Procjena toka vode u tlimma s različitim hidrauličkim karakteristikama

Fučkan, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:204:059267

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet
University of Zagreb
Faculty of Agriculture

PROCJENA TOKA VODE U TLIMA S RAZLIČITIM HIDRAULIČKIM KARAKTERISTIKAMA

DIPLOMSKI RAD

Marko Fučkan

Zagreb, rujan 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet
University of Zagreb
Faculty of Agriculture

Diplomski studij:

Melioracije

PROCJENA TOKA VODE U TLIMA S RAZLIČITIM HIDRAULIČKIM KARAKTERISTIKAMA

DIPLOMSKI RAD

Marko Fučkan

Mentor: doc. dr. sc. Vilim Filipović

Zagreb, rujan 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture

IZJAVA STUDENTA

O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Marko Fučkan**, JMBAG 0178089262, rođen 12.02.1993. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

PROCJENA TOKA VODE U TLIMA S RAZLIČITIM HIDRAULIČKIM KARAKTERISTIKAMA

Svojim potpisom jamčim:

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

U Zagrebu, dana _____ _____

Potpis studenta

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Marko Fučkan**, JMBAG 0178089262,naslova

PROCJENA TOKA VODE U TLIMA S RAZLIČITIM HIDRAULIČKIM KARAKTERISTIKAMA

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____ , dana _____ .

Povjerenstvo: potpisi:

1. Doc. dr. sc. Vilim Filipović mentor _____
2. Doc. dr. sc. Ivan Mustać član _____
3. Doc. dr. sc. Vedran Rubinić član _____

Sažetak

Diplomskog rada studenta Marka Fučkana, naslova

PROCJENA TOKA VODE U TLIMA S RAZLIČITIM HIDRAULIČKIM KARAKTERISTIKAMA

Tok vode u tlima se odvija pod utjecajem klimatskih parametara, karakteristika tla te ostalih faktora kao što su nagib terena, biljni pokrov, sustavi odvodnje itd. Hidrauličke karakteristike tla su rezultat mehaničkog sastava tla, strukture tla i ostalih fizikalno-kemijskih karakteristika (npr. sadržaj humusa). Modeli toka vode u tlu pri varijabilno saturiranim uvjetima se mogu pouzdano koristiti za procjenu toka vode u tlu. Cilj rada je uz pomoć terenskih i laboratorijskih istraživanja i numeričkog modeliranja procijeniti tok vode u tlima s različitim hidrauličkim karakteristikama. U svrhu određivanja hidrauličkih karakteristika tla, neporušeni uzorci od 250 cm^3 su prikupljeni s pet različitih lokacija na području grada Zagreba. Na navedenim uzorcima su određene retencijske i hidrauličke krivulje tla na temelju kojih su dobivene vrijednosti hidrauličkih parametara (npr. količina vode u tlu, hidraulička provodljivost tla). Provedena mjerenja hidrauličkih parametara tla pokazala su visoku podudarnost procijenjenih retencijskih i hidrauličkih krivulja temeljenih na van Genuchten-Mualemovom modelu (R2 i RMSE vrijednosti) što ukazuje na pouzdanost primijenjenih metoda (RMSE < 0.01 cm^3/cm^3 i RMSE < 0,6 cm/d). Iako se na svim lokacijama radilo o istom tipu tla (Rendzina) uočene se velike razlike u hidrauličkim karakteristikama što ukazuje na veliku heterogenost istraživanih tala. Numeričko modeliranje toka vode na lokacijama istraživanja je ukazalo na važnost procjene svih hidrauličkih parametara jer uz hidrauličku vodljivost nesaturiranog tla i ostali (npr. retencija vode) parametri utječu na ponašanje i tok vode u nesaturiranoj zoni tla.

Ključne riječi: tok vode, numeričko modeliranje, hidrauličke karakteristike

Summary

Of the master's thesis – student **Marko Fučkan,** entitled

WATER FLOW ESTIMATION IN SOILS WITH DIFFERENT HYDRAULIC CHARACTERISTICS

Water flow in soils is under the influence of climatic parameters, soil characteristics, and other factors such as terrain slope, plant cover, drainage systems, etc. Soil hydraulic parameters are the result of soil texture composition, soil structure, and other physicochemical properties (e.g., organic matter content). Water flow models in variably saturated conditions can be reliably used to estimate the water flow in the soil. The thesis aims to assess the water flow in soils with different hydraulic characteristics using laboratory methods and numerical modeling. To determine the hydraulic characteristics of the soil, undisturbed samples of 250 cm^3 were collected from five different locations in the city of Zagreb. The samples were used to determine retention and hydraulic conductivity curves of the soil based on which the values of hydraulic parameters will be obtained (e.g., the amount of water in the soil, hydraulic conductivity). The objectives of this thesis were to determine the hydraulic characteristics of the soil in individual locations and to perform numerical modeling of the water flow based on experimentally determined soil hydraulic parameters. The performed measurements of hydraulic soil parameters showed high relevance of the estimated retention and hydraulic curves based on the van Genuchten-Mualem model (R2 and RMSE values), which indicates the reliability of the applied methods (RMSE <0.01 cm^3/cm^3 and RMSE <0.6 cm/d). Although it was the same type of soil (Rendzina), large differences in hydraulic parameters were observed, which indicates a considerable heterogeneity of the studied soils. Numerical modeling of water flow at experimental sites indicated the importance of estimating all hydraulic parameters. In addition to the hydraulic conductivity of unsaturated soil, other parameters (e.g., water retention) also affect the behavior and water flow in unsaturated soil.

Keywords: water flow, numerical modeling, soil hydraulic properties

Sadržaj

Sažetak 1
Summary 2
1 Uvod 4
1.1 Cilj istraživanja 5
2 Pregled literature 5
2.1 Hidrološki ciklus 5
2.2 Tok vode u tlu 6
2.3 Hidrauličke karakteristike tla 7
2.4 Primjeri korištenja HYDRUS programa u sličnim istraživanjima 10
3 Materijali i metode 16
3.1 Odabir lokacija provedbe istraživanja 16
3.2 Pedološke karakteristike tla na području istraživanja 18
3.3 Klima na području istraživanja 21
3.4 Laboratorijske metode određivanja fizikalno-kemijskih karakteristika 22
3.4.1 Određivanje hidrauličkih parametara tla 23
4 Rezultati i rasprava 26
4.1 Rezultati vodne bilance te model toka vode 33
5 Zaključak 37
6 Popis literature 39
Životopis 41

1 Uvod

Ovaj rad bavi se analizom provodljivosti vode kroz tlo. Provodljivost vode kroz tlo bitan je faktor hidrološkog ciklusa, koji ima utjecaj na cijeli živi svijet na Zemlji. U posljednjih dvadesetak godina utjecaj čovjeka na Zemljinu atmosferu vidljiv je kroz globalno zatopljenje i ostale klimatske promjene. Taj utjecaj raste iz godine u godinu, a može se reći da je počeo eskalirati već nakon prve industrijske revolucije u 19. stoljeću. Nešto što ima tako velike utjecaje na Zemljinu atmosferu, mora imati utjecaje i na tlo.

Tlo je jedan od najvećih i najznačajnijih prirodnih resursa Zemlje. Njegovim korištenjem, pa čak i onim umjerenim, dolazi do smanjivanja plodnosti i na kraju do upropaštavanja. Tlo je prirodno tijelo organskog i mineralnog sastava. Neprestano se mijenja u prirodnim ciklusima održavajući povoljnu strukturu i oslobađajući hranjive elemente neophodne za život mikroorganizama i biljaka u tlu. U poljoprivrednom smislu tlo predstavlja tanji površinski sloj litosfere prorastao biljnim korijenjem, koji snabdijeva biljke vodom i drugim neophodnim tvarima. Mješavina je organskih tvari, minerala, plinova, tekućina i mnogobrojnih organizama koji zajednički održavaju život na Zemlji. Četiri su najvažnije funkcije tla: medij je za rast biljaka, sredina za pohranu vode, opskrbljivanje vodom i pročišćavanje vode. Tlo je modifikator Zemljine atmosfere te stanište za organizme. Nezamjenjivi je izvor sirovina i izvor geotermalne energije i vode.

Modeli koji opisuju tok vode kroz tlo bitni su jer se koriste i za modeliranje pronosa tvari kroz tlo, što se kasnije može koristiti kada se modelira pronos pesticida, gnojiva i slično. U ovom radu bit će opisani rezultati jednog pokusa provodljivosti vode kroz tlo.

1.1 Cilj istraživanja

Cilj rada je uz pomoć laboratorijskih istraživanja i numeričkog modeliranja procijeniti tok vode u tlima s različitim hidrauličkim karakteristikama.

2 Pregled literature

2.1 Hidrološki ciklus

Prema Chahine (1992.) hidrološki ciklus se definira kao najveća cirkulacija neke supstance na Zemlji. Kruženje vode na Zemlji omogućuje održavanje života te voda neprestano cirkulira između kopna, oceana i atmosfere. Kružni put vode sastoji se od sljedećih procesa: kondenzacija, oborine, infiltracija, otjecanje i evapotranspiracija te oni zajedno čine hidrološki ciklus (Gereš, 2004.). U nastavku je prikazana slika hidrološkog ciklusa.

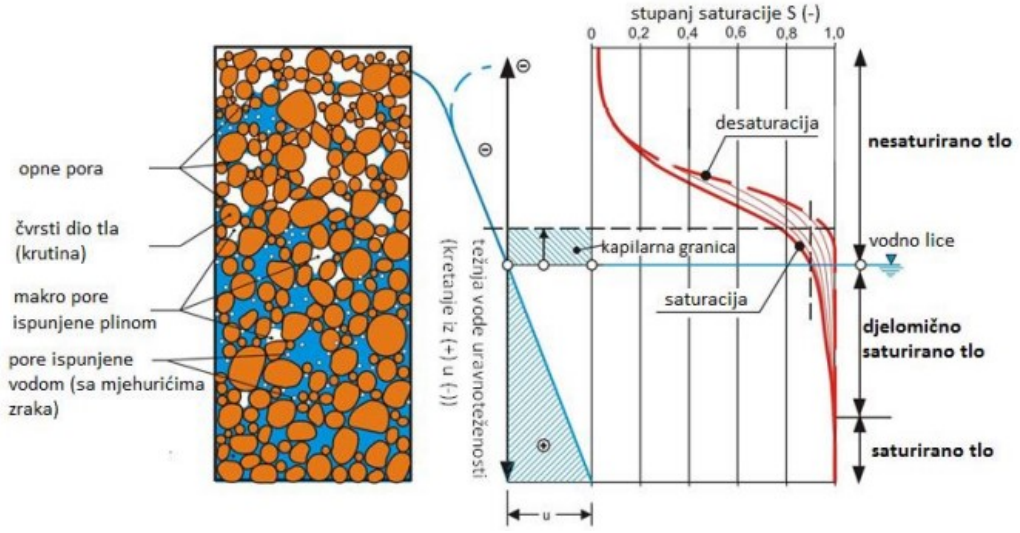


Slika 2.1.1. Kruženje vode u prirodi (izvor: hr.wikipedia.org (John M. Evans/USGS-USA Gov; Preuredio: Tomislav Kraljević - http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html) – pristup 16.07.2020

Voda koja padne u obliku oborina na tlo isparava u atmosferu – evaporacija ili površinski otječe, a ostatak vode se procijedi u tlo te se putem biljaka vraća u atmosferu transpiracijom ili podzemno otječe čime formira podzemnu vodu (Ondrašek, 2015.).

2.2 Tok vode u tlu

Podzemna voda se može kretati kroz zasićeno odnosno saturirano tlo i kroz nezasićeno, tj. nesaturirano tlo, a agregatno stanje, struktura, tekstura, količina vode u tlu, poroznost te sadržaj organske tvari određuju brzinu i smjer gibanja vode u tlu (Mustać, 2015.). Tlo je saturirano kada voda u potpunosti ispunjava mikro i makro pore, a djelomično je saturirano kada ih ne ispunjava u potpunosti. U nastavku je prikazana slika strukture tla s obzirom na sustav pora.



Slika 2.2.1. 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/

Na slici 2.2.1. prikazan je presjek tla s vodom u ravnotežnom stanju na koji primarno djeluje atmosferski tlak. Vodno lice predstavlja granicu na kojoj se dijeli nesaturirana i saturirana zona (Mustać, 2015.). Kada saturiranost iznosi 100% sve su pore u tlu ispunjene vodom, to nazivamo područjem potpunog zasićenja (saturirano tlo) te područjem gravitacijske vode odnosno vode temeljnice jer u tom području na tok vode utječu gravitacijske sile. Iznad vodnog lica stupanj saturiranosti se kreće između 0% i 100% i to područje tla se naziva kapilarna zona. Područje adhezijske vode nalazi se iznad kapilarne zone i tu se voda veže za čvrste čestice tla u tankom sloju, a dijeli se na područje membranske vode i hidroskopne vlage. Iznad kapilarnog područja nalazi se nesaturirana zona tla (Mustać, 2015.). Prema Or i Wraith (1997.) kretanje vode teži uravnoteženosti, pa sukladno tome voda se kreće iz područja gdje je njena potencijalna energija veća u područje manje potencijalne energije.

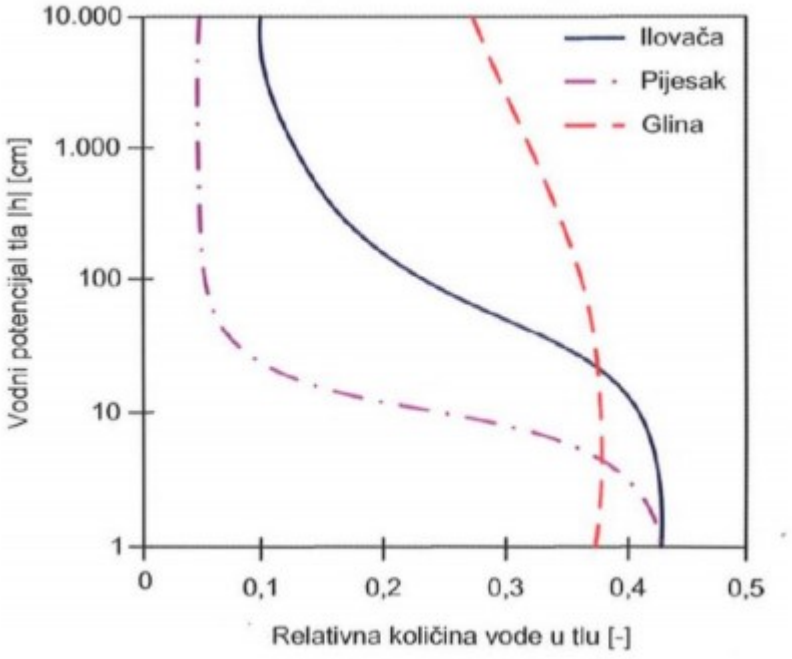
Prema Tomiću (1988.) sila gravitacije, kapilarne sile i hidrostatski tlak uglavnom uzrokuju kretanje vode u tlu. Voda se u tlu kreće u svim smjerovima: ascendentno, descendentno i lateralno. Voda se kreće prema dolje odnosno descendentno tijekom

oborina ili navodnjavanja. Kretanje vode prema gore odnosno ascendentno odvija se kapilarnim vlaženjem podzemnih voda, dok se tlo vlaži u svim smjerovima tijekom bočnog ili lateralnog kretanja vode. Prema Šimuniću (2013.) kako bi se utvrdio vodni režim tla treba obratiti pažnju na sljedeće oblike gibanja tekuće vode: vodopropusnosti (filtraciji), infiltraciji (upijanje) i kapilarnom gibanju vode.

2.3 Hidrauličke karakteristike tla

Za nesaturirana tla je karakteristično da u svojoj strukturi sadrže tekuću i plinovitu fazu. Hidrauličke karakteristike tla opisuju makroskopske odnose vodnog potencijala, ponašanja kretanja vodene faze te koncentracije plinova u tlu (Durner i Flühler, 2005.).

Navedeni odnosi ovise o sljedećim faktorima: strukturi pora u tlu, temperaturi, karakteristikama tekućina koje se nalaze u porama i karakteristikama površine matriksa. U nesaturiranoj zoni tla tok vode je puno kompleksniji u usporedbi sa saturiranom zonom (Filipović, 2015.). Kako bi se simulirao tok vode nesaturiranom tlu potrebno je odrediti dvije hidrauličke karakteristike tla: hidrauličku provodljivost nesaturiranog tla (parametar krivulje hidrauličke provodljivosti) i relativnu količinu vode u tlu (parametar retencijske krivulje tla). Retencijske krivulje predstavljaju odnos između relativne količine vode u tlu θ i vodnog potencijala tla h, te imaju karakterističan odnos za različite tipove tla (Slika 2.3.1.). Prema Filipoviću (2015.) kod potencijala blizu vrijednosti 0, tlo je gotovo potpuno saturirano i voda u matriksu tla vezana je kapilarnim silama. Prilikom smanjenja θ sile vezanja postaju sve jače (potrebna je jača sila za ekstrakciju vode iz tla), i kod malih potencijala (blizu granici točke venuća pF 4,2; = 15,000 cm) voda koja je zadržana u tlu nalazi se u najsitnijim porama tla.



Slika 2.3.1. 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 različita tla Izvor: Ondrašek i sur. (2015.)

Pjeskovita tla (teksturno lakša tla) vodu gube mnogo brže u usporedbi sa teksturno težim tlima (glina, ilovača, praškasta ilovača) što prikazuje izravan odraz distribucije veličine pora u tlu pri određenoj teksturnoj jedinici tla. Obzirom da većina pora u teksturno lakšim tlima ima veći promjer, voda će se procijediti kod malih negativnih potencijala tla, a u teksturno težim tlima procjeđivanje vode događa se pri vrlo visokim vrijednostima negativnog vodnog potencijala. Oblik retencijske krivulje opisuje se primjenom različitih modela, a najčešće primjenjivan je van Genuchten – Mualem model (van Genuchten, 1980.).

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

$$\theta(h) = \theta_s \, za \; h \geq 0 \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}; n > 1 \quad (5)$$

gdje je:

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

θ_s količina vode u tlu pri uvjetima potpune saturacije [L^3 L^{-3}],

θ_r rezidualna količina vode u tlu [L^3 L^{-3}],

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

h vodni potencijal tla [L],

θ volumna količina vode u tlu Se efektivna saturacija tla,

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

m koeficijent optimizacije,

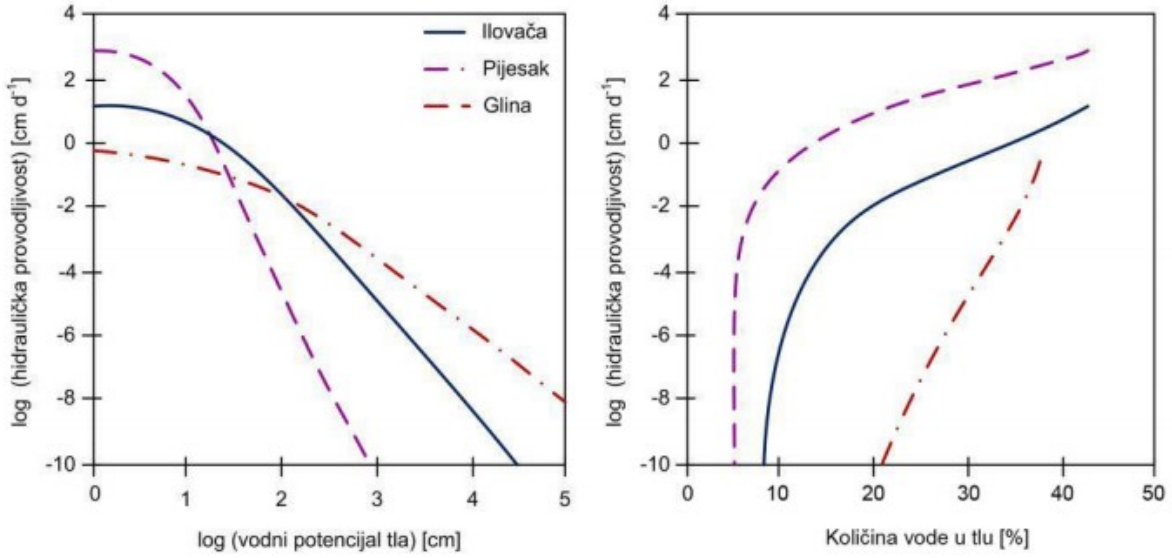
α inverzna vrijednost svih pora ispunjenih zrakom [L^{-1}],

n indeks raspodjele veličine pora,

l faktor povezanosti pora (0,5 – preporučena vrijednost)

Vodni potencijal predstavlja kemijski potencijal vode (Petek i Lazarević, 2015.). Kemijski potencijal vode definira se kao relativna veličina, a predstavlja razliku između potencijala tvari u određenim uvjetima i potencijala vode u standardnim uvjetima. Slobodnu energiju po jedinici volumena vode u otopini u odnosu na standardno stanje vode opisuje vodni potencijal. Najvažnije su hidrostatski (osmotski) potencijal, gravitacijski potencijal i matrični potencijal. Za nesaturiranu zonu se najčešće koristi kombinacija matričnog potencijala zbog razlika u koncentraciji soli prisutnih u otopini tla (negativan predznak) s hidrostatskim tlačnim potencijalom za saturiranu zonu (pozitivan predznak) kao vodni potencijal tla (h – definiran jedinicom duljine) koji je onda lako primjenjiv za saturirane i nesaturirane uvjete.

Prema Or i Wraith (1997.) hidraulička provodljivost opisuje se kao sposobnost tla za transport vode te je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Hidraulička provodljivost se smanjuje prilikom sušenja tla i sa smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom. U teksturno lakšim tlima (pijesak) hidraulička provodljivost je mnogo veća u usporedbi s tlima ilovaste ili glinovite strukture. Prema Filipoviću (2015.) ukoliko je smanjenje izraženo kao funkcija vodnog potencijala tla puno je izraženije u lakšim nego težim tlima. Većina modela za simulaciju toka vode u nesaturiranoj zoni tla temelje se na Richardsovoj jednadžbi toka vode (jednodimenzionalni tok u vertikalnom smjeru) (Richards, 1931.).



Slika 2.3.2. Primjer odnosa hidrauličke provodljivosti i vodnog potencijala tla (lijevo); odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu za teksturno različita tla (desno); Izvor: Ondrašek i sur. (2015.)

2.4 Primjeri korištenja HYDRUS programa u sličnim istraživanjima

Matematički modeli koriste se kada je pojedini sustav teško opisati riječima. Korištenjem matematičkih jednadžbi zamjenjuju se složeni opisi. HYDRUS 1D predstavlja numerički model, a koristi se za simulaciju toka vode. U nesaturiranoj zoni prolazan tok vode temelji se na Richardsovoj jednadžbi (Richards, 1931.):

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} + \right)\right] - S \qquad (6)$$

gdje je:

z – vertikalna koordinata pozitivna prema gore od vodnog lica (m),

t – vrijeme (s),

h – matrični potencijal tla (m),

θ – sadržaj vode (cm^3 /cm^3),

S – voda uzeta korijenjem (1/s).

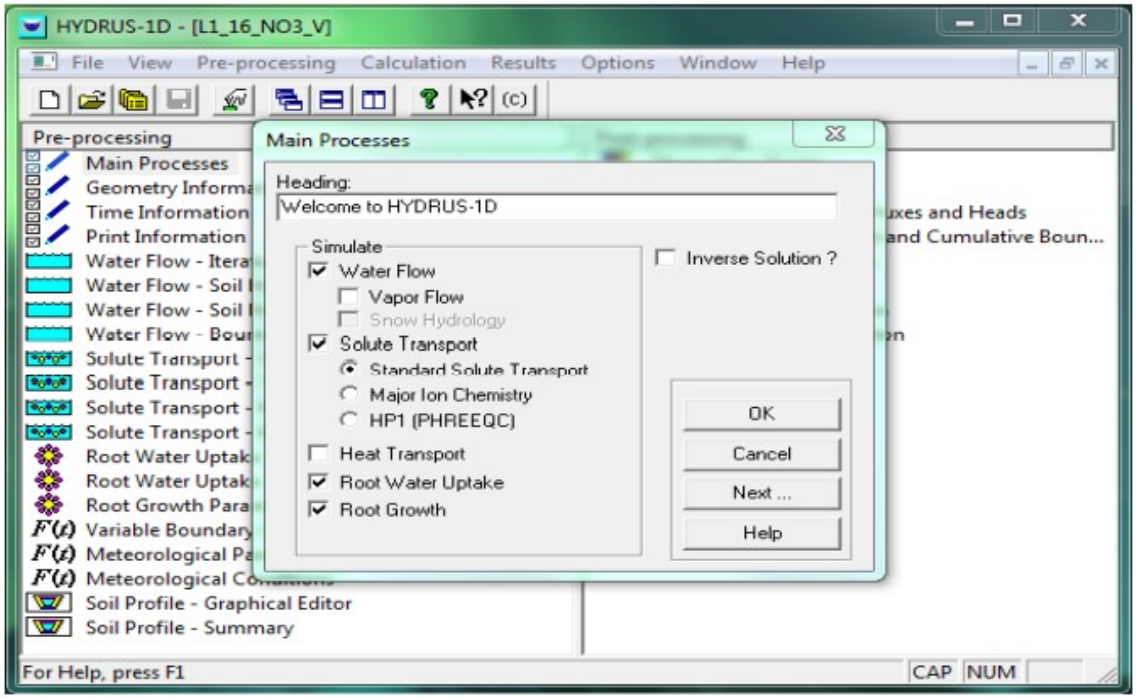
Najčešće korišteni modeli za procjenu utjecaja poljoprivrede na okoliš je programski paket HYDRUS (Šimůnek i sur., 2016.).

Numerički model toka vode u hidromorfnim tlima s naglaskom na nesaturiranu zonu izradio je na području Bif polja Filipović (2012.). Računalni program HYDRUS 1D koristio je za izradu modela toka vode. Simulacije kretanja vode u profilu istraživanog područja pokazale su veće procjeđivanje vode na početku i na kraju svake godine istraživanja i u uvjetima kada je površina tla bila bez poljoprivrednih kultura.

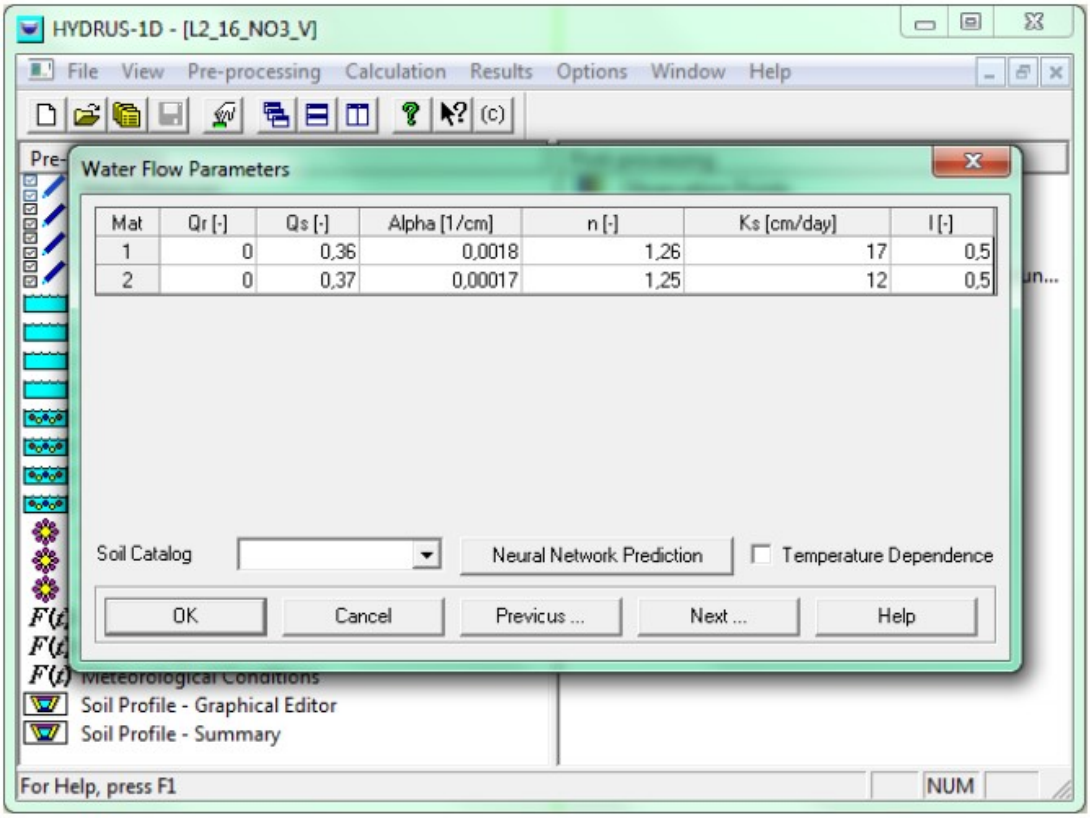
Važno je istaknuti kako istraživanja o modeliranju toka vode u tlu na području Hrvatske nisu zastupljena u velikom broju. Ružičić (2013.) u doktorskoj disertaciji na području vodocrpilišta Kosnica izrađuje model toka vode i transporta potencijalno toksičnih elemenata olova, cinka i kadmija uz korištenje HYDRUS 1D softvera. Ujedno napravljen je sorpcijski eksperiment prilikom kojeg su kreirane izoterme za spomenute elemente. Najbolja sorpcijska svojstva imaju površinski horizonti koji imaju najveći CEC.

Bolado Rodríguez i sur. (2010.) proveli su istraživanja u kojima su primijenili dvije vrste gnojovke na kolone s tlom. S pomoću programa HYDRUS-1D simulirali su procese razgradnje gnojovke i adsorpcije amonijaka te procese adsorpcije nitrata i nitrita koji su bili praktično zanemarivi. U svojim istraživanjima Ramos i sur. (2011.) također su pomoću programa HYDRUS-1D simulirali kretanje onečišćivača u poljskim uvjetima u Portugalu. Autori su proveli složene eksperimente koji su uključivali primjenu navodnjavanja zaslanjenom vodom pri različitim dozama dušika. Modelom je uspješno simulirano usvajanje vode i hranjiva putem korijena biljke. Ispiranje NH_4-N i NO_3-N bili su povećani zbog stresa biljke uzrokovanog zaslanjivanjem koji je uvjetovao smanjeno usvajanje vode i hranjiva. Program HYDRUS-1D pokazao se kao pouzdan alat za procjenu koncentracija tvari povezanih sa zaslanjivanjem tla i dušičnim spojevima.

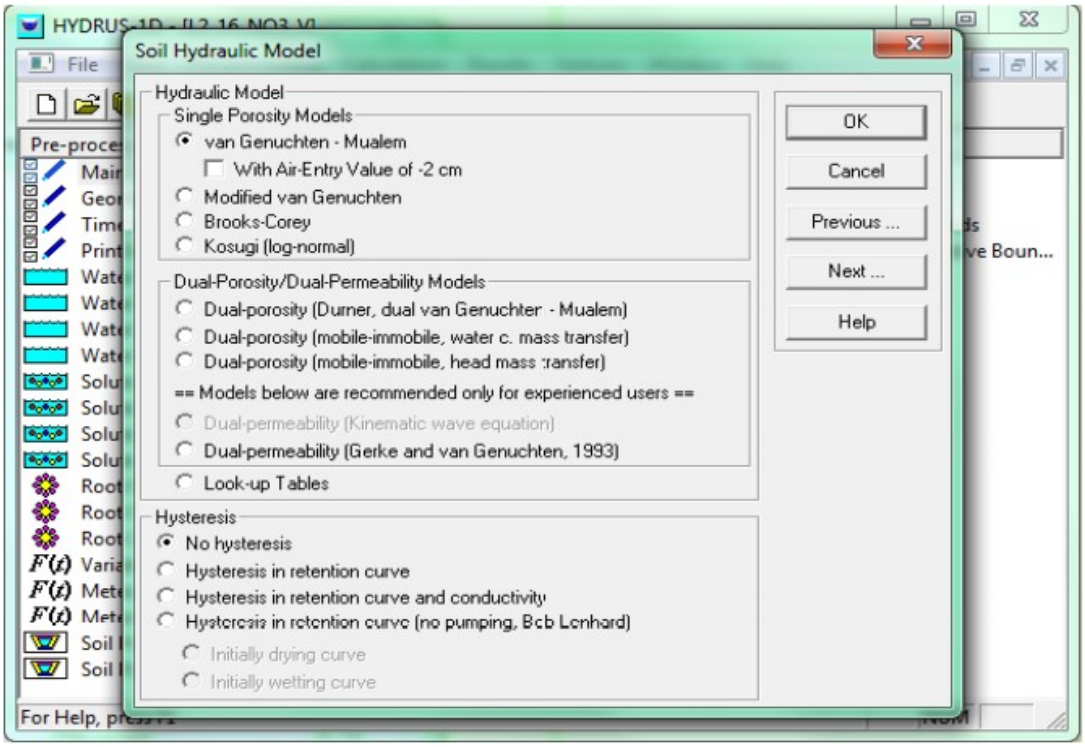
Filipović i sur. (2014.) i (2016.) provode simulacije kretanja nitrata pomoću HYDRUS-2D na numeričkom pokusu primjene ureje na golf terenima uz navodnjavanje te na malčiranim površinama pod raznim varijantama upotrebe plastičnih folija kako bi procijenili mogućnost ispiranja nitrata do dubljih slojeva tla. Za modeliranje toka vode i pronosa tvari koristi se velik broj programa. Neki od njih su: HYDRUS (1D - jednodimenzionalni,2D – dvodimenzionalni i 3D – trodimenzionalni), TOUGH, SWAP, AMINO, MACRO, LEACHM i dr. Za modeliranje toka vode i transporta nitrata u nesaturiranoj zoni korišten je softverski paket HYDRUS-1D. Na temelju podataka dobivenih iz procjednih lizimetara testiran je numerički model. Simulacije u HYDRUS-1D su u 1D domeni pri čemu su uzeti u obzir podatci o uzgajanim kulturama. Simulirani su primjena i transformacija gnojiva (UREA i NPK) do amonijaka (nitrata). Terenska istraživanja i laboratorijska mjerenja najvažnijih hidrauličkih parametara tla na području modeliranja su od velike važnosti za dobivanje što preciznijih parametara na temelju kojih će se postaviti simulacija. Nakon optimizacije i/ili kalibracije hidrauličkih parametara tla potrebno je odabrati procese za simuliranje (Slika 2.4.1.). Nakon toga se postavljaju parametri toka vode za simulirani model (Slika 2.4.2.) , odabire se hidraulički model (Slika 2.4.3.) i model pronosa tvari (Slika 2.4.4.).



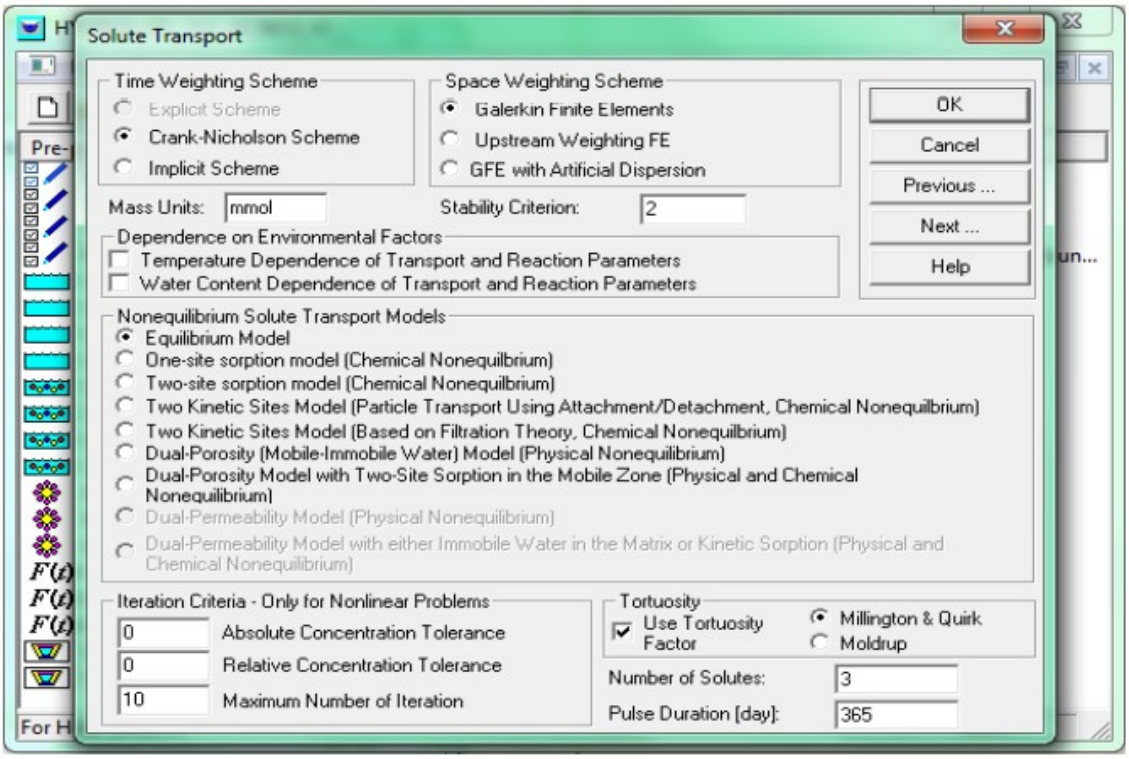
Slika 2.4.1. Prikaz odabranih simulacijskih procesa (npr. Tok vode, pronos tvari, pronos topline)



Slika 2.4.2. Kartica za unos hidrauličkih parametara tla za pojedine horizonte

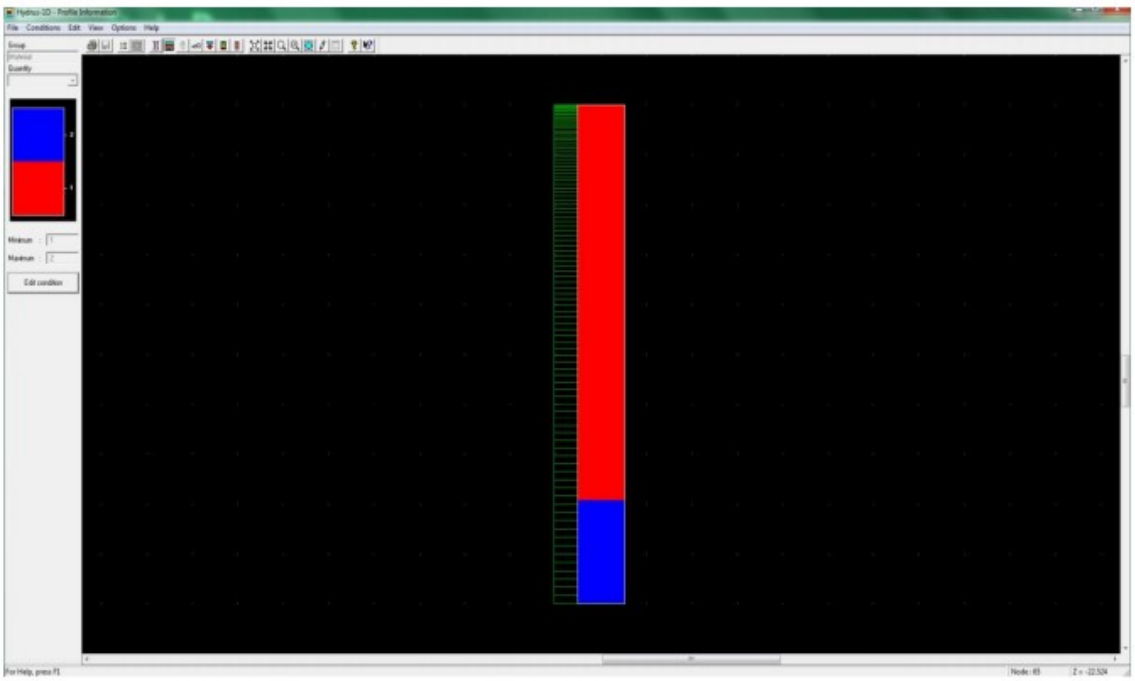


Slika 2.4.3. Prikaz kartice za odabir hidrauličkog modela

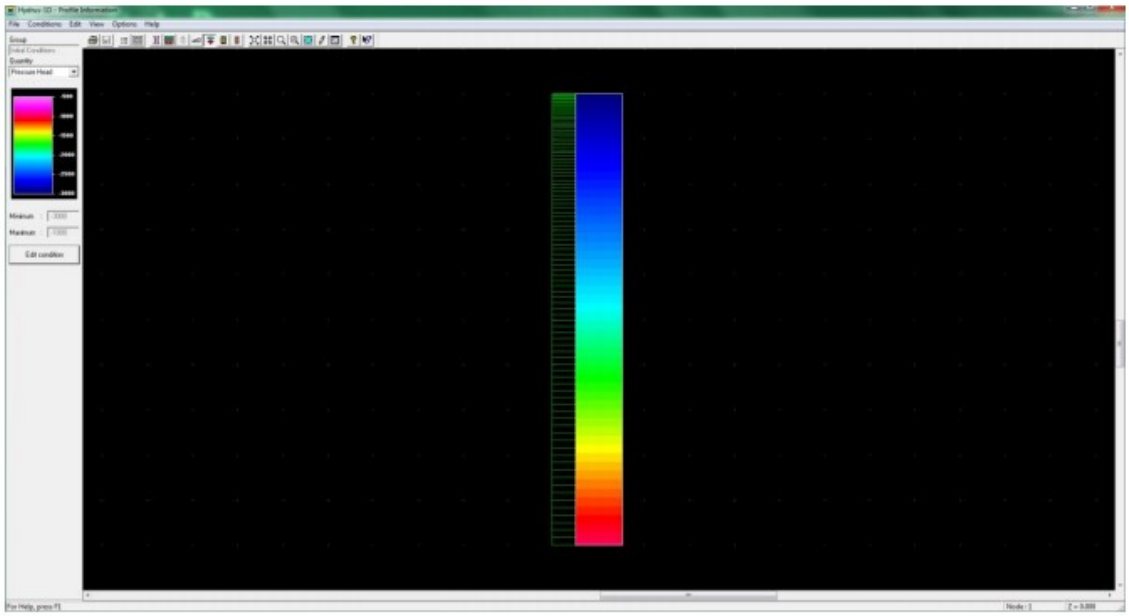


Slika 2.4.4. Prikaz kartice za odabir modela i postavljanje parametara pronosa tvari

Prije pokretanja simulacijskog procesa potrebno je odrediti rubne i početne uvjete za model toka vode i za model pronosa nitrata(Slika 2.4.5.) te za distribuciju horizonata tla(Slika 2.4.6.).

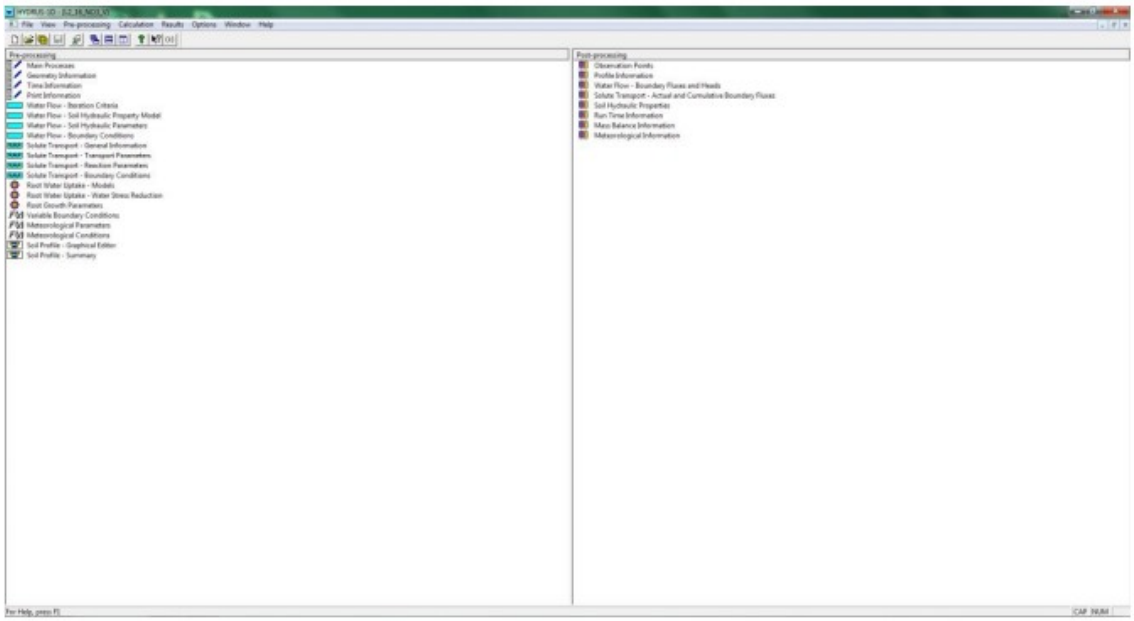


Slika 2.4.5. Prikaz distribucije horizonata u profilu tla



Slika 2.4.6. Prikaz postavljanja rubnih uvjeta u modelu za tok vode i pronos nitrata

Nakon završetka simulacijskog procesa dobivamo pretprocesni i postprocesni prozor s rezultatima simulacije (Slika 2.4.7.).



Slika 2.4.7. Prikaz pretprocesnog i postprocesnog prozora nakon simulacije

3 Materijali i metode

3.1 Odabir lokacija provedbe istraživanja

Zagrebački vodoopskrbni sustav obuhvaća područje od granice sa Slovenijom pa do Sesveta i od padina Medvednice do Kravarskog te ima površinu od 800 km^2. Pedesetak zdenaca na 8 većih vodocrpilišta omogućava opskrbu vode te sustav raspolaže s oko 4 000 – 5 000 l/s vode. Zagrebački vodonosnik je otvoreni aluvijalni vodonosnik s vodnom plohom te je u stalnom kontaktu s rijekom Savom. Podzemne vode teku od zapada prema istoku, odnosno paralelno s rijekom Savom. Promjene vodostaja rijeke Save utječu na promjenu razine podzemne vode dok infiltracija oborina ima utjecaj na prihranjivanje vodonosnika. Vodoopskrbni sustav Grada Zagreba čine tri visinske vodoopskrbne zone. Na gornjim granicama svake zone nalaze se vodospreme s kotama preljeva na 185,5 m n.m. – prva zona, na 264,5 m n.m. – druga zona i na 344 m n.m. – treća zona. Prema Bačani i Posavec (2014.) ukupni kapacitet vodosprema prve visinske zone iznosi oko 91 000 m^3 , druge visinske zone oko 14 000 m^3, a treće visinske zone oko 6 000 m^3.

Istraživanje je provedeno na području grada Zagreba (slika 3.1.1. do slika 3.1.5.), na pet reprezentativnih lokacija u drugoj zoni vodozaštite izvorišta. Izbor lokacija izvršen je u suradnji stručnjaka Sveučilišta u Zagrebu - Zavoda za melioracije i Zavoda za pedologiju te Nastavnog zavoda za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar iz Zagreba, a cjelokupno istraživanje provedeno je u sklopu projekta Ekološka karta Grada Zagreba (https://ekokartazagreb.stampar.hr/).



Slika 3.1.1. Profil P1 u II. Zoni crpilišta Stara Loza (Savska Opatovina) (Fotografija: Husnjak, 2018.)



Slika 3.1.2. Profil P2 u II. Zoni crpilišta Žitnjak i Sašnjak (Vukomerec) (Fotografija: Husnjak, 2018.)



Slika 3.1.3 Profil P3 u II. Zoni zaštite crpilišta Petruševec (Fotografija: Husnjak, 2018.)



Slika 3.1.4. Profil P4 u II. Zoni zaštite crpilišta Mala Mlaka (Sveta Klara) (Fotografija: Husnjak, 2018.)

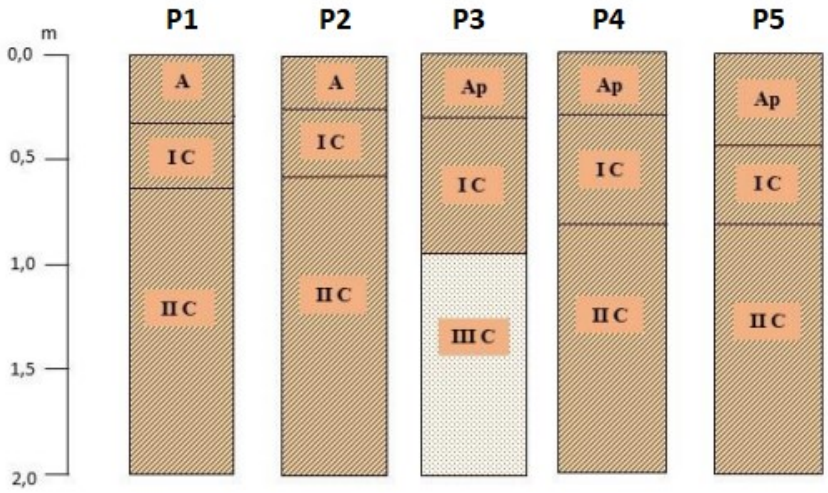


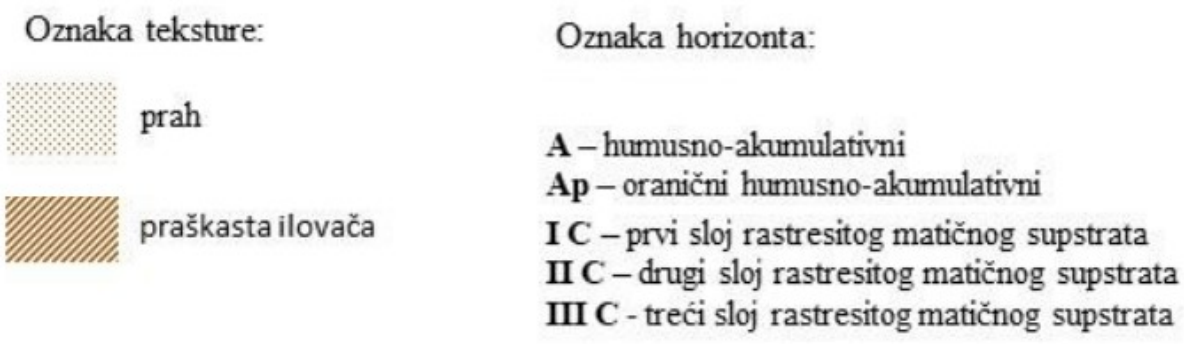
Slika 3.1.5. Profil P5 u II. Zoni zaštite crpilišta Mala Mlaka (Gradska ulica) (Fotografija: Husnjak, 2018.)

3.2 Pedološke karakteristike tla na području istraživanja

Istraživana tla pripadaju terestričkim tlima, a karakterizira ih vlaženje oborinskom vodom dok suvišna voda slobodno perkolira kroz solum tla. Prema Husnjaku (2014.) posebnost karakteristika tala utječe na kemijska, fizikalna i biološka svojstva tla.

Na lokacijama P1, P2, P3, P4, P5 nalazi se rendzina koja pripada razredu humusno-akumulativnih tla (Husnjak, 2014). Rendzina nastaje daljnjim razvojem sirozema, kao i na koluvijalnim i fluvijalnim nanosima. Razvija se na različitim reljefnim formama i na rastresitom matičnom supstratu. Slika 3.2.1. prikazuje stratigrafiju tla i identifikaciju pojedinih horizonata.





Slika 3.2.1 Stratigrafska građa pedoloških profila na lokacijama istraživanog područja (Defterdarović, 2019.)

Lokacija	Tip tla	Podtip Varijetet Forma	Dubina (cm)	Sadržaj mehaničkih čestica (%) u Na-pirofosfatu Krupni pijesak	Sitni pijesak	Krupni prah	Sitni prah	Glina	Kapacitet tla za vodu (% vol.)	Ukupni porozitet (% vol.)	Volumna gustoća tla (g cm-3)	Gustoća pakovanja (g cm-3)	Humus %
P1	Rendzina	Na fluvijalnom nanosu Karbonatna Duboka	0-65 65-100	0,6 0,1	5,8 3,7	24,4 26,9	50,5 52,1	18,7 17,2	41,7 – osrednji 43,1 – osrednji	52,1 – porozno 44,4 – malo porozno	1,27 1,48	1,44 – srednja 1,64 – srednja	2,77 – slabo humozno 1,66 – slabo humozno
P2	Rendzina	Na fluvijalnom nanosu Nekarbonatna Duboka	0-55 55-100	1,9 1,2	6,3 9,2	31,6 38,9	42,7 37,0	17,5 13,7	44,4 – osrednji 42,0 – osrednji	52,2 – porozno 47,6 – porozno	1,22 1,38	1,38 – mala 1,50 – srednja	4,14 – dosta humuzno 1,40 – slabo humozno
P3	Rendzina	Na fluvijalnom nanosu Karbonatna Duboka	0-85 85-100	0,6 1,3	2,2 6,1	22,8 45,4	55,0 36,3	19,4 10,9	41,5 – osrednji 43,1 – osrednji	49,8 – porozno 46,3 – porozno	1,31 1,45	1,49 – srednja 1,55 – srednja	3,96 – dosta humozno 1,22 – slabo humozno
P4	Rendzina	Na fluvijalnom nanosu Karbonatna Duboka	0-78 78-110	8,0 0,6	16,4 34,8	24,2 36,1	37,8 20,9	13,6 7,6	42,5 – osrednji 39,2 – osrednji	49,4 – porozno 49,1 – porozno	1,33 1,38	1,45 – srednja 1,45 – srednja	2,82 – slabo humozno 78 – vrlo slabo humozno
P5	Rendzina	Na fluvijalnom nanosu Karbonatna Duboka	0-82 82-110	1,2 0,9	15,6 3,7	31,5 34,6	35,5 46,5	16,2 14,3	39,2 – osrednji 41,3 – osrednji	46,3 – porozno 43,8 – malo porozno	1,43 1,50	1,58 – srednja 1,63 – srednja	2,43 – slabo humozno 0,78 – vrlo slabo humozno

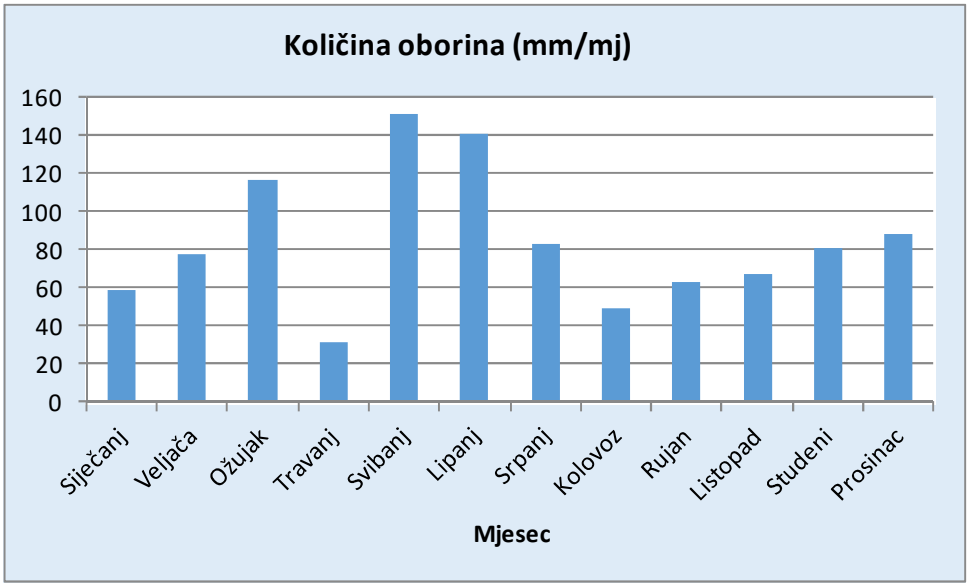
Tablica 3.2.1. Karakteristike tla, sistematska pripadnost, te fizikalna i kemijska svojstva tla na lokacijama istraživanja (P1 – P5)

3.3 Klima na području istraživanja

Klima se može definirati kao skup osrednjih ili očekivanih vrijednosti meteoroloških elemenata i pojava. Na klimu utječu zemljino i atmosfersko zračenje, sunčevo zračenje, oceanske i zračne struje, sastav atmosfere, zemljopisna širina, nadmorska visina, biljni pokrov itd. Također, na klimu utječe i čovjek.

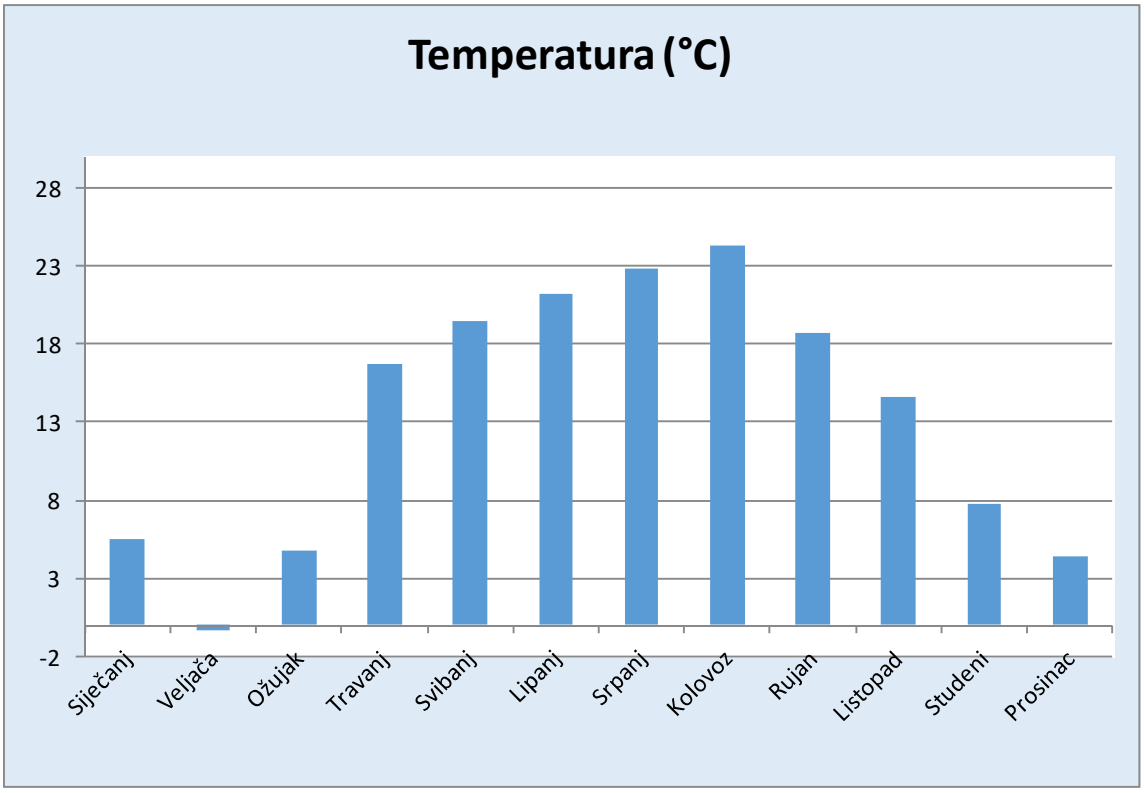
Mjerenja klimatskih podataka, kao što su: temperatura (°C) i oborine (mm), provedena su pomoću Državnog hidrometeorološkog zavoda. Navedeni parametri su mjereni na dnevnoj bazi i kasnije korišteni prilikom jednogodišnje simulacije (HYDRUS-1D).

Suma oborina za 2018. godinu na istraživanom području iznosila je 1006 mm. Svibanj je imao najviše prosječnih mjesečnih oborina, a najmanje oborina prosječno je palo u travnju što je prikazano na slici 3.3.1.



Slika 3.3.1. Mjesečne oborine za 2018. godinu

Podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda govore da je prosječna godišnja temperature za 2018. godinu na istraživanom području iznosila 13.3°C. Veljača je bila najhladniji mjesec s prosječnom temperaturom od -0.3°C, a najhladniji dan istraživanog razdoblja bio je 26. veljače 2018. s srednjom dnevnom temperaturom od -9,3 °C, a najtopliji 3. srpnja 2018. s 28,4 °C. Podaci su prikazani na slici 3.3.2.



Slika 3.3.2. Srednje dnevne temperature istraživanog razdoblja 2018. godine

3.4 Laboratorijske metode određivanja fizikalno-kemijskih karakteristika

Volumna gustoća suhog tla određena je prema gravimetrijskoj metodi koja uključuje sušenje i vaganje uzoraka tla u kojima je prethodno određen volumen (HRN ISO 11272:2004). Priprema uzoraka koja uključuje i odvajanje skeleta određena je prema normi HRN ISO 11464:2006.

Granulometrijski sastav tla, odnosno udio frakcija pijeska, praha i gline određen je prema modificiranoj metodi prosijavanja i sedimentacije (HRN ISO 11277:2011).

Teksturne klase horizonata određene su prema FAO metodi (2006.). Kapacitet tla za vodu određen je metodom prema Gračaninu (JDPZ, 1971.), a ukupni porozitet indirektno, odnosno računski pomoću gustoća tla (JDPZ, 1971.).

Gustoća pakovanja (GP) određena je prema izračunu parametra Rangera, odnosno pomoću volumne gustoće i sadržaja gline u tlu, po formuli: GP = ρv + 0,009 × % gline (g cm^{-3}) (SSEW, 1974.).

Sadržaj humusa određen je metodom po Tjurinu (JDPZ, 1966.).

3.4.1 Određivanje hidrauličkih parametara tla

Na temelju pojednostavljene evaporacijske metode je provedeno određivanje hidrauličkih parametara tla (Schindler, 2017.), automatiziranog sustava HYPROP koji se može koristiti za većinu tipova tla (Haghverdi, 2018.). Određivanje je provedeno u laboratoriju Zavoda za melioracije (MELILAB). Metoda se temelji na promjeni težine uzorka i matričnog (vodnog) potencijala u uzorku tla tijekom procesa sušenja evaporacijom. U odnosu na tradicionalne metode postoje dvije bitne prednosti sustava: vremenski period trajanja svakog mjernog ciklusa (za svaki pojedini uzorak) koji obično traje do nekoliko dana (Haghverdi, 2018.) i generiranje podataka o retenciji vode visoke rezolucije (preko 100 točaka u rasponu od 0 do 100 kPa u odnosu na 10 točaka kod analize tlačnim ekstraktorom (Fields i sur., 2016.).

Za procjenu hidrauličkih parametara u laboratoriju uzorci su uzeti u neporušenom stanju (u cilindrima od 250 cm^3 u dva ponavljanja). Navedeni uzorci pohranjeni su u cilindrima od nehrđajućeg čelika promjera 8 cm i dubine 5 cm. U plastičnoj posudi ispunjenoj vodom uzorci su polako saturirani te su nakon toga pripremljeni za analizu HYPROP sustavom. Sustav se sastoji od dva tenziometra koji su vertikalno smješteni u uzorak čiji je cilindar stezaljkama pričvršćen za jedinicu senzora. Mjerenje započinje smještanjem uzorka na vagu te se mjeri težina tla i vodni potencijal tla. (slika 3.4.1.1.) (Schindler i sur., 2017.).



Slika 3.4.1.1. Prikaz HYPROP sustava tijekom mjerenja (Defterdarović J. i sur., 2019.)

Tenziometar određuje prosječnu vrijednost vodnog potencijala (Ψ) uzorka tla te ta vrijednost odgovara prosječnoj vrijednosti količine vode u odnosu na masu cijelog uzorka (Baviskar, 2017.). Hidraulički parametri izmjereni su na temelju evaporacijske metode HYPROP-FIT programom. Navedena analiza omogućuje korištenje manjeg broja ponavljanja (postoji vremensko ograničenje zbog trajanja analize jednog uzorka, 7-12 dana).

Masa i vodni potencijal su mjereni u vremenskim intervalima od 1 pa do 30 minuta. Na temelju potencijala tijekom vremenskog perioda mjerenja izračunat je hidraulički gradijent. Iz razlika težine tla, tj. razlike volumena vode u tlu dobiven je tok vode. Prema Schindler i sur., (2017.) pojedine točke retencijske krivulje automatski su pomoću HYPROP-FIT softvera izračunate na temelju gubitka vode po volumenu uzorka u određenom vremenu i povezane sa srednjim vrijednostima površinske napetosti u uzorku.

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

$$Ks = -(L \times V)/H \times A \times t \quad (7)$$

gdje je:

L - visina uzorka tla [L],

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

A - površina uzorka [L^2],

V - volumna količina vode [L^3],

T - vrijeme [T].

Pomoću HYPROP uređaja, u laboratoriju se određuje količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije zajedno s rezidualnom količinom vode. KSAT uređaj bazira se na Darcyjevoj jednadžbi, a određuje saturiranu hidrauličku provodljivost. Nakon kalibracije modela dobiveni su empirijski parametri α i n.

U obliku *RMSE* pogreške izražava se mjera evaluacije kvalitete kalibriranog modela. *RMSE* predstavlja srednju devijaciju između modela i podataka. Odvojeno od pogreške za model hidrauličke provodljivosti (*RMSE_K*) izračunata je pogreška modela vodne retencije (*RMSE_TH*).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}[y_i - \hat{y}_i]^2} \quad (8)$$

gdje je:

yi izmjerena vrijednost,

$\hat{yi}$ predviđena vrijednost modela.

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

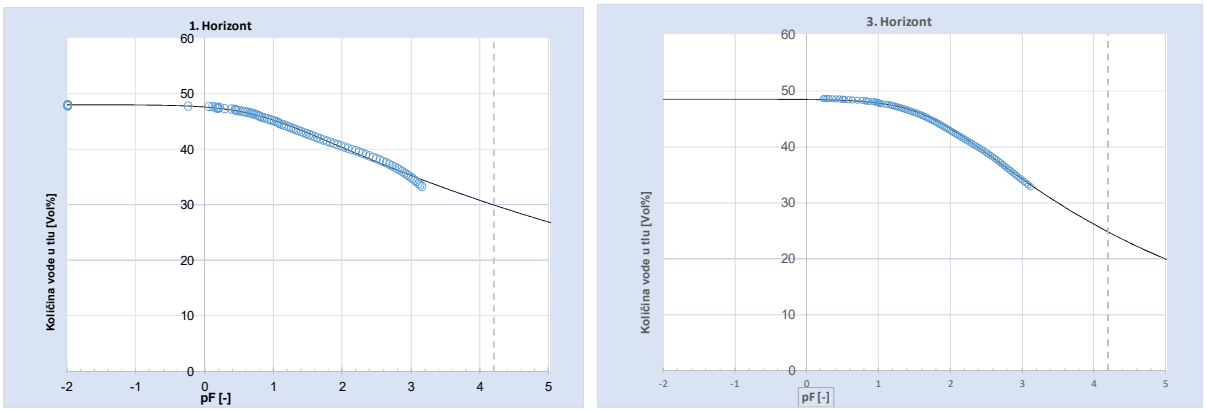
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^r [y_i - \hat{y}_i][\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i]}{\sqrt{\sum_1^r [y_i - \bar{y}_i]^2 [\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i]^2}} \quad (9)$$

Određivanje hidrauličkih parametara temeljeno je na van Genuchten-Mualemovom modelu (van Genuchten, 1980.).

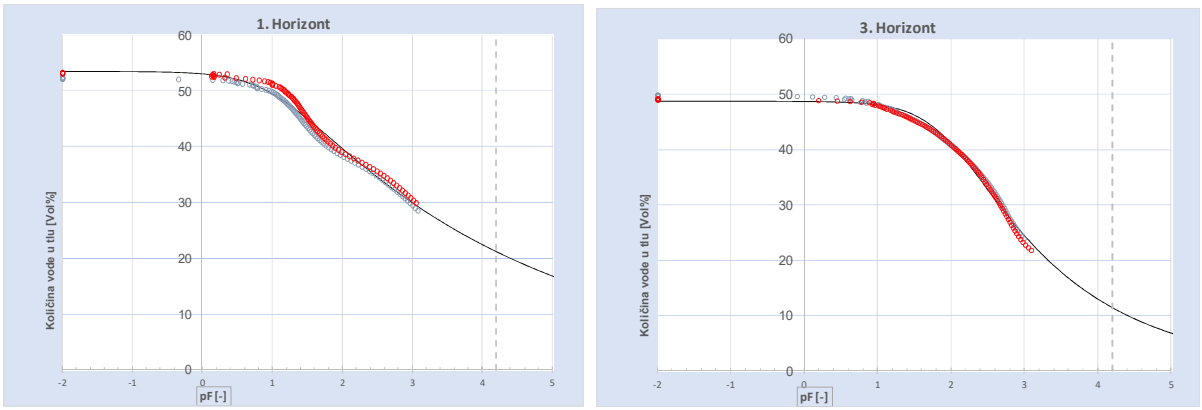
4 Rezultati i rasprava

Funkcije retencije vode i hidrauličke provodljivosti na mjerenim uzorcima određene su na osnovu podataka vodnog potencijala, te sadržaja i toka vode. Crna linija prikazuje krivulje koje su projicirane na temelju izmjerenih vrijednosti vodnog potencijala i sadržaja vode u tlu, a temelje se na van Genuchten-Mualemovom modelu. Prikazuje kontinuiranu promjenu sadržaja vode od potpunog zasićenja (saturacije) θ_s do minimalnih vrijednosti, odnosno rezidualnog sadržaja vode u tlu θ_r. Prijelaz iz potpunog zasićenja do parcijalnog odvija se pri karakterističnim vodnim potencijalima koji su povezani s velikim porama u poroznom mediju, te time ovise o strukturi i teksturi tla. Crveni i plavi krugovi predstavljaju točke opažanja dva neporušena uzorka (2x) koja su uzeta na različitim dubinama unutar soluma tla (tablica 4.1.). Varijabilnost θ_s ovisi o karakteristikama tla, fizikalnim i kemijskim svojstvima tla koja se međusobno razlikuju te njihovom spregom dolazi do različitog zadržavanja vode u tlu pri različitim tlakovima.

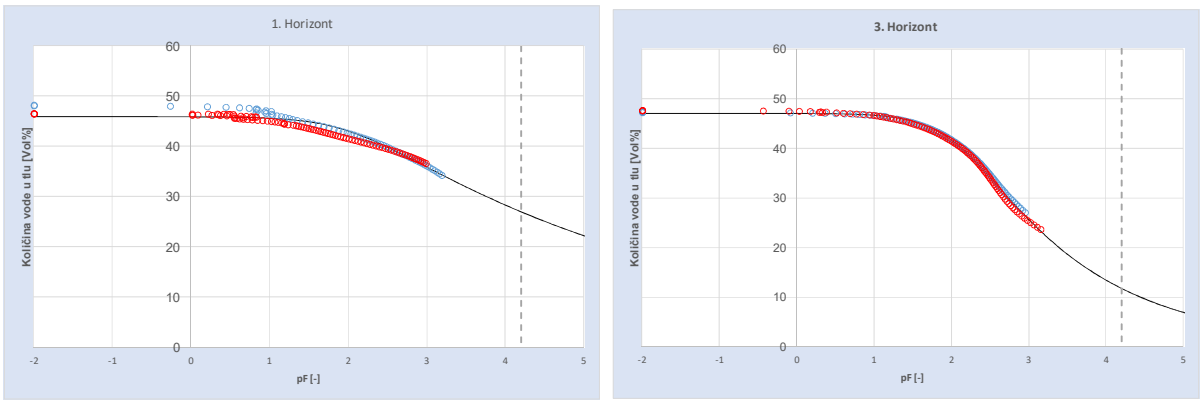
Količina vode u tlu pri uvjetima potpune saturacije (θ_s) na istraživanom području varirala je od 0,42 (profil P5) do 0,54 (profil P2). Profil P2 zadržava najveće količine vode u tlu u odnosu na ostale mjerene uzorke profila. Karakterizira ga osrednji kapacitet tla za vodu (44,4 % vol.), sadržaj humusa od 4,14 % te veliki ukupni porozitet (52,2 % vol.). Kombinacijom navedenih svojstava, dolazi do velike sposobnosti zadržavanja vode u uvjetima potpune saturacije. Najmanju količinu vode u odnosu na druge profile zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstava zadržava profil P5.



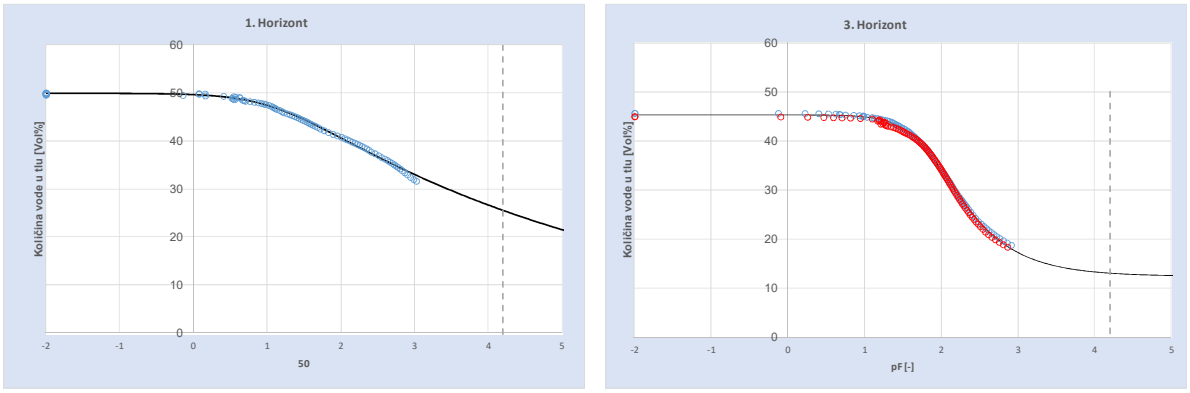
Slika 4.1. Retencijske krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P1



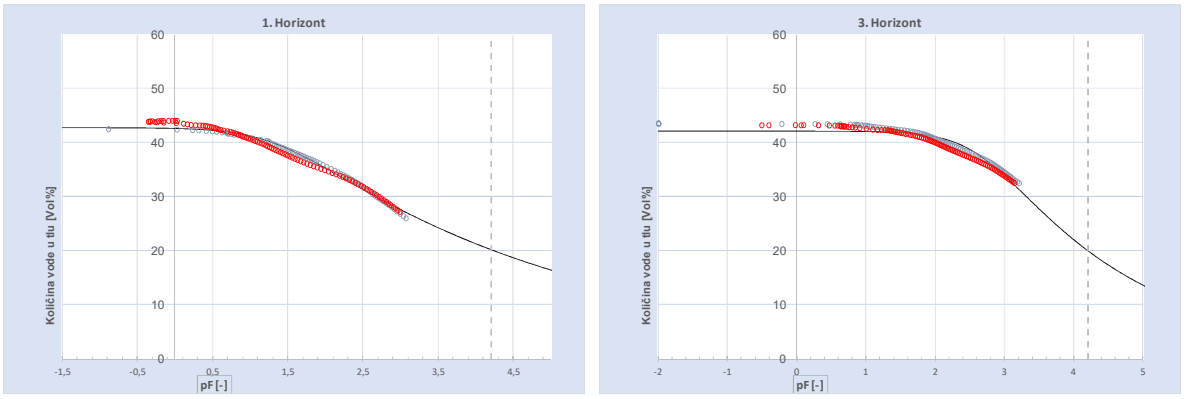
Slika 4.2. Retencijske krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P2



Slika 4.3. Retencijske krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P3



Slika 4.4. Retencijske krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P4



Slika 4.5. Retencijske krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P5

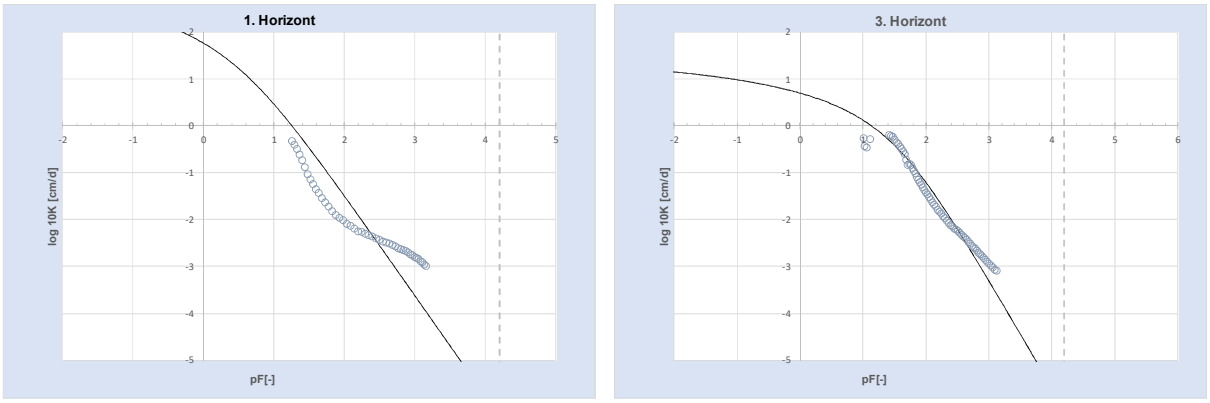
Hidrauličke krivulje prikazuju odnos relativne količine vode u tlu i hidrauličke provodljivosti koji su mjereni u neporušenim uzorcima tla. Hidraulička provodljivost je sposobnost tla za transport vode i tvari kroz solum tla te je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Prema Hillelu (1998.) hidraulička provodljivost ovisna je o strukturi i teksturi, a prvenstveno ovisi o veličini provodljivih pora (makropora). U saturiranim uvjetima, hidraulička provodljivost je veća u teksturno lakšim tlima (pijesak) nego u teksturno težim tlima. Hidraulička krivulja predstavlja ovisnost hidrauličke provodljivosti o sadržaju vode u tlu. Crveni i plavi krugovi predstavljaju točke opažanja dva neporušena uzorka (2x) koja su uzeta na dvije različite dubine unutar soluma tla.

Koeficijent hidrauličke provodljivosti (K_s) varirao je u rasponu od 5.79 cm/danu (profil P3) do 990.90 cm/danu (profil P4).

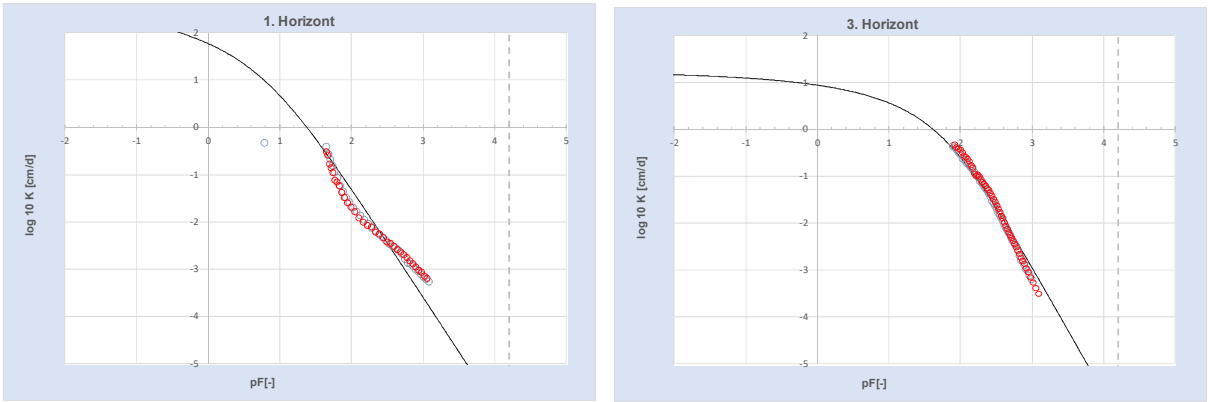
U prvom horizontu profila P3 izmjeren je najniži K_s u odnosu na ostale mjerene profile. Niski sadržaj čestica krupnog i sitnog pijeska (2.8%), visoki sadržaj sitnog praha (55%) (najviše izmjereno u odnosu na ostale uzorke), volumna gustoća od

1,22 g cm^{-3} (najmanja izmjerena u odnosu na ostale uzorke) te dobar sadržaj humusa (3.96%) uvjetuju vrlo malu hidrauličku provodljivost. Najviša vrijednost K_s izmjerena je u prvom horizontu profila P4 te je uvjetovana fizikalnim i kemijskim svojstvima tla. Povećani sadržaj čestica krupnog i sitnog pijeska (24.4%) i osrednji kapacitet tla za vodu (42.5% vol.) omogućuju višu hidrauličku provodljivost i povećan tok vode i pronosa tvari kroz solum tla.

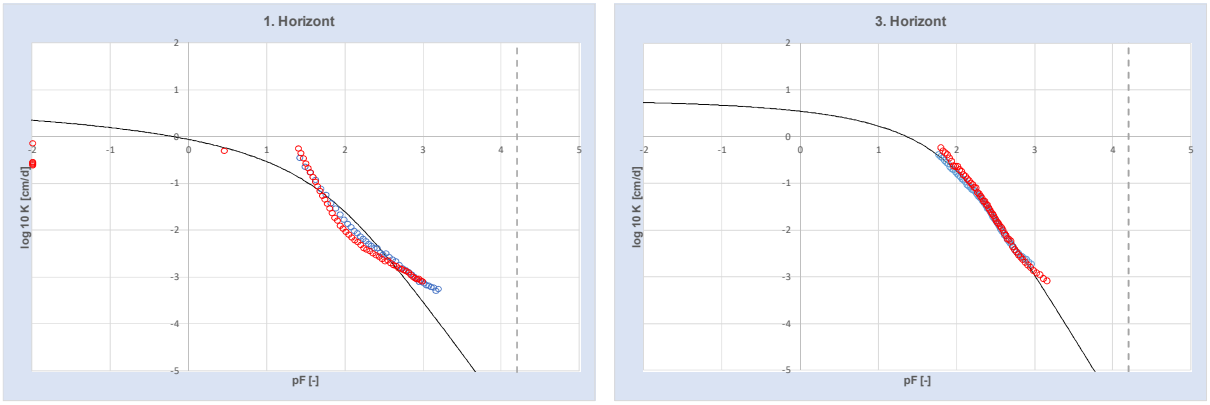
RMSE je manji od 0,01 što ukazuje na primjenjivost van Genuchten-Mualemovog modela za sve lokacije te kod procjene hidrauličkih parametara ukazuju na pouzdanost primijenjene metode (Schelle i sur., 2013.).



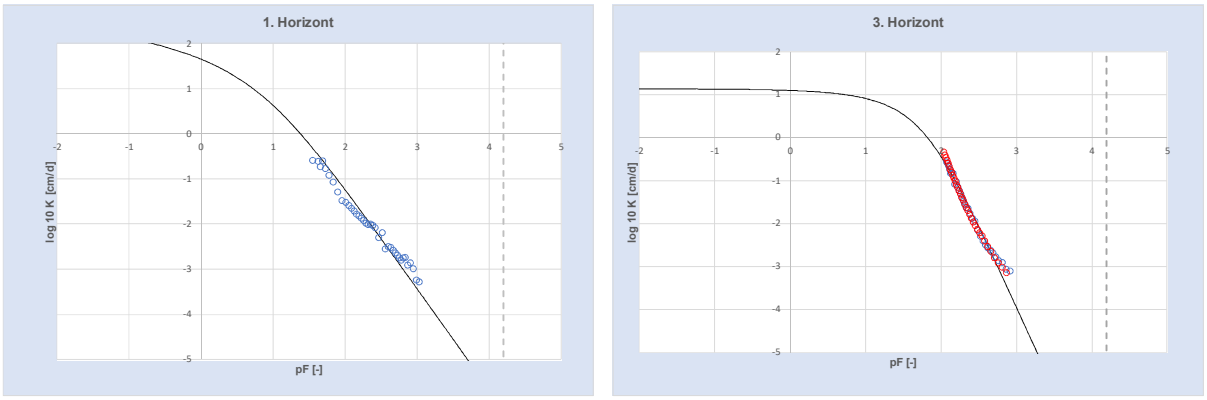
Slika 4.6. Hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P1



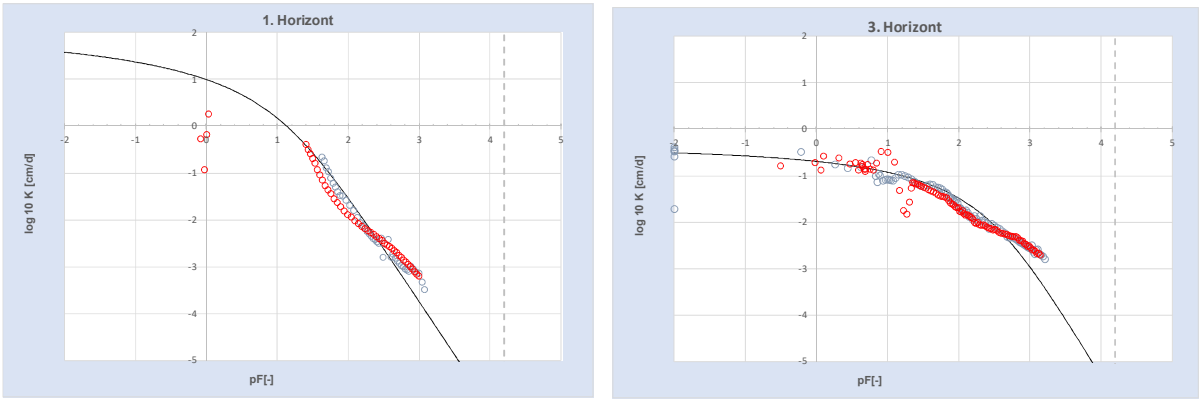
Slika 4.7. Hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P2



Slika 4.8. Hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P3



Slika 4.9. Hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P4



Slika 4.10. Hidrauličke krivulje dobivene pomoću HYPROP-FIT programa za profil P5

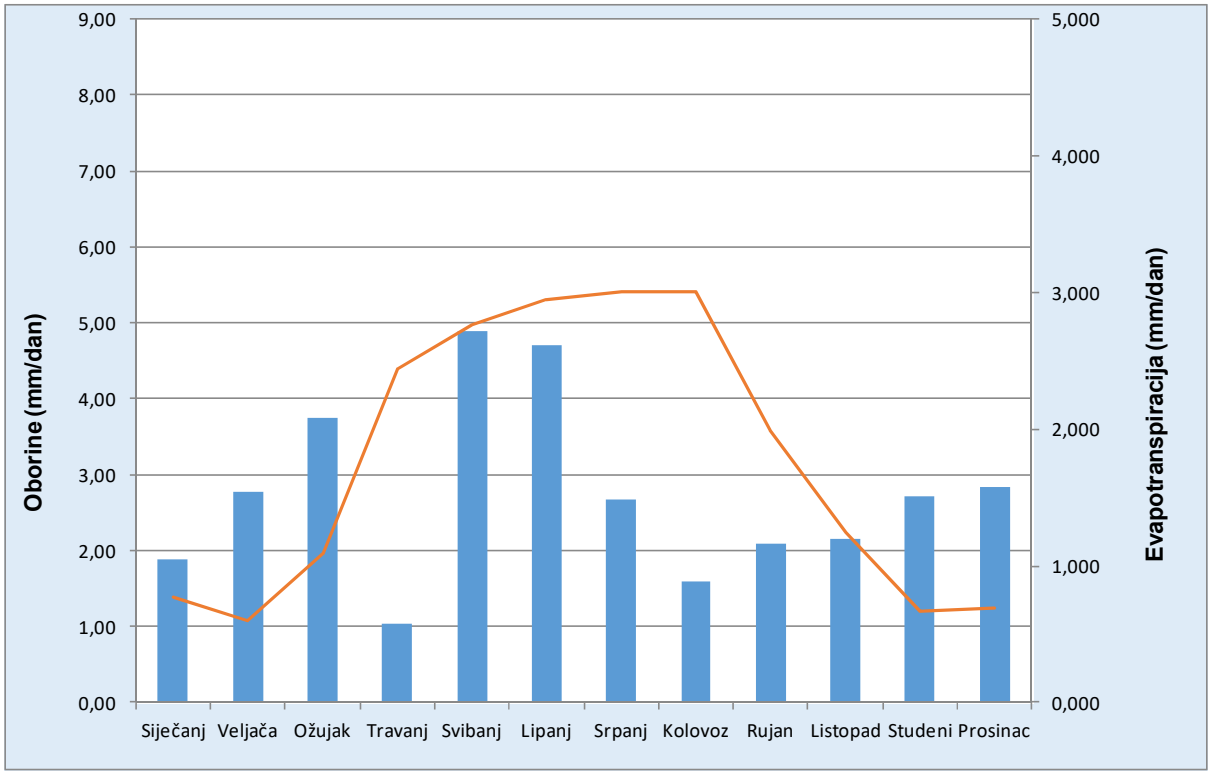
Na istraživanom području hidraulički parametri u tlu pokazuju da je najpropusnije tlo na profilu P4 radi najvišeg sadržaja čestica krupnog i sitnog pijeska, visokog koeficijenta hidrauličke provodljivosti te male vrijednosti količine vode pri uvjetima potpune saturacije – θ_s. Najmanje propusno tlo je tlo na lokaciji P3 koja ima nisku hidrauličku provodljivost (K_s) u cijelom solumu tla, a visoku vrijednost θs, što je u vezi s povećanim sadržajem čestica praha i gline, velikim sadržajem humusa u gornjim horizontima (3,96%) i osrednjim kapacitetom tla za vodu.

Profil	Horizont	Dubina (cm)	Qr ($cm^3/cm^{3)}$	Qs (cm^3/cm^3)	α (1/cm)	n	Ks (cm/d)	RMSE_TH (cm^3)	RMSE_K (cm^3)
P1	1	0-65	0,000	0,48	0,19	1,06	582,60	0,00	0,59
	3	65-100	0,000	0,49	0,02	1,12	34,50	0,00	0,22
P2	1	0-55	0,000	0,54	0,10	1,12	909,20	0,01	0,32
	3	55-100	0,000	0,49	0,01	1,28	17,20	0,01	0,13
P3	1	0-85	0,000	0,46	0,01	1,11	5,79	0,01	0,36
	3	85-100	0,000	0,47	0,01	1,29	6,16	0,00	0,08
P4	1	0-78	0,000	0,50	0,08	1,09	990,90	0,00	0,19
	3	78-100	0,12	0,45	0,01	1,74	13,80	0,00	0,14
P5	1	0-82	0,00	0,43	0,47	1,20	113,30	0,01	0,40
	3	82-100	0,00	0,42	0,00	1,21	25,00	0,01	0,26

Tablica 4.1. Hidraulički parametri izmjereni pomoću HYPROP-FIT programa

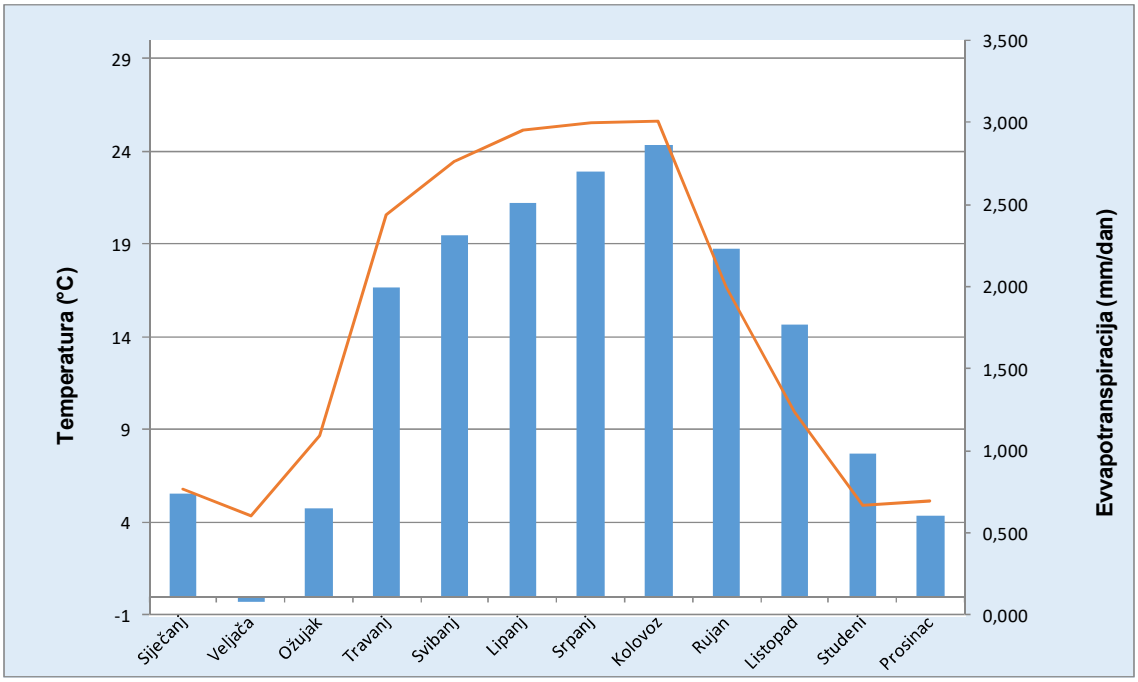
4.1 Rezultati vodne bilance te model toka vode

Na području istraživanja evapotranspiracija (ET) je varirala s obzirom na klimatske parametre u pojedinim mjesecima. Slika 4.1.1. prikazuje varijaciju ET s obzirom na oborine te je prikazano da se povećane vrijednosti javljaju nakon oborina jačeg intenziteta.



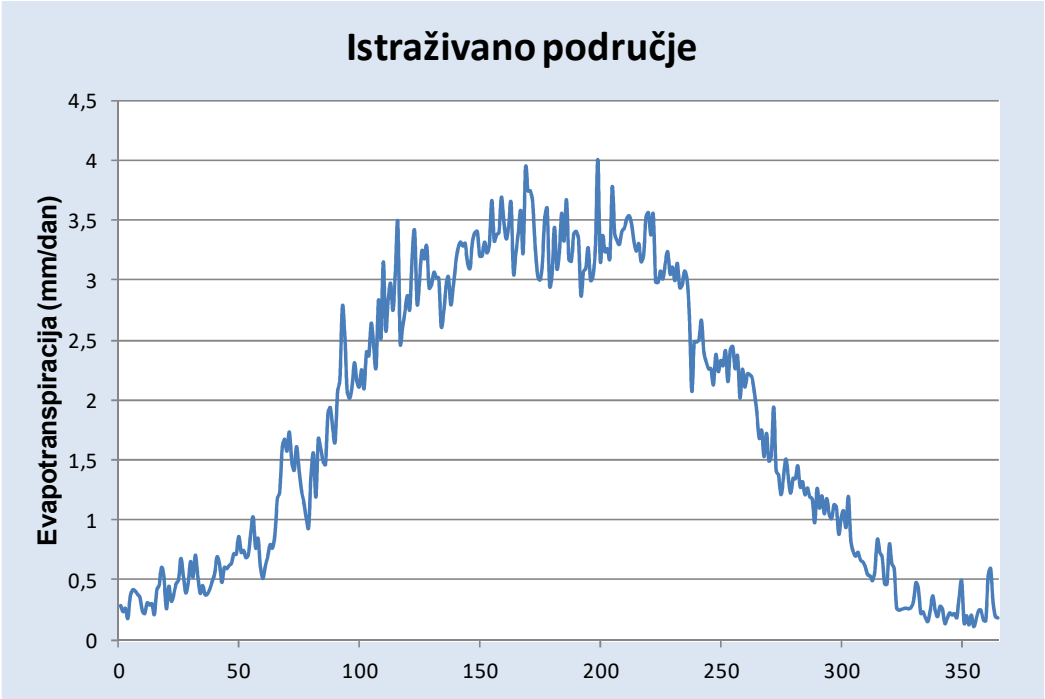
Slika 4.1.1. Prikaz vrijednosti oborina i evapotranspiracije tijekom istraživanog razdoblja

Za istraživano razdoblje tijekom svibnja prosječna dnevna količina oborina iznosila je 4,88 mm, dok je u lipnju bila nešto manja (4,70 mm) što je uzrokovalo povećanje ET u ljetnim mjesecima. Tijekom zime javljaju se povećane količine oborina, ali ne dolazi do povećanja ET radi nižih temperatura. Povećanje količine prosječnih dnevnih oborina i pad temperature javlja se tokom zime. Najniža količina oborina bila je u travnju 2018., te je iznosila 1,03 mm. Najviša prosječna temperatura zabilježena je u kolovozu i iznosila je 24,3 ˚C (Slika 4.1.1.).

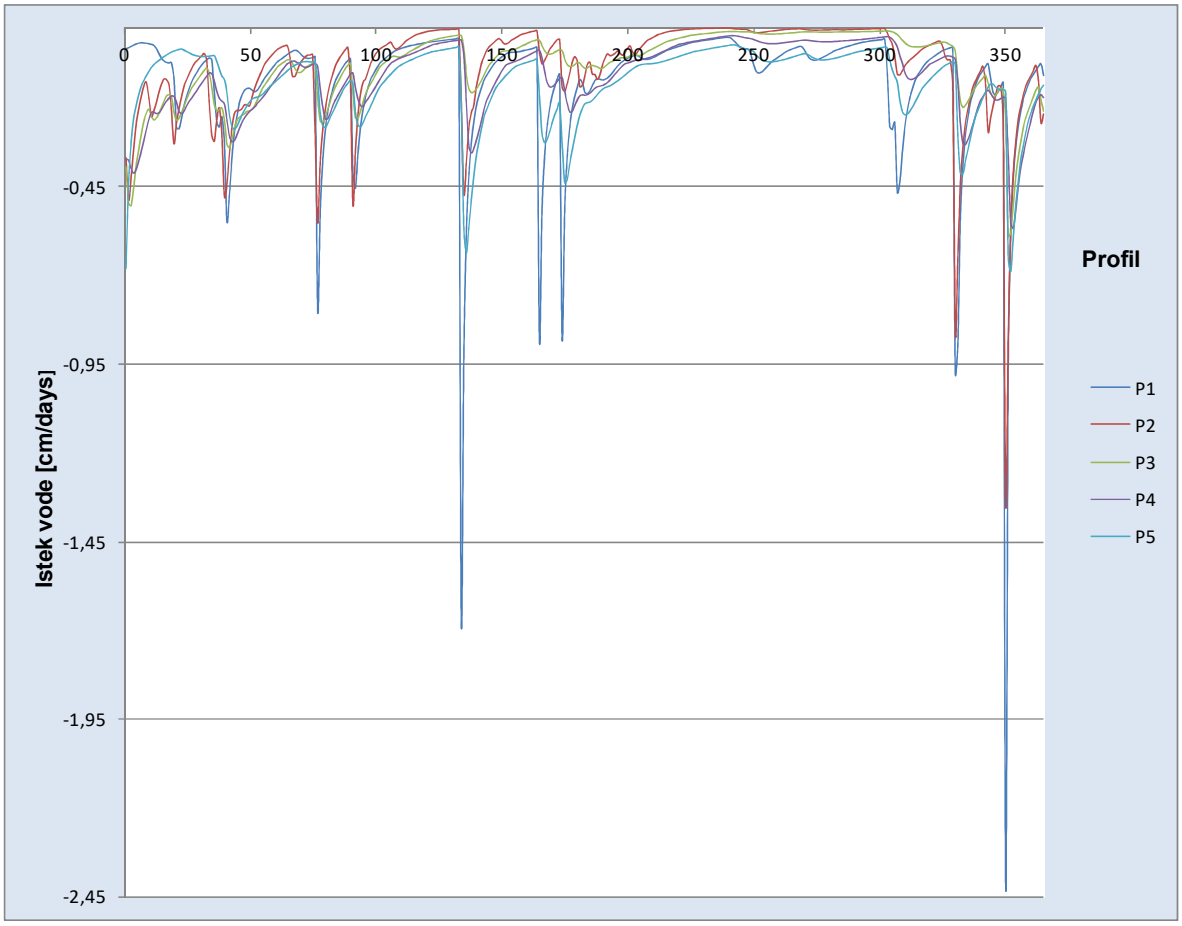


Slika 4.1.2 Varijacije temperature i evapotranspiracije tijekom istraživanog razdoblja

Varijacije temperature i evapotranspiracije tijekom istraživanog razdoblja prikazane su na slici 4.1.2. Evapotranspiracija raste s temperaturom te se vidi da je u ljetnim mjesecima na najvišim razinama kada se promatra razdoblje jedne godine, kada je i temperatura na najvišim raznima. S druge strane, u zimskim mjesecima je na najnižim razinama. Na evapotranspiraciju, osim temperature, utječu i drugi faktori, kao što su padaline i biljni pokrov. Na slici 4.1.3 vidi se graf evapotranspiracije tokom 2018. godine.

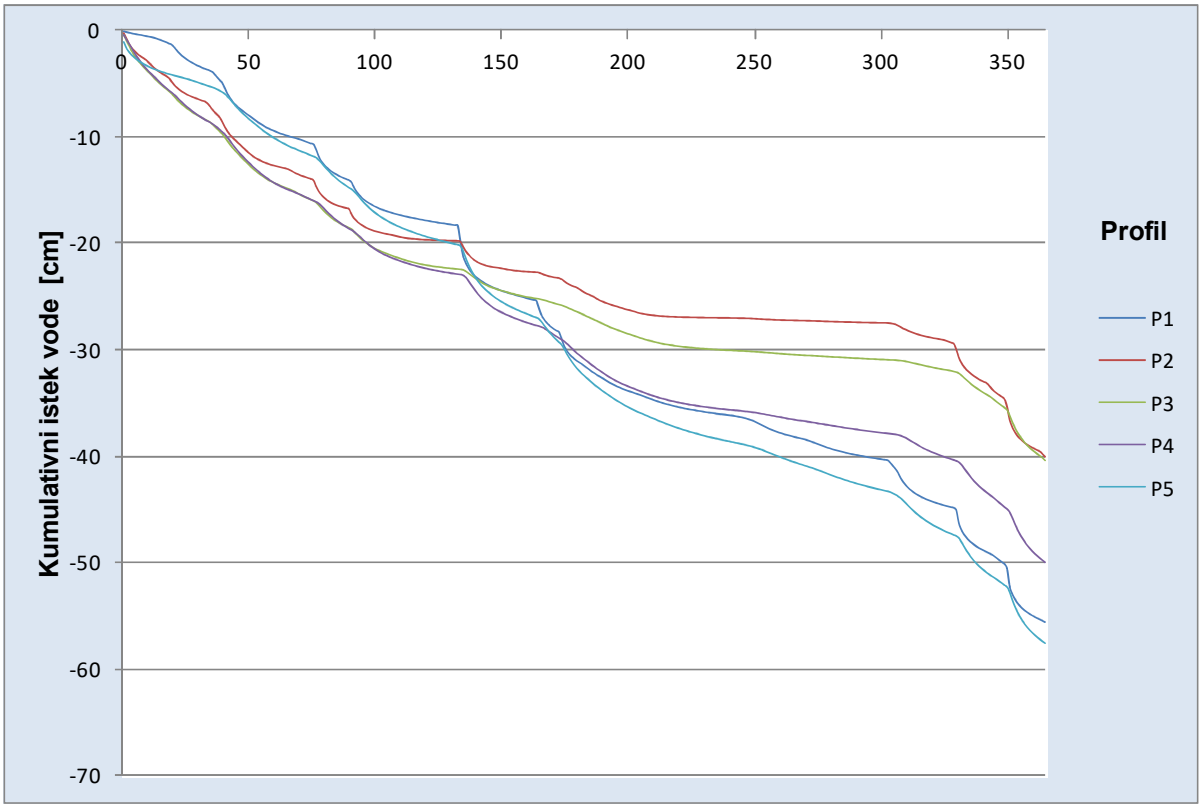


Slika 4.1.3. Prikaz evapotranspiracije na istraživanom području za 2018. godinu



Slika 4.1.4. Prikaz isteka vode (cm/dan)

Na slici 4.1.4. su grafički prikazane simulirane vrijednosti isteka vode pomoću programa HYDRUS-1D. Na slici je vidljivo da je najveća količina procijeđene vode izmjerena u svibnju i na kraju godine u uvjetima tzv. „golog tla“ bez poljoprivrednih kultura. U takvim uvjetima uslijed niže temperature zraka i evapotranspiracije (kao izravne posljedice navedenoga), prisutan je veći sadržaj vode u tlu koja se stoga u većim količinama i procjeđuje u dublje slojeve tla. Osim navedenog, raspored i količina oborina su značajno utjecali na povećano procjeđivanje vode kroz tlo. Naime, kada se gleda količina oborina, ona je u svibnju bila na najvišoj razini, kao što je ranije napisano. Čak štoviše, 133. i 134. dan je palo najviše kiše, čak 80 mm u dva dana, a 134 dan je istek vode bio najveći n profilu P1 u prvoj polovici godine. S druge strane, oborine na kraju godine nisu na najvišim razinama te godine, 340. i 350. dan je palo 37,4 mm kiše, ali tokom zime su niže temperature i evapotranspiracija.



Slika 4.1.5. Prikaz kumulativnog isteka vode (cm/dan)

Na slici 4.1.5. prikazane su kumulativne vrijednosti isteka vode na profilima P1 do P5 kroz godinu dana. Po kumulativnoj vrijednosti isteka vidi se da je profil P3 onaj s najsporijim istekom. Isti profil također se pokazao kao onaj s najsporijim istekom kada se u obzir uzme parametar K_s (koeficijent hidrauličke provodljivosti), kao što je objašnjeno ranije. S druge strane, profili P1 i P5 su oni s najvećim istekom vode, pri čemu je kod P1 kumulativni istek vode nakon 1 godine 56,6 cm, a kod profila P5 je 57,2 cm. Naime, kod profila P1, vidi se u dva navrata veliki skok – u 134. i 350. danu, ali s druge strane profil P5 ima veći istek od P1 čak 284 dana od ukupno 365 koliko je promatrano.

5 Zaključak

Glavni cilj rada je bio procijeniti kako hidraulički parametri tla utječu na tok vode u nesaturiranoj zoni tla. U tu svrhu su određeni hidraulički parametri tla pomoću HYPROP uređaja na neporušenim uzorcima tla na pet odabranih lokacija na području grada Zagreba. Nakon terenskih i laboratorijskih istraživanja primijenjeni su numerički modeli za opis retencijskih krivulja (van Genuchten - Mualem model) i tok vode u nesaturiranoj zoni tla (Richardova jednadžba). Hidraulički parametri tla ukazuju na veliku varijabilnost unutar istraživanog područja s obzirom na lokacije profila (P1 – P5). Svaka navedena lokacija međusobno se razlikuje po fizikalnim i kemijskim svojstvima što uvjetuje različiti sadržaj vode u tlu i različitu hidrauličku provodljivost. Provedena mjerenja hidrauličkih parametara tla pokazala su visoku podudarnost procijenjenih retencijskih i hidrauličkih krivulja temeljenih na van Genuchten-Mualemovom modelu (R2 i RMSE vrijednosti) što ukazuje na pouzdanost primijenjenih metoda (RMSE < 0.01 cm^3/cm^3 i RMSE < 0,6 cm/d). Iako se radilo o istom tipu tla uočene se velike razlike u hidrauličkim karakteristikama što ukazuje na veliku heterogenost istraživanih tala. Numeričko modeliranje toka vode na lokacijama istraživanja je ukazalo na važnost procjene svih hidrauličkih parametara jer uz hidrauličku vodljivost nesaturiranog tla i ostali parametri utječu na ponašanje i tok vode u tlu. Primjenom i kombinacijom terenskih, laboratorijskih i numeričkih metoda dobiveni su rezultati koji mogu pouzdano poslužiti za procjenu toka vode na različitim tipovima tala. Numeričko modeliranje je bitan alat za dobivanje pouzdanih i brzih rezultata na temelju kojih možemo procijeniti različite okolišne procese i prilagoditi način gospodarenja u agroekosustavima.

6 Popis literature

1. Bačani A., Posavec K. (2014.). Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreba.
2. Baviskar S.M., Heimovaara T.J. (2017.). Quantification of soil water retention parameters using multi-section TDR-waveform analysis. Journal of Hydrology. 549: 404-415.
3. Bolado Rodríguez S., García Sinovas D., Álvarez Benedí J. (2010): Application of pig slurry to soils. Effect of air stripping treatment on nitrogen and TOC leaching. Journal of Environmental Management. 91, 2594-2598.
4. Chahine M. T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. Nature. 359: 373-380.
5. Darcy H. (1856.). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris
6. Defterdarović J., Kikić D., Novosel A. (2019). Primjena eksperimentalnih i numeričkih metoda za procjenu transporta nitrata i pesticida na tlima urbanih površina. Zagreb.
7. Durner W. i Flühler H. (2005). Soil Hydraulic Properties. Braunschweig Technical University, Germany.
8. FAO (2006.). Guidelines for soil profile description (4th ed.). Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 97 pp.
9. Fields J.S., Owen Jr. J.S., Zhang L., Fonteno W.C. (2016.). Use of evaporative method for determination of soilless substrate moisture characteristic curves. Scientia Horticulturae. 211: 102- 109.
10. Filipović V. (2015). Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb. 281-292.
11. FILIPOVIĆ, V., PETOŠIĆ, D., NAKIĆ, Z., MUSTAĆ, I., RUŽIČIĆ, S., ZOVKO, M. i BUBALO, M. (2012): Identifying spatial and temporal variation of nitrate concentration in shallow groundwater aquifer. Journal of Food Agriculture and Environment. 10, (3 and 4), str. 1001- 1004.
12. Gereš D. (2004). Kruženje vode u zemljinom sustvu. GRAĐEVINAR 56 (2004) 6, 355-365.
13. Hadas A., (1964.). Deviations from Darcy's law for the flow of water in unsaturated soils, Israel d. Agric. Res. 4 (4): 159-168.
14. Haghverdi A., Öztürk H.S., Durner W. (2018.). Measurement and Estimation of the Soil Water Retention Curve Using Evaporation Method and Pseudo Continuous Pedotransfer Function. Journal of Hydrology. 563: 251-259.
15. HRN ISO 11272:2004. Kakvoća tla – Određivanje volumne gustoće suhog tla (ISO 11272:1998)
16. HRN ISO 11464:2006. Kakvoća tla – Priprema uzorka za fizikalno-kemijske analize (ISO 11464:2006)

17. HRN ISO 11277:2011. Kvaliteta tla – Određivanje raspodjele veličine čestica (mehaničkog sastava) u mineralnom dijelu tla – Metoda prosijavanja i sedimentacije (ISO 11277:2009)
18. Husnjak S. (2014.). Sistematika tala Hrvatske. Sveučilišni udžbenik. Hrvatska sveučilišna naklada. Zagreb. 368 str
19. JDPZ (1966.). Metoda po Tjurinu. Kemijske metode istraživanja zemljišta, Beograd.
20. JDPZ (1971.). Metodika ispitivanja fizičkih svojstava zemljišta. Priručnik, Knj. X, Beograd.
21. Mustać I. (2015). Modeliranje toka podzemne vode. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb. 256-280
22. Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Filipović V., Petek M., Lazarević B., Bubalo M. (2015). Voda u agroekosustavima. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
23. Or D. i Wraith J.M (1997). Agricultural and Environmental Soil Physics. Utah State University Logan.
24. Petek i Lazarević (2015). Svojstva vode i fiziološka uloga vode u sustavu tlo – biljka – atmosfera. U: Voda u agroekosustavima (Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Petek M., Lazarević B., Bubalo M.). Sveučilište u Zagrebu. Agronomski fakultet, Zagreb. 53-85.
25. Richards L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1: 318-333.
26. RUŽIČIĆ, S., MILEUSNIĆ, M., POSAVEC, K. (2012): Building conceptual and mathematical model for water flow and solute transport int he unsaturated zone at Kosnica site. University of Zagreb. Faculty of mining, geology and petroleum engineering. Vol 25. str. 21-31.
27. Schindler U., Müller L. (2017.). Soil hydraulic functions of international soils measured with the Extended Evaporation Method (EEM) and the HYPROP device. Open Data Journal for Agricultural Research. 3: 10-16.
28. SSEW (1974.). Soil Survey of England and Wales. Soil Survey laboratory methods. Technical monograph No. 7. Harpenden.
29. Šimunić I. (2013). Uređenje voda. Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
30. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. (2016): Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. Vadose Zone Jurnal 15(7).
31. Tomić F. (1988). Navodnjavanje. Fakultet poljoprivrednih znanosti i Društvo inženjera i tehničara Hrvatske, Zagreb.
32. van Genuchten M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892– 1037.
33. https://ekokartazagreb.stampar.hr/

Životopis

Marko Fučkan rođen je 12.2.1993. godine u Zagrebu, Hrvatskoj. Odrastao je u Zagrebu gdje je polazio osnovnu školu Marije Jurić Zagorke od 1999. do 2007. godine kao odličan učenik. Nakon toga upisuje III. Gimnaziju u Zagrebu, prirodoslovno - matematički smjer uz učenje njemačkog jezika te ju završava 2011. godine. Tokom osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja, bavio se sportom u plivačkom klubu Dubrava.

Nakon uspješnog polaganja Državne mature upisuje Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer Poljoprivredna tehnika. Preddiplomski studij završava 2015. godine. Tokom preddiplomskog studija sudjelovao je na projektu ,,Kontrola i suzbijanje varoe u pčelinjem leglu'', mjerenje varoe u zatvorenom leglu, procjena zaraženosti pčelinje zajednice varoom. Godine 2015. upisuje diplomski studij Melioracije na Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Engleskim jezikom služi se aktivno, u govoru i pismu. Tokom studija zaposlen je na raznim poslovima ugostiteljstvu i organizaciji raznih događanja. U slobodno vrijeme bavi se pčelarstvom.