 | 20,6 | 36,8 | 38,1 | | PrGl | |
| | 12-50 | 3,6 | 4,5 | 21,3 | 36,5 | 34,1 | | PrGl | |
| Fizikalne značajke tla | | $r_v$ g/$cm^3$ | | $r_č$ g/$cm^3$ | P vol % | Kv vol % | Kz vol % | | |
| | 0-12 | 0,95 | | 2,39 | 59,9 | 33,3 | 16,8 | | |
| | 12-50 | 1,51 | | 2,46 | 28,2 | 20,4 | 25,1 | | |
| Kemijske značajke tla | | Reakcija tla (pH) | | $CaCO_3$ | CaO | Humus | $P_2O_5$ | $K_2O$ | |
| | | $H_2O$ | KCl | % | % | % | mg/100g tla | | |
| | 0-12 | 7,41 | 6,49 | - | - | 9,5 | 0,5 | 34,3 | |
| | 12-50 | 8,02 | 7,27 | 14,30 | 2,3 | 5,47 | 0,17 | 38,78 | |
| Hidropedološke konstante tla | | Kv | | Tv | Fav | Fav | | | |
| | | vol.%-pF korig.na udio sitnice | | vol. % | vol. % | vol % korig.na udio sitnice | | | |
| | 0-12 | 33,3 | | 5,9 | 14,0 | 6,4 | | | |
| | 12-50 | 20,4 | | 1,3 | 22,7 | 1,4 | | | |

Hidrauličke karakteristike tla opožarenih područja moguće je procijeniti pomoću mjerenja infiltracije primjenom vode i etanola i usporedbom razlika između dobivenih brzina infiltracije (objašnjeno niže u tekstu). Mjerenja infiltracije su provedena tijekom listopada 2016. na sve tri lokacije. Mjerenje je izvedeno tlačnim infiltrometrom s rezervoarom od 3000 ml (Decagon 2016.) pri tlakovima od -1, -0,7, -0,3, -0,1 kPa (Slika 11.). Princip mjerenja je bio sličan kao i u studiji White i sur. (1992.). Infiltrometar je pripremljen standardnim postupkom, a prije samog izvođenja mjerenja infiltracije, organski ostaci s površine su uklonjeni kako bi bilo osigurano da se mjerenja izvode na samome vrhu prvog horizonta tla. Također, da bi se osigurao dobar hidraulički kontakt između tla i poroznog diska infiltrometra postavljene su staklene kuglice (Dragonite Jaygo Inc.; ø = 0,45 mm). Voda se u tlo infiltrira pomoću metalnog (poroznog) diska a sila usvajanja odgovara postavljenom tlaku. Podaci o razini tekućine u stupcu infiltrometra su bilježeni kroz vrijeme kako bi mogli odrediti ukupnu količinu infiltrirane tekućine u tlo. Dobiveni podaci kasnije će biti korišteni za inverzno određivanje hidrauličkih parametara (postupak je opisan niže u poglavlju).



Slika 11. Terensko izvođenje pokusa infiltracije uz kontinuirano praćenje količine vode u tlu pomoću sonde TDR300 (FieldScout, Spectrum Technologies, Inc.) na lokaciji Žaborić
Foto: Filipović Vilim, Žaborić, 2016.

Tijekom infiltracijskog pokusa voda i etanol su korišteni zbog razlika u viskoznosti i specifičnoj gustoći. Naime, viskoznost (η) vode (η= 1,0 mPa) i etanola (η = 1,2 mPa) rezultira različitim infiltracijskim vrijednostima volumena tekućina. Kako bi se dva infiltracijska pokusa mogla uspoređivati bilo je nužno izvršiti korekcije infiltracijske vrijednosti etanola koristeći faktor 1,2 (Jarvis i sur. 2008., Schwen i sur. 2015.). To je učinjeno zbog različitih fizikalno-kemijskih svojstva vode i etanola. Vrijednosti vodnog potencijala za etanol kalibrirane su

prema jednadžbi kapilarnog porasta koja uzima u obzir razliku u površinskoj napetosti i gustoći određenih tekućina:

$$h_{i=} \frac{2\sigma_i cos\gamma}{r\ \rho_i g} \quad (8)$$

gdje je $\sigma$ površinska napetost (mN m$^{-1}$), $\gamma$ je dodirni kut (°), $r$ je pripadajući radijus kapilare (m), $\rho$ je gustoća tekućine (g cm$^{-3}$), i $g$ je ubrzanje uslijed gravitacije (m$^{-2}$). Donji indeks $i$ označava vodu (v) ili etanol (e). S obzirom na površinsku napetost prilikom 20 °C, koja za vodu iznosi 72,7 (mN m$^{-1}$) odnosno 22,4 (mN m$^{-1}$) za etanol, te gustoći vode od 0,998 (g cm$^{-3}$) i etanola 0,789 (g cm$^{-3}$), određen je korekcijski faktor između $h_e$ i $h_v$ od 2,5 (Diamantopoulos i sur. 2013.). Nadalje, množeći $h_e$ s 2.5 rezultira efektivnom vodnom potencijalu ($h_{e,\ eff}$) dajući primijenjene potencijale za etanol od –2,5, –1,25,–0,75, i –0,25 kPa (koji su korišteni prilikom infiltracijskih pokusa sa etanolom). Navedeni korekcijski faktor pretpostavlja da su dodirni kutevi vode/etanola i površine tla jednaki ($\gamma_v = \gamma_e$), unatoč činjenici da dodirni kut vode na terenu oscilira s vremenom. Također, razlike u dodirnim kutovima odražavaju RTV kroz različite volumene infiltracije za svaku tekućinu i prema tome i na inverzno određene karakteristike tla. Nadalje, mjerenje relativne vlage tla tijekom provedbe pokusa s infiltracijom izvedeno je pomoću sonde TDR 300 (FieldScout, Spectrum Technologies, Inc., Slika 11.). Pomoću senzora na početku i na kraju provedbe svakog mjerenja određena je relativna količina vode u tlu i njezina promjena s obzirom na količinu tekućine dodane infiltracijskim mjerenjima.

Matematičko modeliranje je izvedeno s HYDRUS 2D/3D te 1D modelima (Šimůnek i sur. 2016.) u dva koraka

1. Inverzno modeliranje temeljeno na infiltraciji vode i etanola na terenu – kako bi ustanovili hidrauličke karakteristike tla (HYDRUS 2D/3D);
2. Direktno modeliranje – godišnja simulacija (2016.) – kako bi definirali utjecaj RTV na sadržaj vode u tlu (HYDRUS 1D).

Kako bi odredili hidrauličke karakteristike tla metodom inverznog modeliranja, korišteni su podaci dobiveni mjerenjem infiltracije s vodom i etanolom za sve tri varijante (A, B i C). Numeričko rješenje Richardsove jednadžbe, u kombinaciji s Levenberg-Marquardt nelinearnom minimizacijskom metodom, uvršteno je u HYDRUS (2D/3D) modelu. Program rješava jednadžbu numerički koristeći takozvanu pseudo-trodimenzionalnu ravninu koja koristi jedan presjek i uzima u obzir da je navedena pretpostavka točna za svih 360° prostorne domene. Richardsova jednadžba (poglavlje 1.2.1) je korištena u izmijenjenom obliku (Šimůnek i sur. 1998.):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rK\frac{\partial h}{\partial r}\right) + \left(K\frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (9)$$

gdje je: $\theta$ – relativna količina vode u tlu, [$L^3\ L^{-3}$],
$h$ – vodni potencijal tla (pressure head), [L],
$K$ – hidraulička vodljivost nesaturiranoga tla, [$LT^{-1}$],
$z$ – vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore), [L],
$t$ – vrijeme, [T],
r – radijalna koordinata [L].

Nadalje, jednadžba (9) je objašnjena numerički za početne i granične uvijete koji odgovaraju početnim i graničnim uvjetima pokusa izvedenog s tlačnim disk infiltrometrom:

$$\theta(r,z,t) = \theta_i \qquad t = 0 \quad (10)$$

$$h = (r,z,t) = h_0 \;\; 0 < r < r_0, z = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial h(r,z,t)}{\partial z} = -1\; r > r_{0\,,}\; z = 0 \quad (12)$$

$$h(r,z,t) = h_i \;\; r^2 + z^2 \;\to \infty \quad (13)$$

gdje je: $\theta_i$ – početni sadržaj vode, [$L^3\ L^{-3}$],
$h_0$ – vremenski varijabilna vrijednost vodnog potencijal koji je primijenjen pomoću tlačnog disk infiltrometra za vodu (-1, -0,5, -0,3, -0,1 kPa) i etanol (-2,5, -1,25, -0,75, -0,25 kPa), [L],
$r$ – polumjer diska (polumjer poroznog diska 2,9 cm), [L].

Hidraulička svojstva tla, dobivena numeričkim modeliranjem na temelju volumena infiltracije etanola (optimizirani da odgovaraju fizikalno-kemijskim svojstvima vode), pretpostavljeno je, da odražavaju infiltraciju vode u hidrofilno tlo (kontrolna varijanta).

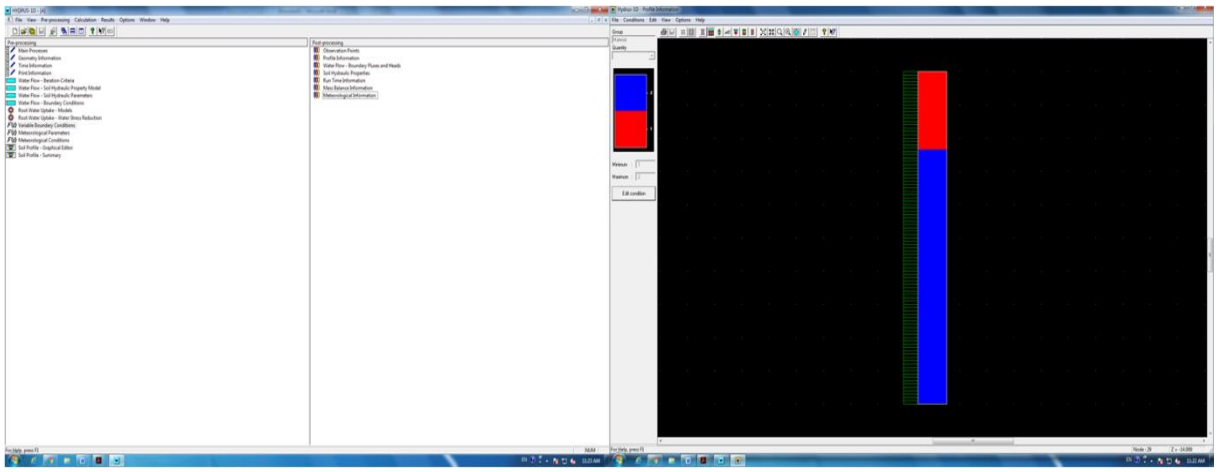
Hidrauličke karakteristike tla *θ(h)* i *K(h)* korištene u inverznim i direktnim simulacijama opisane su van Genuchten-Mualem modelom (poglavlje 1.2.2; jednadžbe 4., 5., 6. i 7.). Parametar povezanosti pora $l$ je postavljen na 0,5 prema Mualem i sur. (1976.) kako bi izbjegli optimiziranje velikog broja parametara. Granični uvjeti za površinu tla ispod diska infiltrometra i preostalu površinu tla su prikazani jednadžbom 11. odnosno 12. Nadalje, jednadžba 13. pretpostavlja da su sve prostorne granice u modelu dovoljno daleko od izvora opskrbe te da ne utječu na konačne rezultate. Inverzno rješenje hidrauličkih parametara tla je dobiveno kombinacijom ukupne infiltracije i promatranog početnog/konačnog sadržaja vode nakon minimizacije svih mogućih varijanata. Simulirana domena je bila širine 15 cm te

20 cm dužine bloka tla s mrežom gustoće 2501 točaka i povećanom gustoćom pri gornjoj granici zbog položaja tlačnog diska odnosno kontakta s površinom tla. Hidraulički parametri ($\theta_r$, $K_S$, $\alpha$ *i* $n$) su u početku određeni pomoću ROSETTA modula koja je ugrađen u HYDRUS program. ROSETTA se bazira na korištenju pedotransfernih funkcija (PTF) koje koriste dostupne osnovne podatke o tlu (tekstura, specifična gustoća tla, itd.) kao prediktore. ROSETTA primjenjuje PTF za predviđanje parametara retencijskih krivulja (Van Genuchten, 1980.) i saturirane hidrauličke provodljivosti. Iako predviđanja od PTF nisu toliko točna kao i mjerenja, postoji mnogo slučajeva kada su dostupne samo ograničene informacije o tlu, u navedenom slučaju su ove vrijednosti bile korištene kao inicijalne vrijednosti prije njihove same optimizacije. ROSETTA slijedi hijerarhijski pristup procjeni parametara (Schaap i sur. 2001.). Pomoću navedene ugrađene funkcije $\theta_r$ parametar nije mijenjan s obzirom na to da su Šimůnek i sur. (1998.) došli do rezultata da taj parametar ima mali utjecaj na simulirane $\theta$ i $h$ parametre kroz vrijeme. Nakon toga, kako bi kalibrirali $K_s$, $\alpha$ *i* $n$ za gornji sloj tla svake varijante (A, B i C), uzete su početne karakteristike od prvog sloja tla 0-12 cm (Tablica 3.) te je izvedeno inverzno modeliranje prema Šimůnek i van Genuchten (1996.).

Tablica 3. Van Genuchten-Mualem (VGM) hidraulički parametri tla dobiveni pomoću PTF unutar HYDRUS 1D programa - ROSETTA, a bazirano prema teksturnom sastavu tla

| Horizont | $\theta_r$ | $\theta_s$ | $\alpha$ | $n$ | $K_s$ | $l$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $cm^3cm^{-3}$ | $cm^3cm^{-3}$ | $cm^{-1}$ | - | $cm^3day^{-1}$ | - |
| 0-12cm | 0.0485 | 0.3904 | 0.0075 | 1.5305 | 11.63 | 0.5 |
| 12-50cm | 0.0916 | 0.4795 | 0.0088 | 1.493 | 11.84 | 0.5 |

Nakon određivanja hidrauličkih karakteristika pomoću infiltracijskih pokusa te potvrde modela usporedbom s terenskim mjerenjima, jednogodišnja simulacija u HYDRUS-1D programu je provedena (slika 12.).



Slika 12. Prikaz prije- i poslije-procesnih podataka (lijevo) te određivanje karakteristika tla (desno) u HYDRUS-1D softverskom programu

Simulacije su izvedene za jednodimenzionalni tok u vertikalnom smjeru koristeći se Richardsovom jednadžbom:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{K(h)\partial h}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z}\right) - S(h) \quad (14)$$

gdje je: $\theta$ – relativna količina vode u tlu,[$L^3\ L^{-3}$],
$h$ – vodni potencijal tla,[L],
$z$ –vertikalna koordinata,[L],
$t$ – vrijeme,[T],
$K$ –hidraulička provodljivost nesaturiranog tla,[$L\,T^{-1}$],
$S$ – količina vode koja biljka usvaja korijenom ,[$L^3\ L^{-3}\ \ T^{-1}$],

Iako se Richardsova jednadžba smatra neprimjenjivom za hidrofobni medij (Diamantopoulos i Durner 2013.), zbog toga što je RTV povratan proces a ne konstantno stanje, neki od klasičnih fizikalnih pristupa su i dalje primjenjivi kada je kritični sadržaj vode premašen. Nadalje, rezultati numeričkih simulacija su uspoređene s terenskim vrijednostim volumena infiltracije pri različitim tlakovima pomoću koeficijenta determinacije $R^2$, korijenske vrijednosti prosječnog kvadrata pogreške (eng. root mean square error, *RMSE* i koeficijenta efikasnosti modela *E*, Nash and Sutcliffe 1970.):

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(S_i-\bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i-\bar{S})}}\right) \quad (15)$$

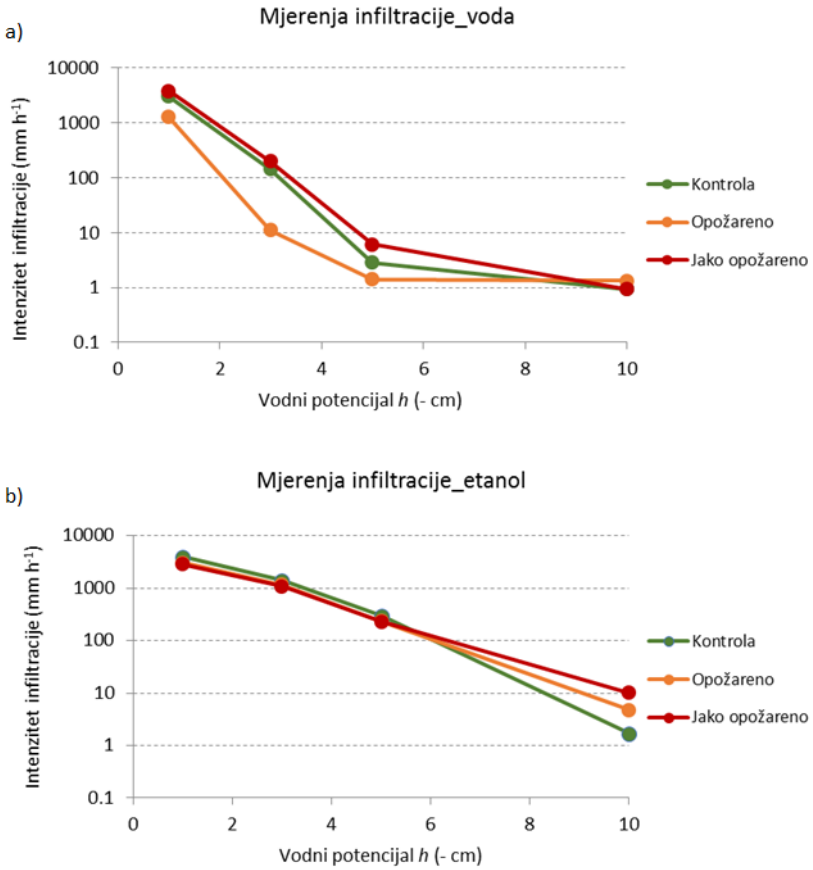
$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}\right]^{0.5} \quad (16)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

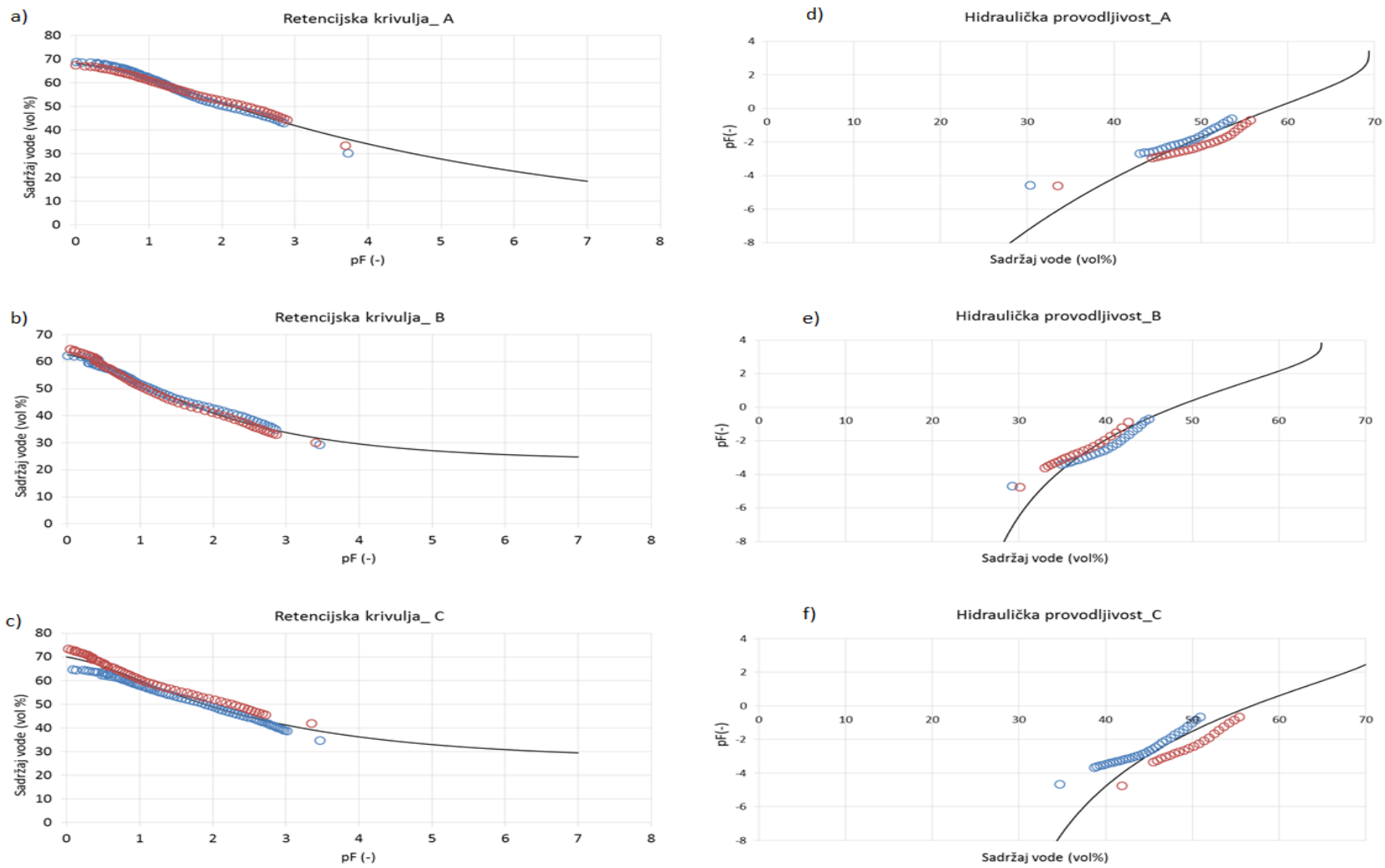
gdje je: $O_i$ – promatrana vrijednost,
$S_i$ – simulirana vrijednost,
$\bar{O}$ – prosjek promatrane vrijednosti,
$\bar{S}$ – prosjek simulirane vrijednosti,
$n$ – broj promatranih/simuliranih točaka.

# 3. Rezultati i rasprava

Usporedbom rezultata pokusa provedenih mjerenja infiltracije s vodom (Slika 13. a)) i etanolom (Slika 13. b)) na jako opožarenom (A), opožarenom (B) i kontrolnom (C) tlu utvrđen je utjecaj povećane temperature uslijed šumskog požara prilikom kojeg je došlo do izgaranja organskih čestica tla i smanjenja infiltracijske sposobnosti tla. Prilikom pokusa s vodom, kod vodnog potencijala od oko -5 cm, infiltracijska razina znatno je smanjena u odnosu na pokus gdje smo koristili etanol. Infiltracijski intenzitet je pritom iznosio 6,14, 1,41 i 2,8 mm $h^{-1}$, redom za A, B, C područje prilikom korištenja vode kao infiltracijsku tekućinu, nasuprot 234,9, 236,22 i 295,27 mm $h^{-1}$ kada je infiltracijska tekućina bila etanol. Također, infiltracijska razina na kontrolnom području koje nije bilo pod utjecajem požara također je znatno smanjena, što potvrđuje ranije hipoteze da velik udio tala pokazuju određeni stupanj repelentnosti za vodu (Doerr 1998., Letey i sur. 2000.).




Slika 13. Infiltracijski pokus izveden sa vodom (a) i etanolom (b) na tri različite varijante: A – jako opožareno, B – opožareno i C – kontrolno tlo (bez požara)

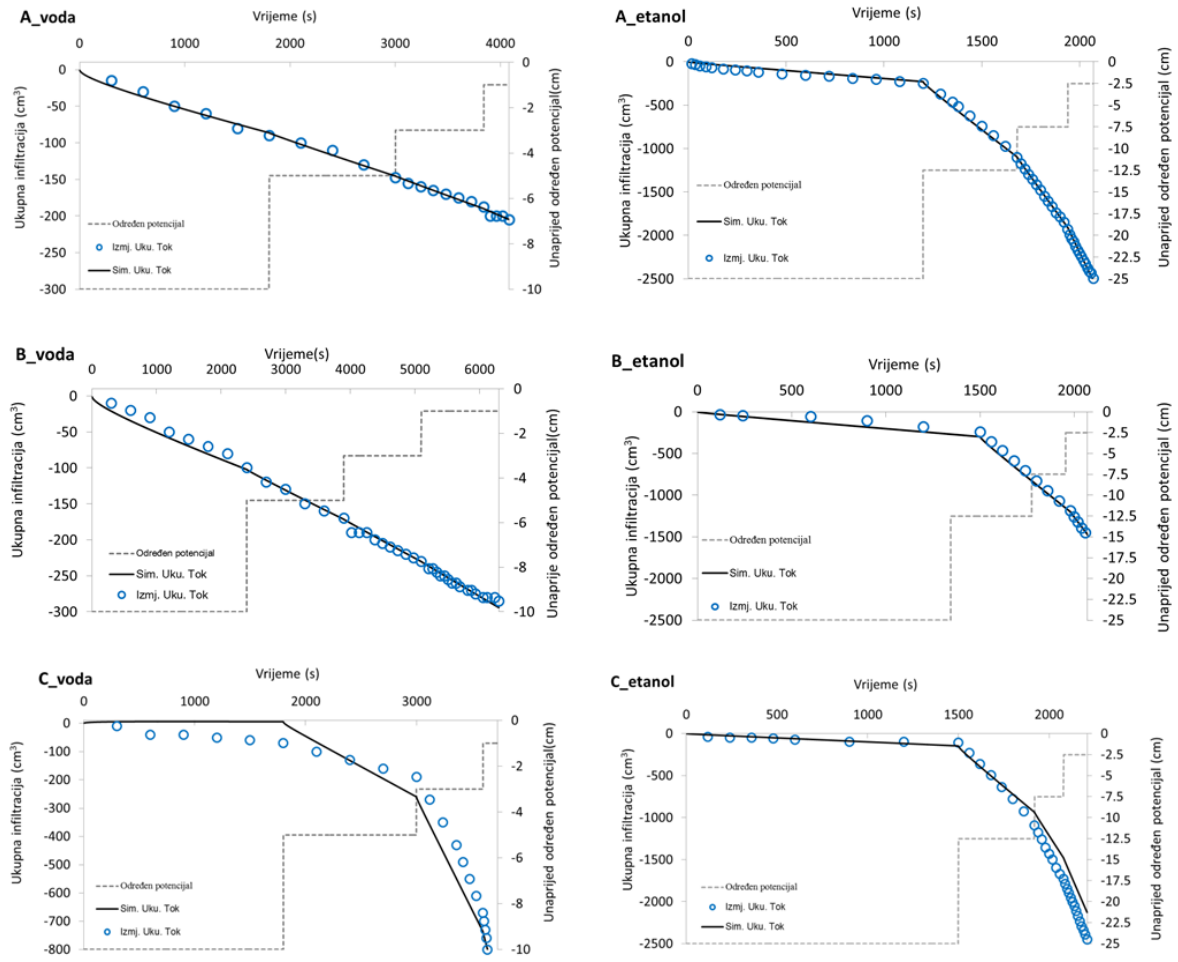



Slika 14. Retencijske i hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa koristeći podatke evapotranspiracijske metode dobivene HYPROP uređajem; slike a),b),c) prikazuju retencijske krivulje za jako opožareno, opožareno i kontrolno tlo dok slike d),f),e) prikazuju krivulje provodljivosti za jako opožareno, opožareno i kontrolno tlo. Crne linije predstavljaju krivulje projicirane na temelju izmjerenih vrijednosti relativne količine vode u tlu i vodnog potencijala tla a temelje se na VGM modelu

Slika 14. (d, e i f) prikazuje odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu mjerene na dva neporušena uzorka tla (crvene i plave kružnice) za tri različite varijante A, B, C. Crne krivulje predstavljaju predikciju VGM krivulja prikazanu u HYPROP-FIT programu (Slika 14. a,b,c,d,e,f). Krivulje prikazuju da je prilikom većeg sadržaja vlage u tlu dolazilo do veće vrijednosti provodljivosti, što znači da se sposobnost tla za transport vode smanjuje prilikom smanjenja sadržaja vode u tlu (za sve tri varijante). Također, rezultati laboratorijskih pokusa u HYPROP sustavu ukazuju na promjene u hidrauličkim karakteristikama tla (povećanje $\theta_s$, $n$ i $\alpha$ vrijednosti). Iako je saturacijska vodljivost ista za dvije opožarene i kontrolnu varijantu, infiltracija pri različitim tlakovima (Slika 13.) ukazuje na razlike u hidrauličkoj provodljivosti u nesaturiranom tlu. Sadržaj vode u uvjetima potpune saturacije iznosio je 67,39, 64,75 i 73,36 %, redom za A, B i C varijantu, a pri točki venuća (pF = 4,2) 32,86, 28,94 i 35,29 % redom za A, B i C varijante. (Slika 14. a, b i c). Važno je napomenuti da primjena ove metode uvjetuje početno potpunu saturaciju uzoraka tla i njeno sušenje evaporacijskom metodom (Schindler i sur. 2010.), što smanjuje repelentnost tla (Diamantopoloulos i sur. 2013., Liu i sur. 2012.). Iz navedenog razloga, primjena infiltracijskih pokusa (s različitim infiltracijskim tekućinama) u kombinaciji s primjenom numeričkog modeliranja omogućuje procjenu stupnja repelentnosti tla za vodu i određivanje vodne bilance. Iz slike 14. vidljivo je da su na sve tri lokacije izmjerene hidrauličke karakteristike, što nam potvrđuje dobar izbor lokacija gdje je uspješno izoliran faktor opožarenosti područja.

Modelirani podaci su uspoređeni s izmjerenim vrijednostima u pokusnom području (Slika 15.). Infiltracija vode u A i B varijanti je bila ravnomjerna ako promatramo dotok vode tijekom cijelog infiltracijskog pokusa te nije imala značajne promjene prilikom promjene tlaka na infiltrometru. Usporedno, karakteristična krivulja infiltracije vode za hidrofilna tla je iskazana u C varijanti (Šimůnek i van Genuchten 1997.), gdje su infiltracijski volumeni veći prilikom nižih potencijala (blizu saturacije, gdje su vrijednosti $K_s$ veće). U suprotnosti s time, za A i B varijante podaci su pokazali smanjenu infiltraciju prilikom manjih potencijala ($h$= -3cm i -1cm) pri čemu možemo zaključiti da su veće pore u tlu više hidrofobne nego manje pore (Schwen i sur. 2015.). Ukupni volumen infiltrirane vode u tlo iznosili su 204,63, 294,7 i 932,79 ml za, redom, varijante A, B i C. Nadalje, usporedno s vodom, infiltracijski volumeni etanola su iznosili 2512,8, 2321,9 i 2127 ml za A, B i C varijante. Dobiveni rezultati dovode do zaključka povećanu repelentnost tla za vodu u B, a posebice u A varijanti. Također, C varijanta je pokazala najmanju razliku u ukupnom volumenu i ponašanju infiltracijske krivulje između vode i etanola, što je indikator da u toj varijanti nije bilo prisutnog djelovanja požara na tlo odnosno RTV. Slični su rezultati ukazani u studiji Jarvis i sur. (2008.) gdje su usporedili travnati teren s oranicom, te također mjerenjima s vodom i etanolom otkrili da je repelentnost tla za vodu manja kada su infiltracijski volumeni tekućina slični (i obratno).

Inverzna optimizacija modela se pokazala funkcionalnom za obje tekućine (voda i etanol), što možemo proučiti uspoređujući vizualno sliku 15. sa statističkim pokazateljima u tablici 4. Za ovo istraživanje VGM model se pokazao kao dobar prilikom opisivanja hidrauličkih karakteristika tla.




Slika 15. Izmjerene (plave kružnice) i simulirane (puna linija ) vrijednosti ukupne infiltracijske količine za A (jako opožareno), B (opožareno) i C (kontrolno) područje s podešenjem napravljenim koristeći inverznu optimizaciju za vodu i etanol u HYDRUS 2D/3D programu s oznakom nametnutog vodnog potencijala i njegovog trajanja (isprekidana linija). Krivulje infiltracije etanola (_etanol) su optimizirane tako da se uzme u obzir različita fizikalno-kemijska svojstva te da budu direktno usporedna s krivuljama infiltracije vode (_voda)

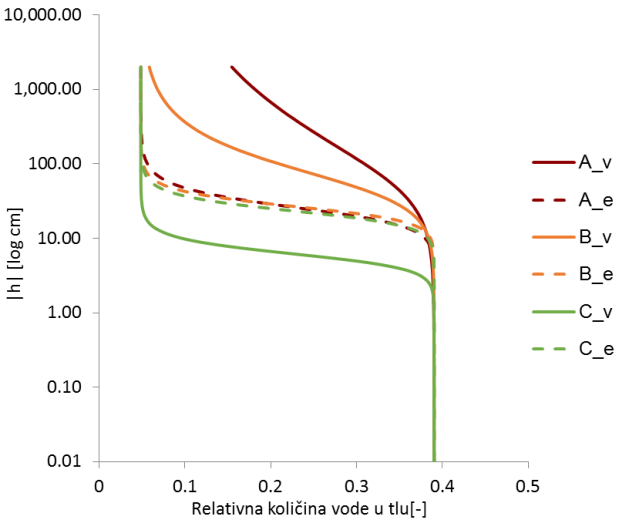
Tablica 4. pokazuje veliku razliku između vrijednosti hidrauličkih karakteristika tla s vodom i etanolom za sve optimizirane hidrauličke parametre. Uočeno je veliko povećanje u $K_s$ vrijednosti za A i B varijante, koristeći etanol kao potpuno vlažeću tekućinu, a uspoređujući s infiltracijom vode gdje su $K_s$ vrijednosti bile znatno manje. Za primjer, uočeno je smanjene hidrauličke provodljivosti za 97,7% i 98,8% prilikom infiltracije vode u odnosu na etanol u A odnosno B varijanti. Nasuprot tome, u C varijanti je smanjenje iznosilo 21,97% uspoređujući rezultate vode sa rezultatima infiltracije etanola. Razlike također ukazuju na to da je i u C varijanti prisutan određen stupanj repelentnosti tla za vodu, što je vjerojatno povezano s

distribucijom prirodnih oborina, npr. kritično mali sadržaj vode prilikom dužih perioda bez kiše (Jordán i sur. 2013., Schwen i sur. 2015.), kao i zbog činjenice da većina tala imaju određeni stupanj SWR (Doerr 1998.). Iz navedenih statističkih podataka prikazanih u tablici 4. vidljivo kako je primjenom inverzne optimizacije u HYDRUS (2D/3D) modelu postignut vrlo visok stupanj podudarnosti s mjerenim podacima (E>0.94) uz prikazane hidrauličke podatke.

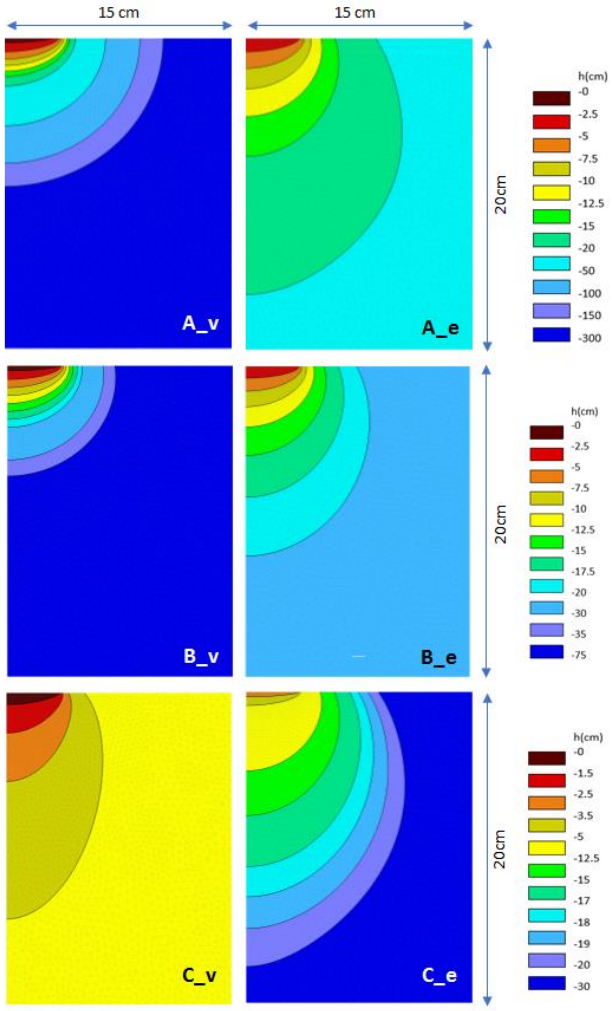
Tablica 4. VGM parametri izvedeni inverznom procedurom koristeći HYDRUS (2D/3D) s podacima izmjerenim na terenu, pomoću infiltrometra, a koristeći vodu (_v) i etanol (_e) kao tekućine te statistički parametri ($R^2$,*E , RMSE)* koji opisuju kvalitetu poklapanja modela za prvi sloj tla

| Varijanta | $\alpha$ $(cm^{-1})$ | $n$ $(-)$ | $K_s$ $cm\,day^{-1}$ | $R^2$ | $E$ | $RMSE$ $cm^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A_v | 0.017 | 1.334 | 33.93 | 0.996 | 0.996 | 3.84 |
| A_e | 0.042 | 3.625 | 1484.01 | 0.999 | 0.999 | 28.10 |
| B_v | 0.019 | 1.969 | 12.44 | 0.996 | 0.996 | 8.14 |
| B_e | 0.040 | 4.500 | 1072.66 | 0.998 | 0.995 | 45.31 |
| C_v | 0.172 | 4.500 | 1167.00 | 0.947 | 0.944 | 89.15 |
| C_e | 0.046 | 4.500 | 1495.67 | 0.998 | 0.940 | 205.24 |

Slika 16. prikazuje optimizirane retencijske krivulje prema podacima o parametrima iz tablice 3. za mjerenja infiltracije izvedena s vodom (pune linije) i etanolom (isprekidane linije). Razliku između opožarenih i kontrole varijante možemo uočiti prema obliku retencijskih krivulja, u kontrolnoj varijanti oblik je sličan između vode i etanola, nasuprot opožarenim varijantama, gdje se posebice u A varijanti može uočiti odstupanje oblika krivulje prilikom dobivenih hidrauličkih parametara s vodom odnosno etanolom. Kao što je i predviđeno, najveće razlike retencijskih krivulja su uočljive kada uzorak prelazi iz vlažne u suhu fazu, što je očekivano jer je u suhoj fazi prisutna najveća vrijednosti RTV (Filipović i sur. 2018.). Snimke simulacije vodnog potencijala tla pri završetku pokusa infiltracije vizualizirane u HYDRUSU (2D/3D) za tri različite varijante (A, B, i C oznake s indeksom _v) i etanol (A, B i C s indeksom _e) prikazane su na slici 17. Vidljiva je smanjena brzina infiltracije u opožarenim varijantama, gdje je simulirano dno bloka tla (20 cm dubine) ostalo suho čak i nakon infiltracije duže od 1 sata u A varijanti odnosno 1 sata i 45 minuta u B varijanti. Na toj dubini bloka tla potencijal je iznosio otprilike -300 i -75 cm za A i B varijantu, dok je u neopožarenoj varijanti C iznosio oko -30 cm. Značajno smanjenje infiltracijske sposobnosti tla prikazano u A i B varijanti može dovesti do povećanog rizika od preferencijalnog toka u strukturnim tlima (Jarvis i sur., 2008.) kao i do potencijalnog površinskog otjecanja (Cerdà i Doerr 2007., Lemmnitz i sur. 2008.), što je prikazano niže u ovom poglavlju kroz jednogodišnje simulacije vodne bilance istraživanog područja.

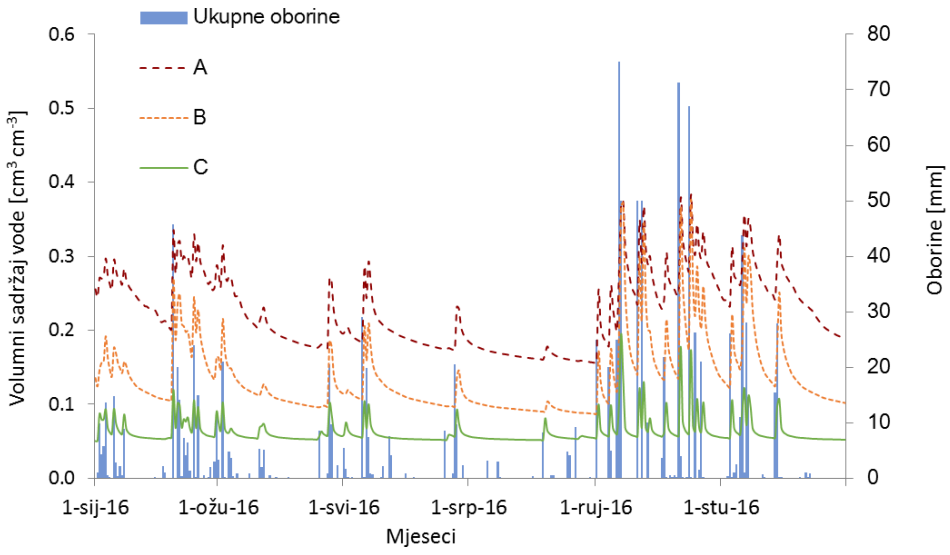



Slika 16. Retencijske krivulje za različite VGM parametre prilikom različitih scenarija oborina i s različitim tekućinama (voda i etanol). Krivulje etanola (_e) su optimizirane da budu direktno usporedne s krivuljama vode (_v).



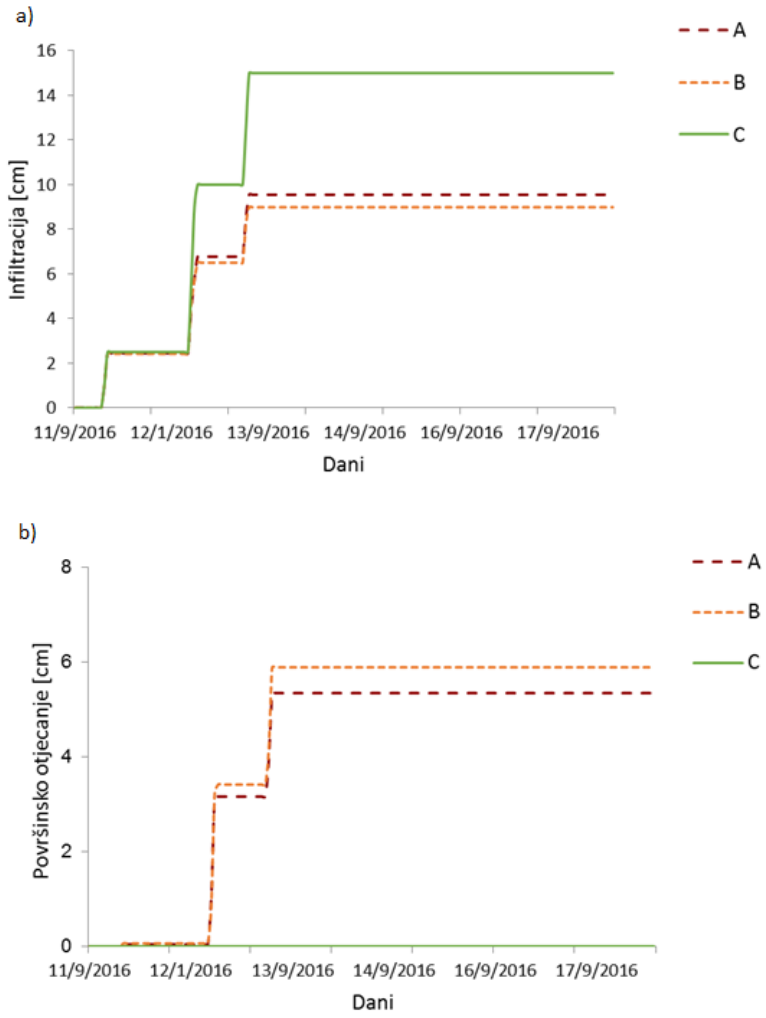

Slika 17. Distribucija vodnog potencijala tla (cm) u simuliranoj domeni za A (jako opožarenu), B (opožarenu) i C (kontrolnu) varijantu na kraju terenskog infiltracijskog pokusa s vodom (_v) i etanolom (_e)

Nakon inverznog modeliranja i određivanja hidrauličkih parametara tla, direktna simulacija je provedena pomoću HYDRUS 1D programa (jednogodišnja simulacija, s dnevnom temporalnom rezolucijom, slika 18.). Prilikom simulacija za prvi horizont tla su korišteni parametri dobiveni inverznim modeliranjem (Tablica 4.) dok je drugi horizont imao jednake vrijednosti (Tablica 3.). Također, prilikom simulacija u C varijanti, parametar *n* je prilagođen na 2,5 prema Arya i sur. (1999.) koji navode da se iz GSD (eng. Grain Size Distribution) krivulje može odrediti faktor *n* u rasponu od 1,1 za finije teksturna tla do 2,5 za grubo teksturna tla. S obzirom na to da je tijekom 2016. godine količina oborina bila niska, kako bi prikazali utjecaj RTV na hidrološke procese u tlu, u mjesecu rujnu je dodana količina oborina za razdoblje od 11. rujna do 17. rujna (prema podacima iz 2014. godine, objašnjeno niže u tekstu, detaljnije na: http://klima.hr/klima_arhiva.php). Slika 18. prikazuje kako simulirani sadržaj vode (na dubini od 10 cm) pozitivno korelira s količinom oborina te također odražava povećan sadržaj vode u površinskom horizontu pri većim količinama 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 uzrokovati promjenu retencijskih karakteristika tla za vodu. Na slici je vidljivo značajno smanjenje relativne količine vode u tlu tj. retencije tla za vodu što je direktno vezano s povećanjem vrijednosti parametara površinskog horizonta tla koji utječu na nagib i izgled retencijske krivulje ($\alpha$ i $n$) te hidrauličke provodljivosti tla u saturiranim uvjetima. Više autora navodi kako identični horizonti u tlu mogu imati različite hidrauličke parametre (Bouma i sur. 2011) s velikim utjecajem na vrijednosti hidrauličke provodljivosti (Alaoui i sur. 2011., West i sur. 2008.). U navedenom slučaju razlika u hidrauličkim parametrima je posljedica RTV, a vrijednosti su dobivene pomoću numeričkog modeliranja temeljem izmjerenih vrijednosti infiltracije.




Slika 18. Simulirana relativna količina vode u tlu ($cm^3$ $cm^3$) za A (jako opožarenu), B (opožarenu) i C (kontrolnu) varijantu s uključenim ukupnim oborinama (2016. godina i povećani intenzitet oborina dodatkom oborina u Rujnu, sukladno bilanci iz 2014. godine)

S obzirom na to da se predviđaju sve češća razdoblja suše s periodima kratkih intenzivnih oborina, izabrano je razdoblje od 11. do 17. rujna 2014. te su navedene oborine simulirane kao ekstremni oborinski događaj (dodan oborinama iz 2016. godine) kada je u tri dana palo 150 mm oborina u svega nekoliko sati. To je učinjeno s ciljem kvalitetnije i preciznije simulacije realnih uvjeta s pogleda sve češće pojave oborinskih ekstrema i klimatskih promjena. Provedenom simulacijom (s temporalnom rezolucijom od 1h, radi detaljnijeg prikaza) dobiveni su rezultati koji ukazuju na razlike u bilanci vode (kao posljedica velikog intenziteta oborina) između opožarenih i kontrolnog područja (slika 19. a) i b)). Na kontrolnom području nije bilo površinskog otjecanja te je tlo infiltriralo maksimalnu količinu padalina (15 cm), nasuprot smanjenoj infiltraciji kod opožarenih (hidrofobnih) tala, gdje je površinski otekla gotovo jednaka količina vode kao i infiltrirana, 9,55 cm infiltrirane nasuprot 5,35 cm u površinskom otjecanju za A područje odnosno 8,98 cm i 5,89 cm za B područje. Navedeno ukazuje na mogućnost izraženijeg površinskog otjecanja kod tala s povećanim vrijednostima RTV, a što su dokazala i slična istraživanja (npr. Lemmnitz i sur. 2008.).




Slika 19. Simulacija utjecaja RTV na bilancu vode za A (jako opožarenu), B (opožarenu) i C (kontrolnu) varijantu tijekom intenzivnih oborina preuzetih iz razdoblja 11.09.-17.11.14 (150 mm tijekom prva 3 dana)

# 4. Zaključak

U prikazanom istraživanju kombinacijom terenskih infiltracijskih mjerenja i numeričkog modeliranja provedena je usporedba i analiza utjecaja požara na hidrauličke karakteristike tla. Infiltracijski pokusi s vodom i etanolom pokazali su velika odstupanja između opožarenih varijanti i kontrolnog tla, ukazujući na veliki utjecaj produženog sušnog stanja tla (u ovom slučaju izloženog visokim temperaturama - požarima) na repelentnost tla za vodu. Nakon što su ustanovljene razlike u volumenu i brzini infiltracije vode u tlu na istraživanim varijantama, dobiveni podaci su poslužili za inverzno modeliranje (HYDRUS 2D/3D) i procjenu hidrauličkih parametara. Inverzno modeliranje je provedeno uspješno, s vrijednostima $R^2$ i efikasnosti modela ($E$) iznad 0,9, ukazujući na dobro poklapanje s terenski izmjerenim infiltracijskim podacima za obje korištene tekućine (voda i etanol). Hidrauličke karakteristike tla dobivene mjerenjima s etanolom pokazuju značajno veće vrijednosti $K_s$ za A i B područje, čime se potvrđuje veza između repelentnosti tla za vodu i smanjene infiltracije. Iako je jednogodišnja simulacija pokazala da u ovom slučaju RTV nije doveo do povećanog otjecanja, dodatno provedenom simulacijom intenzivnih oborina u kratkom periodu, na satnoj temporalnoj distribuciji, zaključuje se da RTV značajno utječe na bilancu vode u tlu te potiče površinsko otjecanje i smanjuje infiltracijsku sposobnost tla. S obzirom na to da prognostički scenariji klimatskih promjena ukazuju na mogućnost pojavnosti sve češćih dužih sušnih perioda (uvelike uslijed djelovanja požara), ali i perioda s ekstremno intenzivnim padalinama, ovo istraživanje ukazuje da ako se takvi scenariji ostvare, možemo očekivati i povećanu RTV. Veliki utjecaj RTV na lokalne i regionalne hidrološke procese sugerira potrebu za daljnjim istraživanjima s ciljem što boljeg shvaćanja pojavnosti, stupnja te nelinearne prirode repelentnosti tla za vodu.

# 5. Popis literature


1. Alaoui A., Lipiec J., Gerke H.H. (2011). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. Soil & Tillage Research. 115: 1–15.
2. Arya, L. M., Leij, F. J., van Genuchten, M. T., & Shouse, P. J. (1999). Scaling Parameter to Predict the Soil Water Characteristic from Particle-Size Distribution Data. Soil Science Society of America Journal. 63(3), 510.
3. Bachmann J., Deurer M., Arye G. (2007a). Modeling Water Movement in Heterogeneous Water-Repellent Soil: 2. A Conceptual Numerical Simulation. Vadose Zone J. 6:446–457
4. Bachman J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R. i Fischer W.R. (2007b). Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 14–26
5. Bachmann J., Ellies A., Hartge K.H. (2000). Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. Journal of Hydrology. 231–232:66–75
6. Bisdom E.B.A., Dekker L. W., Schoute J.F.T. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. Geoderma. 56: 105–118.
7. Bouma J., Droogers P., Sonneveld M.P., Ritsema C.J., Hunink J.E., Immerzeel W.W., Kauffmann S. (2011). Hydropedological insights when considering catchment classification. Hydrology and Earth System Sciences. 15: 1909–1919.
8. Brown H., Carrick S., Müller K., Thomas S., Sharp J., Cichota R., Holzworth D., Clothier B. (2018). Modelling soil-water dynamics in the rootzone of structured and water-repellent soils. Computers and Geosciences. 113: 33–42
9. Cerdà A. i Doerr S.H. (2007). Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. Hydrol. Process. 21(17): 2325–2336.
10. Chau H.W., Biswas A., Vujanovic V., Si B.C. (2014). Relationship between the severity, persistence of soil water repellency and the critical soil water content in water repellent soils. Geoderma. 221–222: 113–120
11. Clothier B.E., Green S.R., Deurer M. (2008). Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. Eur. J. Soil Sci. 59(1) 2–13.
12. CROPWAT, Verzija 8.0. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of United Nations. 1945-2018. http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/
13. DeBano L.F. (1981). Water Repellent Soils: a state-of-the-art. General Technical Report PSW-46, Pacific Southwest Forest and Ranae Experiment station, California

14. DeBano L.F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. J. Hydrol. 231–232:195–206.
15. DeBano L.F., Krammes J.S. (1966). Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. International Association of Scientific Hydrology Bulletin. 11:14–19.
16. Decagon. (2016). Decagon Devices Inc. Mini Disk Infiltrometer. www.decagon.com. Pristupljeno 20. svibnja 2017.
17. Diamantopoulos E. i Durner W. (2013). Physically-based model of soil hydraulic properties accounting for variable contact angle and its effect on hysteresis. Adv. Water Resour. 59:169–180.
18. Diamantopoulos E., Durner W., Reszkowska A., Bachmann J. (2013). Effect of soil water repellency on soil hydraulic properties estimated under dynamic conditions J. Hydrol. 486, 175–186.
19. Dirksen Christiaan. (1999). Soil physics measurements. Catena Verl. GeoEcology paperback.
20. Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth-Science Reviews .51: 33–65
21. Durner W. i Flühler H. (2005). Soil Hydraulic Properties. Braunschweig Technical University, Germany.
22. Farthing M.W. i Ogden F.L. (2018). Numerical Solution of Richards' Equation: A Review of Advances and Challenges. Soil Science Society of America Journal. 81:1257–1269.
23. 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 281-302.
24. Filipović V., Thomas W., Lana F., Schwen A., Bristow K.L., Zechmeister-Boltenstern S., Leitner S. (2018). Inverse estimation of soil hydraulic properties and water repellency following artificially induced drought stress. J. Hydrol. Hydromech. 66(2): 170–180
25. Gerke H.H. (2006). Preferential flow descriptions for structured soils. J. Plant Nutr. Soil Sci., 169: 382–400
26. Giannakopoulos C., Le Sager P., Bindi M., Moriondo M., Kostopoulou E., Goodess C.M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. Science Direct. 16
27. Green T.R., Ahuja L.R., Benjamin J.G. (2003). Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. Geoderma. 116: 1–2, 3–27.
28. Hillel D. (2013). Fundamentals of Soil Physics. Elsevier Inc.
29. HYPROP-FIT. (2016). Hyprop-fit User's Manual. http://www.soil.tubs.de/download/downloads/reports/2015.Manual_HYPROP-FIT.pdf ili http://library.metergroup.com/Manuals/UMS/HYPROP-FIT_Manual.pdf Pristupljeno: 23. Travnja 2017.

30. Iovino M., Angulo-Jaramillo R., Bagarello V., H. Gerke H., Jabro J., Lassabatere L. (2017). Thematic Issue on Soil Water Infiltration. J. Hydrol. Hydromech. 65(3): 205–208
31. Jarvis N., Etana A., i Stagnitti F. (2008). Water repellency, near-saturated infiltration and preferential solute transport in a macroporous clay soil. Geoderma. 143: 223–230.
32. 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.
33. Jordán A., Zavala L.M., Mataix-Solera J., Doerr S.H. (2013).Soil water repellency: origin, assessment and geomorphological consequences. Catena. 108: 1–5.
34. Jury W.A. i Horton R. (2014). Soil Physics, 6th edition.
35. King P. M. (1981). Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement.Australian Journal of Soil Research, 19: 275–285.
36. Lemmnitz C., M. Kuhnert,O. Bens,A. Guntner, B. Merz i R. F. Huttl. (2008). Spatial and temporal variations of actual soil water repellency and their influence on surface runoff. Hydrological processes. 22:12
37. Letey J., Carrillo M.L.K., i Pang X.P. (2000). Approaches to characterize the degree of water repellency. J. Hydrol. 231–232, 61–65.
38. Liu H., Ju Z., Bachmann J., Horton R., Ren T., (2012). Moisture- dependent wettability of artificial hydrophobic soils and its relevance for soil water desorption curves. Soil Sci. Soc. Am. J. 76:342–349.
39. Michel A.J., Brown H.E., Teixeira H.E.E.I., Meenken E.D.S.M., George M.J., Gillespie R.N. (2014). The production and water extraction of lucerne and ryegrass under different irrigation frequencies on a shallow soil. Proceedings of the New Zealand Grassland Association. Page, Alexandra, Central Otago, New Zealand
40. Monteith J.L. (1981). Evaporation and surface temperature. QJR Meteorol. Soc 107:1–27
41. Mualem Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12(3): 513–521.
42. Müller K., Masonb K., Strozzic A.G., Simpson R., Komatsu T., Kawamoto K., Clothier B. (2018). Runoff and nutrient loss from a water-repellent soil. Geoderma 322: 28–37
43. Mustać I. (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, 256-280.
44. Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. J. Hydrol.10:282–90.
45. Or D. i Wraith J.M (1997). Agricultural and Environmental Soil Physics. Utah State University Logan.

46. Peters A. i Durner W. (2006). Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments. Water Resources Research .42:11.
47. Peters A., Iden S.C. i Durner W. (2015). Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow. Journal of Hydrology. 55: 20-34
48. Romić D., Romić M., Ondrašek G., Bakić H., Bubalo M., Zovko M., Matijević L., Husnjak S., Jungić D., Rubinić V., Karoglan Kontić J., Maletić E., Preiner D., Marković Z., Stupić D., Andabaka Ž., Čoga L., Lazarević B., Perica S., Strikić F., Žanetić M., Klepo T., Jukić Špika M. (2015). PILOT PROJEKT NAVODNJAVANJA DRVENASTIH KULTURA (VINOVE LOZE I MASLINE) UZGAJANIH NA OSVOJENIM KRŠKIM POVRŠINAMA NA PODRUČJU DONJE POLJE – JADRTOVAC KOD ŠIBENIKA (Irrigation pilot project (vine grapes and olives) on established plots within the karst area (Donje polje Jadrtovac, Šibensko-kninska county). Izvješće. http://bib.irb.hr/prikazi-rad?rad=775059. Pristupljeno: 7. Lipnja 2017.
49. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.T. (2001). ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol. 251: 163–176.
50. Schindler U., W. Durner, G. von Unold, L. Müller. (2010). Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range. Soil Physics. 74:4
51. Schreiner O. i Shorey E.C. (1910). Chemical nature of soil organic matter. USDA Bur. Soils Bull. 74: 2-48.
52. Schwen A., Zimmermann M., Leitner S., Woche S.K. (2015). Soil Water Repellency and its Impact on Hydraulic Characteristics in a Beech Forest under Simulated Climate Change. Vadose Zone J. 14-12: 1–11.
53. Šimůnek J. i van Genuchten M.Th. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. Water Resour. Res. 32: 2683–2696.
54. Šimůnek 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.
55. Šimůnek 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
56. Šimůnek J., van Genuchten, M.T., Šejna M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. Vadose Zone J. 15:7
57. Šimůnek, J. i van Genuchten, M.Th. (1997). Parameter estimation of soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data. Soil Sci. 162:383–398
58. Stoof C.R., Demie M., Ritsema C.J., Dekker L.W. (2011). Natural and Fire-Induced Soil Water Repellency in a Portuguese Shrubland. Soil Sci. Soc. Am. J. 75: 2283–2295
59. Tessler N., Wittenberg L., Malkinson D., Greenbaum N. (2008). Catena. 74:185–191

60. UMS (2015). Hyprop manual. Preuzeto s: http://library.metergroup.com/Manuals/UMS/Hyprop_Manual.pdf Pristupljeno: 28. Travnja, 2017
61. Van Genuchten M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Am. J. 44:892-898
62. West L.T., Abreu M.A., BishopJ.P. (2008). Saturated hydraulic conductivity of soils in the Southern Piedmont of Georgia, USA: field evaluation and relation to horizon and landscape properties. Catena. 73: 174–179
63. White I., Sully M.J., Perroux K.M. (1992). Measurement of surface-soil hydraulic properties: disk permeameters, tension infiltrometers, and other techniques. Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. Special Publication, vol. 30. Soil Science Society of America, Madison, WI, 69–103

# Životopis



Mirel Mešić rođen je 19. svibnja 1992. u Zagrebu, gdje je završio osnovnu školu Granešinu i prirodoslovno-matematičku 3.gimnaziju. Na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, 2015. godine završio je preddiplomski studij Poljoprivredne tehnike te iste godine upisuje diplomski studij Melioracija. Na *University of Natural resources and Life sciences (BOKU)* u Beču, Austrija, proveo je 6 mjeseci usavršavajući se na području procesa u tlu, ponajprije kretanja i odnosa vode u tlu. Tijekom srednjoškolskog i fakultetskog obrazovanja, uspješno i neprekidno je stjecao radno iskustvo u više od 10-ak firmi raznih djelatnosti. Fluentno se koristi engleskim jezikom te osnovnim komunikacijskim razinama njemačkog jezika.